

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de ciencias e Ingenierías**

**Secador de Punto Crítico para Muestras Orgánicas utilizando CO<sub>2</sub>**

**Kevin Fernando Fierro Ocampo**

**Aarom Mateo Obando Pinto**

**Sebastián Reyes Constante**

**Nicolas Alejandro Villacís Benalcázar**

**Ingeniería Mecánica**

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito

para la obtención del título de

**Ingeniero Mecánico**

Quito, 12 de mayo de 2025

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de ciencias e ingenierías**

**HOJA DE CALIFICACIÓN**

**DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

**Secador de punto crítico para muestras orgánicas utilizando CO<sub>2</sub>**

**Kevin Fernando Fierro Ocampo**

**Aarom Mateo Obando Pinto**

**Sebastián Reyes Constante**

**Nicolás Alejandro Villacís Benalcázar**

**Nombre del profesor, Título académico**

**Alfredo Valarezo, Ph.D.**

Quito, 12 de mayo de 2025

**© DERECHOS DE AUTOR**

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Kevin Fernando Fierro Ocampo

Código: 00323477

Cédula de identidad: 0202483814

Lugar y fecha: Quito, 12 de mayo de 2025

**© DERECHOS DE AUTOR**

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Aarom Mateo Obando Pinto

Código: 00322242

Cédula de identidad: 1722905971

Lugar y fecha: Quito, 12 de mayo de 2025

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Sebastián Reyes Constante

Código: 00321915

Cédula de identidad: 1722821467

Lugar y fecha: Quito, 12 de mayo de 2025

**© DERECHOS DE AUTOR**

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Nicolás Alejandro Villacís Benalcázar

Código: 00320182

Cédula de identidad: 1752265056

Lugar y fecha: Quito, 12 de mayo de 2025

## **ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN**

**Nota:** El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETheses>.

## **UNPUBLISHED DOCUMENT**

**Note:** The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETheses>.

## RESUMEN

En este trabajo se desarrolla el diseño y construcción de un Secador de Punto Crítico (SPC) manual, sin componentes electrónicos, con el objetivo de ofrecer una opción de bajo costo y accesible. El diseño seleccionado consiste en un cilindro de acero inoxidable 316 con un calentador de banda de una potencia máxima de 100 [W]. Se usaron válvulas, manómetro y termómetro, se estandarizaron todas las roscas a NPT ½ en acero inoxidable. Para garantizar la seguridad se calculó un espesor mínimo para el equipo de 17,5 mm para así evitar posibles fallos estructurales.

El diseño está capacitado para operar a presiones de hasta 1070 psi (7.37 MPa) y temperaturas de hasta 31°C, alcanzando el punto crítico del CO<sub>2</sub>. El manual proporciona especificaciones técnicas detalladas, componentes, y procedimientos operacionales, junto con pautas de mantenimiento preventivo y correctivo para extender la vida útil del equipo y garantizar una operación segura y confiable. Se hace énfasis en tareas de mantenimiento crítico como la inspección de sellos, revisión de válvulas, y procedimientos de limpieza para el sistema de flujo de CO<sub>2</sub>. Además, se incluyen pasos para la resolución de problemas comunes, asegurando que los operadores puedan abordar fallas relacionadas con la presión, calefacción y desgaste de componentes de manera eficaz.

Palabras clave: SPC, CO<sub>2</sub>, punto crítico, presión, temperatura, hermeticidad, muestras biológicas.

## ABSTRACT

This project develops the design and construction of a manual Critical Point Dryer (CPD), without electronic components, with the aim of offering a low-cost and accessible option. The selected design consists of a 316 stainless steel cylinder with a band heater with a maximum power of 100 [W]. Valves, a pressure gauge and a thermometer were used, and all their threads were standardized to NPT ½ in stainless steel. To ensure safety, a minimum thickness of 17.5 mm was calculated for the equipment to avoid possible structural failures.

The design is capable of operating at pressures up to 1070 psi (7.37 MPa) and temperatures up to 31°C, reaching the critical point of CO<sub>2</sub>. The manual provides detailed technical specifications, components, and operational procedures, along with preventive and corrective maintenance guidelines to extend the equipment's life and ensure safe and reliable operation. Emphasis is placed on critical maintenance tasks such as seal inspection, valve checks, and cleaning procedures for the CO<sub>2</sub> flow system. Common troubleshooting steps are also included, ensuring operators can effectively address failures related to pressure, heating, and component wear.

Key words: CPD, CO<sub>2</sub>, critical point, pressure, temperature, sealing, biological samples.

## Tabla de Contenido

Introducción .....	15
Asuntos Contemporáneos: acerca de Eficiencia energética y sostenibilidad aplicada, bioingeniería y conservación de muestras, Potencial integración con IoT e Industria 4.0 ..	18
Declaración del problema y especificación del proyecto .....	20
LISTA DE REQUERIMIENTOS-ESPECIFICACIONES TÉCNICAS .....	25
Investigación y Diseño .....	27
Desarrollo Técnico y Construcción .....	27
Documentación y Presentación .....	28
Revisión de literatura .....	28
Concepto de diseño y selecciones .....	32
Gestión de proyecto .....	39
Normas y estándares .....	39
Materiales y métodos .....	43
Selección de materiales y componentes .....	43
Plan de manufactura .....	47
Resultados y discusión .....	52
Reporte de Diseño .....	52
Análisis ingenieril .....	54
Simulaciones .....	57
Plan de pruebas de prototipo .....	71
Análisis de riesgos .....	74
Manual de operación y mantenimiento .....	84
Resultados principales y discusión .....	84
Conclusiones .....	96
Trabajos a Futuro .....	97
Referencias .....	100
Anexo A: Ponderaciones criterios ingenieriles .....	103
Anexo B: Calculos principales .....	105
ANEXO C: Manual de operación .....	130
ANEXO D: Manual de mantenimiento .....	151
Anexo E: Plan de manufactura .....	164
Anexo f: Planos .....	172

## Índice de Figuras

Figura 1. Cronograma de Desarrollo del equipo Secador de Punto Crítico.....	27
Figura 2. Secadores de Punto Crítico manual vs automático.....	30
Figura 3. Condiciones de punto crítico para CO <sub>2</sub> .....	31
Figura 4. Cámara concéntrica esquema simplificado. ....	33
Figura 5. Cámara de una pieza.....	33
Figura 6. Cámara diseño vertical. ....	34
Figura 7. Banda Calefactora. ....	36
Figura 8. Intercambiador de calor simple. ....	36
Figura 9. Inducción electromagnética.....	37
Figura 10. Barra de acero inoxidable 316.....	43
Figura 11. Banda calefactora. ....	44
Figura 12. Manómetro. ....	44
Figura 13. Termómetro bimetálico.....	45
Figura 14. Válvulas de aguja.....	45
Figura 15. O-ring. ....	45
Figura 16. Tapa con visor.....	46
Figura 17. Manguera.....	46
Figura 18. Soporte.....	46
Figura 19. Cesta. ....	47
Figura 20. Cronograma con días de duración de cada proceso.....	50
Figura 21. Secador de Punto Crítico completo .....	54
Figura 22. Cuerpo de SPC .....	57
<i>Figura 23. Condiciones de frontera térmicas .....</i>	58
<i>Figura 24. Condiciones de frontera estructural .....</i>	59
<i>Figura 25. Independencia de mallado .....</i>	60
Figura 26. Tamaño de malla 15 mm .....	61
<i>Figura 27. Módulos usados de ANSYS.....</i>	62
<i>Figura 28. Carga de temperatura SPC .....</i>	62
<i>Figura 29. Esfuerzo Von Mises cuerpo SPC .....</i>	63
<i>Figura 30. Detalle de esfuerzo Von Mises cuerpo SPC .....</i>	64
<i>Figura 31. Deformación estructural cuerpo SPC .....</i>	65
<i>Figura 32. Deformación estructural cuerpo SPC (escala 2x).....</i>	65
<i>Figura 33. Deformación estructural zona critica cuerpo SPC.....</i>	66
Figura 34. Factor de seguridad de diseño. ....	68
<i>Figura 35. Amplitud y teoría de fatiga .....</i>	69
<i>Figura 36. Vida a fatiga .....</i>	69
<i>Figura 37. Factor de seguridad a fatiga .....</i>	70
Figura 38. Secador de Punto Crítico dentro de la cámara de contención .....	72
Figura 39. Pruebas con solución jabonosa en juntas roscadas.....	73
Figura 40. Matriz de riesgos .....	75

Figura 41. Alas de Aedes aegypti en 150x.....	85
Figura 42. Alas de Aedes aegypti en 200x.....	86
Figura 43. Alas de Aedes aegypti en 600x.....	86
Figura 44, Alas de Aedes aegypti secadas por calor en 150x. ....	87
Figura 45. Alas de Aedes aegypti secadas por calor en 430x. ....	87
Figura 46. Alas de Aedes aegypti secadas por calor en 600x. ....	87
Figura 47. Secado al aire vs Secado por punto Crítico. ....	88
Figura 48 Pata de Apis mellifera en 50x.....	89
Figura 49 Pata de Apis mellifera en 250x .....	89
Figura 50 Pata de Apis mellifera en 500x .....	90
Figura 51 Pata de Apis mellifera en 50x .....	90
Figura 52 Pata de Apis mellifera en 250x .....	91
Figura 53 Pata de Apis mellifera en 500x .....	91
Figura 54 Pata de Apis mellifera (Secado por punto crítico vs Secado en calor .....	91
Figura 55 Cabeza de Apis mellifera.....	93
Figura 56 Probóscide de Apis mellifera.....	93
Figura 57 Ojo de Apis meliffera .....	93
Figura 58 Cabeza de Apis meliffera.....	94
Figura 59 Probóscide de Apis meliffera.....	94
Figura 60 Ojo de Apis meliffera .....	94
Figura 61 Ojos de Apis meliffera secado en calor vs secado en punto crítico.....	95
Figura 62. Valvula de alivio.....	98
Figura 63. Parámetros para el factor de superficie. ....	123
Figura 64. Ecuaciones para calcular kb. ....	124
Figura 65. Valores de Kc.....	124
Figura 66. Porcentajes de confiabilidad.....	125
Figura 67. Plano de conjunto SPC .....	137
Figura 68. Limpieza de SPC .....	139
Figura 69. Conexiones eléctricas .....	139
Figura 70. Acople del calentador .....	139
Figura 71. Colocación de la carcasa .....	139
Figura 72. Acople de instrumentos .....	140
Figura 73. Instalación de tapón de seguridad.....	140
Figura 74. Acople de la ventana.....	140
Figura 75. Inserción del portamuestras .....	141
Figura 76. Acople de O-ring .....	141
Figura 77. Colocación de la tapa.....	141
Figura 78. Armado del SPC .....	142
Figura 79. Conexión con tanque de CO2 .....	142
Figura 80. Cápsulas de Petri .....	143
Figura 81. Deshidratación de muestras .....	143
Figura 82. Concentraciones de alcohol.....	143
Figura 83. Concentraciones de alcohol.....	143
Figura 84. Finalización de la preparación de muestras.....	144
Figura 85. Posicionamiento en los gaskets .....	144

Figura 86. Cuerpo .....	154
Figura 87. Tapa con O-ring .....	154
Figura 88. Ventana .....	154
Figura 89. Chaqueta térmica .....	154
Figura 90. Manómetro .....	155
Figura 91. Termómetro .....	155
Figura 92. Base de Soporte .....	155
Figura 93. Portamuestras .....	155
Figura 94. Mangueras de CO <sub>2</sub> .....	155
Figura 95. Válvulas de control .....	155
Figura 96. Tapón de seguridad .....	156

## Índice de Tablas

Tabla 1. Matriz de ponderación alternativas del SPC.....	35
Tabla 2. Matriz de ponderación alternativas del calentador.....	38
Tabla 3. Presupuesto.....	39
Tabla 4. Selección de materiales y componentes.....	43
Tabla 5. Listado de componentes.....	48
Tabla 6. Cronograma de fabricación.....	49
Tabla 7. Tolerancias y dimensionamiento.....	51
Tabla 8. Análisis de independencia de mallado.....	60
Tabla 9. Análisis presión vs deformación .....	66
Tabla 10. Efecto presión vs deformación.....	67
Tabla 11. Criterios de desempeño .....	73
Tabla 12. Matriz de riesgos.....	75
Tabla 13. Descripción de riesgo 1 .....	78
Tabla 14. Descripción de riesgo 2 .....	78
Tabla 15. Descripción de riesgo 3 .....	79
Tabla 16. Descripción de riesgo 4 .....	79
Tabla 17. Descripción de riesgo 5 .....	80
Tabla 18. Descripción de riesgo 6 .....	80
Tabla 19. Descripción de riesgo 7 .....	81
Tabla 20. Descripción de riesgo 8 .....	81
Tabla 21. Descripción de riesgo 9 .....	82
Tabla 22. Descripción de riesgo 10.....	82
Tabla 23. Descripción de riesgo 11 .....	83
Tabla 24. Descripción de riesgo 12 .....	83
Tabla 25. Posibles diseños SPC .....	103
Tabla 26. Sistemas de calentamiento para el SPC .....	104
Tabla 27. Instrumentos y sensores .....	136
Tabla 28. Lista de partes SPC .....	138
Tabla 29. Medidas de seguridad al operar la maquina.....	147
Tabla 30. Precauciones ante posibles riesgos.....	148
Tabla 31. Tabla de contactos.....	151
Tabla 32. Diagrama de partes.....	156
Tabla 33. Tareas y frecuencias de mantenimiento .....	158
Tabla 34. Ejemplo de registro de mantenimiento .....	162

## Introducción

El secador en punto crítico (SPC, Critical Point Dryer, CPD por sus siglas en inglés) es un procedimiento ampliamente utilizado en microscopía electrónica de barrido (SEM) para la preservación estructural de muestras biológicas y materiales porosos. Este método se fundamenta en la eliminación de tensiones superficiales mediante la transición de fase de un fluido supercrítico, evitando el colapso estructural de las muestras durante el proceso de secado (Goldstein et al., 2003). Sin embargo, el alto costo de los equipos comerciales de SPC limita su accesibilidad en laboratorios con recursos restringidos, lo que resalta la necesidad de desarrollar alternativas más asequibles y funcionales.

Este proyecto tiene como objetivo el diseño, fabricación y evaluación de un prototipo de máquina SPC que permita un acceso más amplio a esta tecnología sin comprometer su eficiencia. Para ello, se considera el uso de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) como fluido supercrítico, dado su bajo costo, seguridad y eficacia en el reemplazo de solventes intermedios como el etanol (Anderson, 1951). Este tipo de equipos permiten una amplia gama de estudios a nivel profesional, por lo que su aplicabilidad es fundamental en laboratorios que requieren visualizar muestras microscópicas. El secado en punto crítico es ampliamente utilizado en microscopía electrónica debido a su capacidad para minimizar la distorsión causada por la tensión superficial del agua (Bray, 2008).

El secado en punto crítico (SPC) ha sido ampliamente estudiado y aplicado en diversas áreas científicas, particularmente en la microscopía electrónica de barrido (SEM). Desde sus primeras aplicaciones en la preservación de muestras biológicas, se ha demostrado que este método permite mantener la estructura tridimensional de materiales porosos sin colapsar, lo cual es esencial para el análisis preciso de su morfología. Universidad Simón Bolívar. (2012). En estudios sobre el comportamiento de polímeros, se ha observado que el SPC convierte

hidrogeles en aerogeles, destacando su efectividad en la conservación de estructuras de malla con poros interconectados, lo que mejora su capacidad de absorción de líquidos. Sánchez Borja, S. V. (2020). Además, en el ámbito microbiológico, se ha empleado para la observación de polímeros extracelulares y estructuras superficiales en bacterias encapsuladas, permitiendo visualizar detalles morfológicos sin los artefactos que suelen introducir otros métodos de deshidratación. Cagle, G. D. (1974). Estas aplicaciones demuestran la versatilidad del SPC en el estudio de materiales sensibles y su potencial para la optimización de procesos de conservación estructural en diversas disciplinas.

El diseño propuesto contará con una cámara de presión cilíndrica construida en acero inoxidable 316, material seleccionado por su alta resistencia mecánica y excelente comportamiento ante la corrosión, garantizando su durabilidad en condiciones de alta presión y temperatura. La cámara tendrá un diámetro exterior de 10,5 cm (4,13 pulgadas), un espesor de pared de 1,75 cm y una longitud de 15 cm. El sistema será capaz de operar a presiones de hasta 1070 psi (68.9 bar) y temperaturas de 31 °C, asegurando condiciones óptimas para el proceso de secado sin comprometer la integridad estructural de las muestras tratadas.

Para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente, el equipo integrará un sistema de control de temperatura y presión, con sensores que permitirán monitorear las condiciones internas en tiempo real. El uso de CO<sub>2</sub> en sistemas de secado ofrece ventajas en términos de eficiencia energética y reducción del impacto ambiental en comparación con refrigerantes convencionales (Wang et al., 2024). El calentamiento de la cámara se logrará mediante un cinturón calefactor, el cual proporcionará un incremento de temperatura uniforme y controlado, asegurando que el CO<sub>2</sub> alcance el estado supercrítico sin fluctuaciones bruscas. Además, se emplearán *O-rings* de alto rendimiento como sellos herméticos, minimizando el riesgo de fugas y manteniendo la estabilidad del sistema.

Desde el punto de vista de la seguridad operativa, el equipo contará con un diseño robusto que incluirá una válvula de alivio para despresurización controlada, reduciendo riesgos asociados a la manipulación del sistema. Asimismo, la ergonomía ha sido considerada en el diseño, optimizando la disposición de válvulas, manómetros y controles para facilitar su operación manual y mejorar la experiencia del usuario.

La relevancia de este proyecto radica en su impacto en la investigación científica y tecnológica. La disponibilidad de una máquina SPC accesible beneficiaría áreas como la biología, nanotecnología y microfabricación, donde la preservación morfológica de muestras es fundamental para el análisis estructural (Leica, 2020). Además, su implementación permitirá una mejor comprensión de los principios termodinámicos involucrados en la transición de fase de fluidos supercríticos, promoviendo el desarrollo de futuras innovaciones en el campo. El secado en punto crítico con CO<sub>2</sub> permite preservar la morfología de materiales porosos, evitando el colapso estructural observado en otros métodos de secado (Kang et al., 2018).

En el contexto actual de la ingeniería, la búsqueda de soluciones prácticas, sostenibles y accesibles es fundamental. El desarrollo de un Secador por Punto Crítico (SPC) completamente mecánico, que utiliza CO<sub>2</sub> comprado y se calienta mediante una chaqueta térmica eléctrica, representa una respuesta innovadora a las necesidades de laboratorios con recursos limitados. Esta técnica ha sido fundamental desde mediados del siglo XX para preservar la estructura tridimensional de tejidos biológicos sin los artefactos producidos por el secado convencional (Anderson, 1951; Boyde & Tamarin, 1984). El SPC sigue siendo vital en la preparación de muestras para microscopía electrónica, como lo destacan autores como Bray (2008) y Goldstein et al. (2003).

## **Asuntos Contemporáneos: acerca de Eficiencia energética y sostenibilidad aplicada, bioingeniería y conservación de muestras, Potencial integración con IoT e Industria 4.0**

La eficiencia energética es un pilar clave en el diseño de sistemas de laboratorio contemporáneos. En el caso del secador por punto crítico (SPC) desarrollado, aunque no emplea fuentes renovables, se utiliza una chaqueta térmica eléctrica regulada por un termostato analógico, lo que permite un control preciso de la temperatura. Esta configuración optimiza el proceso de calentamiento del CO<sub>2</sub>, evitando sobrecalentamientos y reduciendo el consumo energético por ciclo operativo. Mishra et al. (2023) destacan que el control térmico mejora significativamente la eficiencia en sistemas de secado mediante el monitoreo continuo de variables críticas.

Al tratarse de un sistema completamente mecánico, su diseño favorece la reutilización de componentes y reduce la dependencia de automatismos electrónicos, disminuyendo así tanto la generación de residuos tecnológicos como los costos de mantenimiento. Esto está alineado con los principios de ingeniería apropiada, que promueven soluciones funcionales, duraderas y replicables en contextos de bajos recursos (Chirino et al., 2000).

Así mismo, la estructura modular del equipo permite la integración de materiales aislantes que evitan pérdidas térmicas, incrementando la eficiencia del sistema. Canto et al. (2018) resaltan que el uso de recubrimientos térmicos adecuados puede reducir significativamente el tiempo y la energía necesarios para alcanzar temperaturas objetivo. Finalmente, el uso de CO<sub>2</sub> comercial, en lugar de solventes orgánicos, representa una alternativa más segura y menos contaminante, lo que aporta un valor añadido en términos de sostenibilidad ambiental (Eleftherios et al., 2008).

El SPC es ampliamente utilizado en bioingeniería para la preparación de muestras biológicas que requieren análisis morfológico detallado mediante microscopía electrónica de

barrido (MEB). Una de las ventajas principales de este método es que permite eliminar los líquidos sin generar tensiones superficiales que puedan dañar la estructura tridimensional del tejido (Bray, 2008; Anderson, 1951). Esto es particularmente relevante para el estudio de tejidos blandos o muestras frágiles cuya morfología se vería distorsionada con otros métodos de secado.

Investigaciones como las de Eleftherios et al. (2008) han demostrado que el uso de CO<sub>2</sub> supercrítico es efectivo para preservar compuestos complejos como los andamiajes de colágeno-hidroxiapatita, esenciales en la ingeniería de tejidos. Por otro lado, el uso del SPC también ha sido reportado en el campo de la microbiología, como una técnica para observar la matriz extracelular bacteriana, permitiendo identificar estructuras de polisacáridos extracelulares con gran detalle (Cagle, 1974).

En este caso, el uso de un SPC mecánico permite realizar estos estudios con un dispositivo de bajo costo, facilitando el acceso a estas técnicas en universidades o laboratorios con presupuestos limitados. La flexibilidad del sistema también permite adaptar el tamaño de la cámara y los tiempos de exposición a distintos tipos de muestras, aumentando su aplicabilidad.

A pesar de que el sistema actual funciona completamente de forma manual, su diseño no está siendo con la posibilidad de incorporar tecnologías emergentes. De hecho, la tendencia hacia la automatización de procesos experimentales y el monitoreo remoto abre la posibilidad de integrar sensores IoT al SPC. Estos sensores podrían recoger datos sobre temperatura, presión, y tiempo de exposición, que posteriormente serían analizados para optimizar el secado (Mishra et al., 2023).

Javaid et al. (2021) destacan que el IoT es una herramienta clave para la adopción de Industria 4.0, facilitando la comunicación entre dispositivos y la toma de decisiones en tiempo

real. En este contexto, el SPC podría conectarse a una red local o a una aplicación móvil, desde la cual se controle remotamente el proceso o se programen alarmas de seguridad. Además, con el registro continuo de los datos operativos, sería posible aplicar mantenimiento predictivo, anticipando fallos antes de que ocurran (Salih et al., 2022). La integración del SPC con IoT e Industria 4.0 no solo mejoraría su funcionalidad, sino que también aumentaría su valor pedagógico y su aplicabilidad en contextos industriales o de investigación avanzada.

El diseño adecuado del secador de punto crítico desde un enfoque mecánico representa una solución pertinente para la preparación de muestras biológicas en entornos con recursos limitados. Su relevancia es evidente al relacionarse con los principios de sostenibilidad, bioingeniería y accesibilidad. Además, su estructura permite futuras adaptaciones con tecnologías emergentes como IoT, lo cual proyecta su utilidad hacia un escenario moderno y automatizado.

Este documento abordará el marco teórico relacionado con el secado en punto crítico, los principios de diseño y fabricación del prototipo, así como los resultados obtenidos en pruebas experimentales. A través de este estudio, se espera validar la viabilidad de una solución de bajo costo y alto rendimiento, contribuyendo al fortalecimiento de la capacidad investigativa en laboratorios con recursos limitados.

### **Declaración del problema y especificación del proyecto**

Se busca crear una cámara de secado en punto crítico en el cual se aplica diferentes criterios ingenieriles.

### **Resistencia de materiales**

La cámara de presión es el componente más importante. Está debe llegar a una presión de 1070 Psi (7,37 MPa), por lo cual el material seleccionado debe tener una buena resistencia

mecánica, que pueda soportar una presión mínima de 1500 psi, con la cual se pueda tener un margen de seguridad. De igual manera, esta debe tener un buen comportamiento ante la corrosión, ya que, en su funcionamiento, estará expuesto a líquido. Para que la cámara, pueda soportar esta presión, es necesario calcular el diámetro exterior e interior, y seleccionar un material ideal para su diseño. Con los requerimientos que son necesarios, la mejor opción con respecto al material es el acero inoxidable 316 (Chirino, Escobar, Camps & García, 2000).

### **Ingeniería térmica**

Se debe implementar un calentador capaz de elevar la temperatura del CO<sub>2</sub> en la cámara. El líquido debe llegar a una temperatura de aproximadamente 31 grados centígrados para que pueda llegar al punto crítico. Para esto es importante tomar en consideración puntos como la transferencia de calor, por lo cual el material debe poseer una buena conductividad térmica, que es el caso del acero inoxidable. De igual manera, es importante seleccionar un calentador que alcance temperaturas de al menos 50 grados centígrados y que esté pueda ser controlada fácilmente para tener un mejor manejo de la cámara. En este caso, existen opciones como intercambiadores de calor, bandas térmicas o resistencias.

### **Ergonomía**

El diseño de un SPC no solo debe cumplir con los requisitos técnicos de presión y temperatura, sino también considerar la comodidad y seguridad del usuario. En este caso, dado que el sistema es mecánico y manual, es crucial que su operación sea intuitiva y no genere esfuerzos innecesarios. Se deben colocar las válvulas, manómetros y controles en posiciones estratégicas, asegurando que el operador pueda acceder a ellos sin dificultad ni posturas incómodas.

Además, el tamaño debe optimizarse para que el equipo sea compacto y funcional sin comprometer la accesibilidad. Un diseño ergonómico reduce el riesgo de errores operativos y

minimiza la fatiga del usuario, permitiendo una manipulación más eficiente del SPC. También es importante incorporar mecanismos que faciliten la apertura y cierre de la cámara sin requerir demasiada fuerza.

### **Manejo de especímenes/materiales frágiles y/o delicados**

El objetivo principal de un SPC es eliminar líquidos sin causar daños estructurales a materiales frágiles o de manejo delicado, como muestras biológicas o microestructuras. Por ello, el diseño debe priorizar un manejo cuidadoso de los especímenes, evitando impactos, vibraciones o cambios bruscos de presión y temperatura. Un control preciso del flujo de CO<sub>2</sub> es esencial para que la transición del líquido al gas se realice de manera uniforme, sin generar fuerzas capilares que puedan deformar las muestras.

Así mismo, la carga y descarga de los especímenes debe realizarse de forma segura. Se recomienda utilizar bandejas o soportes diseñados específicamente para minimizar el contacto con superficies duras y reducir el riesgo de daños. También es fundamental que los materiales internos de la cámara sean químicamente inertes, asegurando que no haya reacciones que puedan afectar la integridad de los especímenes.

En resumen, el diseño del SPC no solo debe cumplir con las condiciones operativas requeridas, sino que también debe garantizar que las muestras se manipulen de manera segura y efectiva, preservando su estructura y evitando cualquier tipo de deterioro durante el proceso de secado.

### **Seguridad de operación**

La seguridad es fundamental cuando el equipo esté en funcionamiento. El apartado principal, es su diseño. La cámara debe ser construida de acero inoxidable y tener un factor de seguridad de al menos 1,5. Por otro lado, para controlar la temperatura y la presión a la que estará expuesta, se debe colocar un manómetro y un medidor de la temperatura para poder

controlar que el interior este en los niveles indicados. Otro punto importante es que el sistema sea totalmente hermético.

En cuanto a los procedimientos operativos, se deben seguir protocolos estrictos para así garantizar la seguridad. Ya que el sistema puede ser peligroso cuando se analice una muestra, se debe colocar una válvula de alivio de presión para cuando el procedimiento sea acabado y así poder despresurizar la cámara.

### **Mantenimiento**

El mantenimiento del SPC es fundamental para una operación segura y eficiente que el equipo tenga un buen funcionamiento y que no existan posibles fallos. Dado que este sistema trabaja con presión alta, será necesario establecer un plan de mantenimiento en el cual se priorice la visualización de la cámara de presión, revisión de válvulas, incluyendo limpieza de todos los componentes. Este mantenimiento es preventivo, por lo cual servirá para evitar fugas, desgaste de materiales y así que el equipo no se dañe.

### **Resistencia a la corrosión**

Dado que el SPC debe operar con CO<sub>2</sub> líquido a alta presión, la selección de materiales resistentes a la corrosión es fundamental para garantizar la durabilidad del equipo y como se va a trabajar con muestras biológicas para precautelar la integridad de la muestra. Los materiales que se usaría son en su mayoría acero inoxidable 304 o 316 debido a su excelente resistencia a la corrosión. Además, se utilizarán uniones de PTFE (teflón) para minimizar el deterioro causado por presión o temperatura, teniendo un sellado hermético y eficiente una mayor vida útil.

### **Costo**

La construcción de un SPC requiere un análisis detallado de costos, considerando: Materiales, fabricación y ensamblaje. Lo que se busca con el SPC es una solución económica

y eficiente para la preparación de muestras orgánicas usadas en el microscopio electrónico de barrido. Los equipos en el mercado tienen un precio entre \$5000 y \$15000, dependiendo el modelo y sus componentes. Por lo cual nuestro objetivo es optimizar esta tecnología realizando un diseño manual, funcional y estéticamente agradable, teniendo un sistema confiable a un costo más accesible.

### **Reproducibilidad de resultados**

Para garantizar la repetibilidad de resultados y asegurar un sistema funcional es necesario incorporar:

Control preciso de parámetros: Como presión, temperatura, flujo de CO<sub>2</sub> y tiempo, para lograrlo se tendrá instrucciones específicas sobre el uso de los componentes que controlan estos parámetros en el sistema, permitiendo obtener un óptimo secado de muestras orgánicas.

Manual de uso: Se detallarán instrucciones claras sobre la forma de procesamiento de muestras orgánicas, asegurando que cualquiera pueda operar el equipo de manera correcta.

### **Definición del problema**

En múltiples campos científicos, como la biología, ciencia de materiales y nanotecnología, es imprescindible que se desarrollen técnicas de estudio en las cuales se preserve la integridad estructural de cualquier tipo de muestras delicadas cuando se desea llevar a cabo un proceso de secado. Los métodos tradicionales existentes para el secado de muestras pueden incluir tensiones superficiales que provocan deformaciones o daños en la estructura microscópica de la muestra. Para poder abordar este desafío, se propone la construcción de un dispositivo de secado por punto crítico (SPC), diseñada para eliminar los líquidos de las muestras en condiciones específicas donde no existe distinción entre las fases líquida y gaseosa, minimizando así las fuerzas de tensión superficial y preservando la estructura original de las muestras. (Rizwan. et al, 2021). Cabe recalcar que dentro del mercado existen opciones de

compra para adquirir este tipo de equipo, sin embargo, su elevado precio puede ser un impedimento para instituciones o investigadores que requieran de un dispositivo más accesible para poder tratar muestras y poder analizarlas sin que sufran daños en su estructura. (Eleftherios et al, 2008).

La preservación de las estructuras orgánicas durante el proceso de secado es esencial para poder obtener resultados precisos y reproducibles en investigaciones científicas, en este caso para que puedan ser observadas con la ayuda del microscopio de barrido de electrones. En la preparación de muestras para microscopía electrónica de barrido (SEM), el secado por punto crítico es una técnica estándar para evitar artefactos causados por la tensión superficial. Además, en la ciencia de materiales, el secado por punto crítico es crucial para lograr mantener la porosidad y la estructura de materiales como aerogeles. (Bray, 2008).

La implementación de una máquina de SPC diseñada y manufacturada localmente ofrece múltiples beneficios para estudios de tipo biomédico, microbiológico y demás ciencias que requieren el estudio de las estructuras microscópicas de diversas muestras. La producción local puede reducir significativamente los costos en comparación con la adquisición externa de un equipo de estas características, facilitándose el acceso a laboratorios o estudios de presupuestos limitados. (Boyde and Tamarin, 1984). Además, diseñar el equipo desde cero permite la posibilidad de personalizar múltiples características del dispositivo para poder satisfacer requisitos particulares de investigación.

## **LISTA DE REQUERIMIENTOS-ESPECIFICACIONES TÉCNICAS**

Requerimientos específicos del diseño.

### **Requerimientos funcionales**

- Garantizar el secado de muestras orgánicas sin causar daños estructurales provocados de tensiones superficiales o efectos de capilaridad
- Controlar el dióxido de carbono hasta alcanzar el punto crítico, permitiendo la penetración en las estructuras internas de las muestras
- Implementar un sistema para controlar en tiempo real con precisión la temperatura y la presión durante el proceso

### **Requerimiento Técnicos**

- La cámara debe ser capaz de soportar una presión de 1070psi considerando adicional un factor de seguridad para garantizar la integridad del sistema y la seguridad
- Regular la temperatura del CO<sub>2</sub> dentro de la cámara que está entre -22 a 31 grados Celsius de manera eficiente, utilizando un sistema de calefacción optimo que permita alcanzar los valores requeridos en el menor tiempo posible
- Se requiere un rango de temperatura en donde su precisión sea ± 1 °C
- Los materiales empleados deben ser de acero inoxidable, asegurando la seguridad e higiene necesarias para las muestras orgánicas
- El volumen de la cámara será un aproximado de 12,57in<sup>3</sup>, con un diámetro de ventana de 2in para cumplir los requisitos del diseño
- Permitir procesar varias muestras a la vez

### **Restricciones**

- Realizar pruebas de seguridad hidrostáticas para garantizar la resistencia y fiabilidad del sistema en las condiciones que va a operar
- Diseño estético y funcional que se integre al laboratorio en el que va a ser utilizado
- Incorporación de dispositivos de seguridad, como válvulas de alivio para prevenir sobrepresiones y proteger al usuario que usara el equipo

## CRONOGRAMA (Diagrama de Gantt)

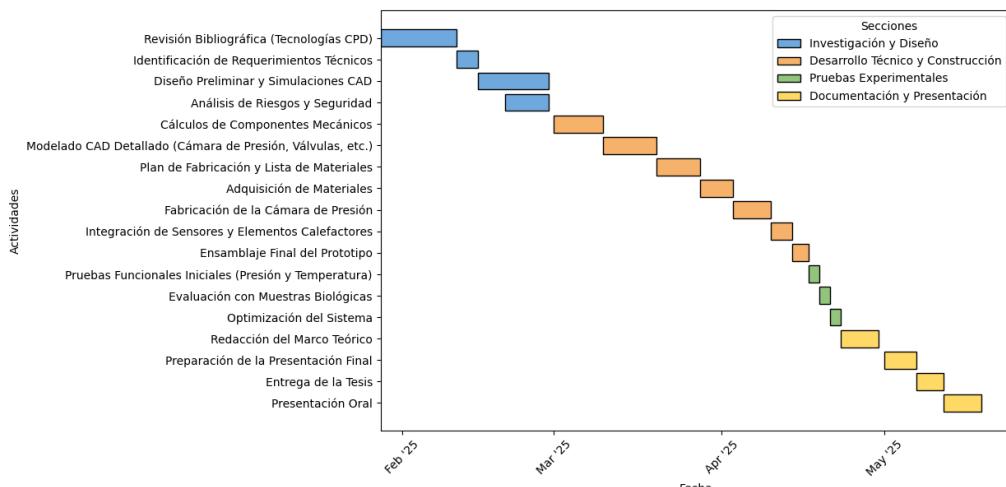


Figura 1. Cronograma de Desarrollo del equipo Secador de Punto Crítico.

### Investigación y Diseño

- Revisión Bibliográfica (Tecnologías SPC): 2025-01-28 a 2025-02-11
- Identificación de Requerimientos Técnicos: 2025-02-11 a 2025-02-15
- Diseño Preliminar y Simulaciones CAD: 2025-02-15 a 2025-02-28
- Análisis de Riesgos y Seguridad: 2025-02-20 a 2025-02-28

### Desarrollo Técnico y Construcción

- Cálculos de Componentes Mecánicos: 2025-03-01 a 2025-03-10
- Modelado CAD Detallado (Cámara de Presión, Válvulas, etc.): 2025-03-10 a 2025-03-20
- Plan de Fabricación y Lista de Materiales: 2025-03-20 a 2025-03-28
- Adquisición de Materiales: 2025-03-28 a 2025-04-03
- Fabricación de la Cámara de Presión: 2025-04-03 a 2025-04-10
- Integración de Sensores y Elementos Calefactores: 2025-04-10 a 2025-04-14
- Ensamblaje Final del Prototipo: 2025-04-14 a 2025-04-17

- Pruebas Experimentales
- Pruebas Funcionales Iniciales (Presión y Temperatura) y producción de muestras:  
2025-04-17 a 2025-04-19
- Evaluación con Muestras Biológicas: 2025-04-19 a 2025-04-21
- Optimización del Sistema: 2025-04-21 a 2025-04-23

## **Documentación y Presentación**

- Redacción del Marco Teórico: 2025-04-23 a 2025-04-30
- Preparación de la Presentación Final: 2025-05-01 a 2025-05-07
- Entrega de la Tesis: 2025-05-07 a 2025-05-12
- Presentación Oral: 2025-05-12 a 2025-05-19

## **Revisión de literatura**

Para comprender de manera adecuada el funcionamiento y aplicabilidad de los sistemas Secadores de Punto Crítico o SPC, es necesario conocer los aspectos fundamentales que rodean a estos equipos. Un dispositivo Secador de Punto Crítico es una máquina diseñada para secar muestras o materiales sin causar colapsos estructurales debido a la tensión superficial que se acumula debido a líquidos remanentes. Los SPC se utilizan principalmente en la preparación de muestras biológicas para microscopía electrónica de barrido por sus siglas (SEM) y en el tratamiento de materiales porosos como aero geles (Bray, 2008). Estos dispositivos funcionan a partir del reemplazo del agua de la muestra con un solvente intermedio (etanol o acetona), el cual es posteriormente sustituido por CO<sub>2</sub> líquido. Luego el sistema incrementa la temperatura y la presión hasta al alcanzar el punto crítico del CO<sub>2</sub>, permitiendo que este pase directamente a la fase gaseosa sin la necesidad de generar fuerzas de tensión superficial sobre las muestras dentro del SPC. (Bray, 2008). Kang et al. (2018) describen el SPC como una técnica esencial

en la preparación de muestras para microscopía electrónica de barrido (SEM), ya que permite mantener la integridad estructural del material analizado.

Los secadores en punto crítico (SPC) se clasifican según su diseño y aplicación. Los SPC de laboratorio se emplean en microscopía electrónica para la preparación de muestras biológicas y materiales porosos (Bray, 2008). Los SPC industriales se utilizan en la fabricación de aerogeles y biomateriales, donde la estabilidad estructural es esencial (Wang et al., 2025). Por otro lado, los sistemas de secado con CO<sub>2</sub> optimizan el consumo energético en la industria alimentaria y la biomasa (Wang et al., 2025). Finalmente, los SPC con control subcrítico permiten secar muestras en condiciones controladas de temperatura y presión, reduciendo el consumo de energía. Además, existen SPC automáticos y manuales, dependiendo del nivel de control requerido en el proceso. Mientras los sistemas automáticos optimizan parámetros de presión y temperatura de forma precisa, los manuales permiten ajustes personalizados según la aplicación (Klemm et al., 2022). Prin et al. (2012) mencionan que la existencia de diversos métodos de secado para preservar estructuras en geles y biomateriales, destacando la ventaja del secado en punto crítico para evitar la deformación estructural, en dispositivos manuales o automáticos.

Los dispositivos manuales y automáticos se diferencian principalmente en el nivel de control y precisión del proceso. Los SPC manuales requieren ajustes directos por parte del operador, lo que permite mayor flexibilidad en experimentos personalizados, pero con mayor riesgo de error humano. En contraste, los SPC automáticos optimizan parámetros de presión y temperatura de manera programada, asegurando mayor reproducibilidad y eficiencia energética. Mientras los manuales son preferidos en aplicaciones de investigación y bajo presupuesto, los automáticos son ideales para procesos industriales que requieren alta precisión y control estricto.



Figura 2. Secadores de Punto Crítico manual vs automático.

En este sentido, es preciso mencionar que el punto crítico de alguna sustancia es el estado termodinámico en el cual la fase líquida y la fase gaseosa se vuelven indistinguibles debido a que sus densidades se igualan. En el caso del dióxido de carbono, su punto crítico se encuentra en una temperatura de 31 °C y a una presión de 72,9 atm o aproximadamente 1070 psi (Bray, 2008). Este fenómeno permite utilizar el dióxido de carbono como un medio eficiente en procesos de secado de punto crítico, ya que permite la eliminación de líquidos sin efectos adversos de la tensión en las muestras. Kang et al. (2018) explican que el CO<sub>2</sub> en estado supercrítico se utiliza en el secado en punto crítico porque elimina la tensión superficial y previene el colapso de estructuras porosas, permitiendo la preservación de la morfología del material tratado. El CO<sub>2</sub> ha sido ampliamente estudiado como un refrigerante natural, debido a su bajo impacto ambiental y sus propiedades termodinámicas favorables en ciclos de calor y secado (Wang et al., 2025). Además, su uso en procesos subcríticos y supercríticos permite controlar el secado de materiales sin degradación estructural (Sánchez, 2020).

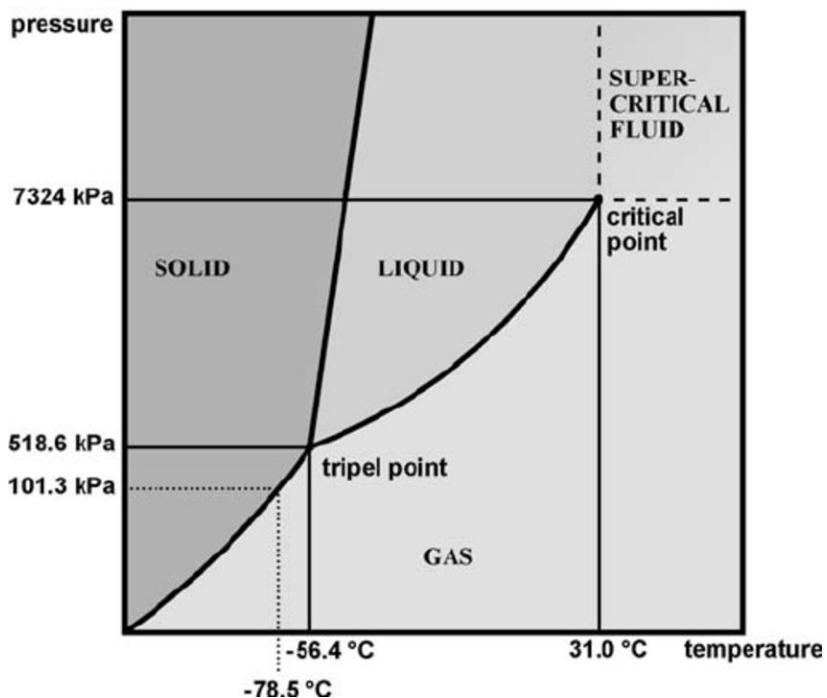


Figura 3. Condiciones de punto crítico para CO<sub>2</sub>.

Todo el proceso que ocurre en el secado en punto crítico (SPC) está basado en la eliminación de líquidos mediante una transición de fase de líquido a gas sin pasar por el estado líquido, es decir que se requieren bases de fundamentos termodinámicos para poder comprender este tipo de máquinas (Bray, 2008). Los principios termodinámicos clave incluyen la expansión y evaporación simultánea, donde el aumento de temperatura y presión proporciona suficiente energía cinética para la evaporación sin comprometer la estructura del material (Bray, 2008). Además, el uso de CO<sub>2</sub> en condiciones transcríticas ha demostrado mejorar la eficiencia del secado en comparación con métodos convencionales (Wang et al., 2025). Estudios recientes sobre biomasa pretratada han evidenciado que el CPD permite preservar la estructura interna de los materiales sin los efectos negativos de la deshidratación (Wang et al., 2025). Asimismo, la aplicación de modelos exergéticos avanzados en CPD permite optimizar las condiciones operativas para maximizar la eficiencia del proceso. Cagle (1974) menciona que el método de secado en punto crítico con CO<sub>2</sub> es una técnica efectiva

para preservar estructuras biológicas sin deformaciones, debido a la eliminación de la tensión superficial en el proceso de deshidratación.

Los avances recientes en secado en punto crítico (SPC) han mejorado su eficiencia y aplicabilidad en diversas industrias. La automatización del proceso mediante sistemas de control avanzados permite optimizar la temperatura y la presión, asegurando una mayor precisión y reduciendo la intervención manual (Wang et al., 2025). Además, el uso de CO<sub>2</sub> transcrítico ha demostrado ser una alternativa eficiente en aplicaciones industriales, disminuyendo el consumo de recursos y mejorando la eficiencia energética. Por otro lado, las nuevas técnicas de secado para biomasa han logrado preservar mejor la estructura celular y minimizar la pérdida de compuestos volátiles, lo que amplía su potencial en el procesamiento de materiales sensibles (Kang et al., 2018). El uso de SPC ha sido clave en la conservación de estructuras tridimensionales en materiales porosos y biológicos, lo que lo hace indispensable en el análisis por microscopía electrónica de barrido y en la fabricación de biomateriales avanzados (Anderson, 1951).

### **Concepto de diseño y selecciones**

El método de ponderación de alternativas ayuda a la toma de decisiones cruciales en problemas específicos al comparar las soluciones propuestas mediante criterios clave definidos por los involucrados, en donde se tiene que considerar aspectos técnicos, económicos y funcionales. La aplicación del método consiste en una matriz de evaluación, en la cual cada criterio recibe un peso según la importancia para luego calificarlas con las soluciones disponibles, facilitando la selección de la mejor opción según la necesidad que se tenga y evitando posibles sesgos.

### **Problema 1: Posibles diseños del SPC**

Soluciones propuestas:

a) Diseño de cilindros concéntricos



Figura 4. Cámara concéntrica esquema simplificado.

Consiste en dos tubos concéntricos en donde en el centro se ubicaría la cámara de secado y entre ambos tubos el sistema de calentamiento.

b) Diseño cilindro pieza única



Figura 5. Cámara de una pieza.

Se maquina el sistema de modo que la cámara y el sistema de calentamiento puedan ubicarse en una pieza única, al cual se le adicionaría una chapa metálica para mejorar la estética del sistema

c) Diseño cilindro vertical



### Figura 6. Cámara diseño vertical.

Consiste en el diseño de un secador de punto crítico de manera vertical, en donde el manómetro y termómetro se ubicarían en la parte superior, las válvulas en los laterales y el calentamiento se daría desde la zona inferior con una resistencia.

### Criterios Ingenieriles

#### 1) Costo de fabricación

Es fundamental tener en cuenta los materiales y procesos de manufactura para un diseño eficiente y viable, sin generar costos innecesarios.

#### 2) Facilidad de manufactura

Buscar una fabricación sencilla, con máquinas comunes, evitando geometrías complejas o procesos de ensamblaje costosos o muy complicados. Se debe tener en cuenta materiales y métodos que faciliten el mecanizado.

#### 3) Estética

Un diseño agradable y con una buena forma mejora la percepción de la calidad del equipo. Por lo que es fundamental lograr obtener una apariencia armoniosa.

#### 4) Fácil manejo del sistema

El diseño debe priorizar un fácil manejo, facilitando su uso. Se debe ubicar los componentes de manera ergonómica y con buena disposición.

## Conclusiones

*Tabla 1. Matriz de ponderación alternativas del SPC.*

Criterio	Ponderado del criterio 1	Poder ado calificación criterio 1: costo de fabricación	Produ cto	Ponde rado del criteri o 2	Poder ado calific ación criteri o 2: facilid ad de manu factura	Produ cto	Ponde rado del criteri o 3	Poder ado calific ación criteri o 3: estétic a	Produ cto	Ponde rado del criteri o 4	Poder ado calific ación criteri o 4: fácil manejo del sistem a	Produ cto	Suma de los produ ctos	Prioridad
Solución a	0,3	0,33	0,100	0,4	0,33	0,133	0,2	0,29	0,057	0,1	0,17	0,017	0,31	2
Solución b	0,3	0,50	0,150	0,4	0,50	0,200	0,2	0,29	0,057	0,1	0,33	0,033	0,44	1
Solución c	0,3	0,17	0,050	0,4	0,17	0,067	0,2	0,43	0,086	0,1	0,50	0,050	0,25	3

El resultado obtenido de la matriz de ponderación de criterios ingenieriles se determinó que la solución B es la mejor alternativa que se tiene. Esta opción consiste en un diseño único de cilindro al cual se le va a maquinar como una sola pieza para obtener la cámara del SPC. Al evaluarla con los demás criterios antes expuestos de costo de fabricación, facilidad de manufactura, estética y fácil manejo del sistema, se destacó con el mejor resultado debido a que es la solución que es la solución que se acomoda mejor a los criterios principales. Se pueden observar las tablas de ponderación en el anexo A.

### Problema 2: Sistema de calentamiento para maquina SPC

Para llegar al punto crítico del CO<sub>2</sub>, el SPC tiene que integrar un sistema de calentamiento que permita elevar la temperatura de la cámara de manera controlada y progresiva. El sistema debe adaptarse al diseño propuesto, garantizando una armonía con el mismo sin afectar su funcionalidad.

## Soluciones propuestas

- 1) Banda calefactora:



Figura 7. Banda Calefactora.

Sistema de calentamiento muy eficiente que permite una distribución uniforme del calor. Se instala alrededor del cilindro que se necesite calentar, y se fija mediante tensores, para una correcta sujeción y contacto. Una vez conectado empieza a transmitir calor por las paredes del cilindro, y se controla el aumento de temperatura mediante un termostato.

- 2) Intercambiador de calor con fluidos:



Figura 8. Intercambiador de calor simple.

Un intercambiador de calor con fluidos está diseñado para transferir energía térmica mediante la diferencia de temperatura. El diseño propuesto, se ajustaría al tanque mediante un serpentín en espiral alrededor de la cámara interna permitiendo una distribución uniforme. Este método es muy eficaz para regular la temperatura de un sistema de manera precisa y controlada, puede usarse para calentamiento o enfriamiento.

- 3) Inducción electromagnética:

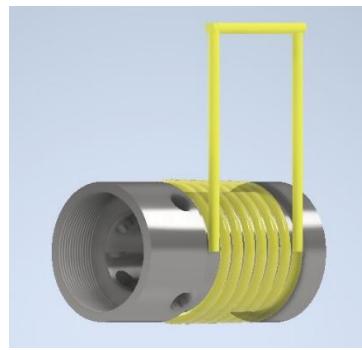


Figura 9. Inducción electromagnética.

Un calentador por inducción electromagnética es un dispositivo que genera calor a través de corrientes inducidas en un material conductor, sin necesidad de contacto directo. El calentamiento se produce gracias a una bobina de inducción que crea un campo magnético variable, provocando corriente en la superficie del cilindro que lo calienta. Este método es altamente eficiente y muy utilizado en la industria, aunque un poco costoso y se reserva para aplicaciones más especiales.

### Criterios Ingenieriles

#### 1) Precisión

La precisión es fundamental para garantizar un secado homogéneo y controlado, evitando fuertes fluctuaciones de temperatura que puedan comprometer la seguridad, calidad del proceso o dañar la muestra. Se necesita un calentamiento controlado con buena precisión y de manera estable.

#### 2) Precio moderado

Si bien se tiene varias opciones de sistemas de calentamiento, es importante no sobrepasarse con los costos de este. En la búsqueda se debe priorizar un sistema de calentamiento accesible que satisfaga las necesidades que se requieren y sea viable económicamente.

#### 3) Estética

Aunque las especificaciones técnicas son la prioridad, un diseño agradable y bien integrado le da un toque de estética al sistema en conjunto. El tener un equipo visualmente agradable favorece a la calidad y percepción del equipo.

#### 4) Implementación

El sistema de calentamiento tiene que ser fácil de instalar y operar, garantizando una integración armónica con el resto del sistema sin componentes desproporcionados que afecten la ergonomía, estética o funcionalidad.

### Conclusiones

Tabla 2. Matriz de ponderación alternativas del calentador.

Criterio	Ponderado del criterio 1: precisión	Podera do califica ción criterio 1: precisi ón	Prod ucto	Ponde rado del criteri o 2: precio mode rado	Poder ado calific ación criteri o 2: precio mode rado	Prod ucto	Ponde rado del criteri o 3: estétic a	Poder ado calific ación criteri o 3: estétic a	Prod ucto	Ponde rado del criteri o 4: imple mentaci ón	Prod ucto	Suma de los produc tos	Prior idad	
Solución a	0,3	0,33	0,100	0,2	0,50	0,100	0,1	0,50	0,050	0,4	0,50	0,200	0,45	1
Solución b	0,3	0,50	0,150	0,2	0,33	0,067	0,1	0,33	0,033	0,4	0,33	0,133	0,38	2
Solución c	0,3	0,17	0,050	0,2	0,17	0,033	0,1	0,17	0,017	0,4	0,17	0,067	0,17	3

Al aplicar el método de matriz de ponderación de criterios ingenieriles, se determinó que la solución A es la mejor alternativa que se tiene. Esta opción consiste en una banda calefactora que envuelve el cilindro donde se calienta el CO<sub>2</sub>. Al evaluarla con los demás criterios antes expuestos de precisión, precio moderado, estética, implementación, se destacó entre las demás opciones pudiendo brindar la mejor solución para el sistema y las necesidades que se tiene. Se puede observar las tablas de ponderación en el anexo A.

## Gestión de proyecto

Se ha analizado dos aspectos clave en la planificación para la construcción del SPC, el primero como se explicó en la figura 1 se realizó un cronograma establecido según los requerimientos que demanda el proyecto y como segundo aspecto una tabla con presupuestos iniciales que se necesitarían para la construcción del equipo, como se muestra a continuación.

Tabla 3. Presupuesto.

Componente	Cantidad	Precio Unitario (USD)	Total (USD)
Acero	1	494.39	494.39
Ventana	1	270.14	270.14
Válvulas	2	219.55	219.55
Manguera	1	185.84	185.84
Portamuestras	1	156.6	156.6
Machuelos	1	106	106
Calentador	1	100.05	100.05
Tanque de CO <sub>2</sub>	1	56.68	56.68
Manómetro	1	42.2	42.2
Termómetro	1	42.2	42.2
Tubo carcasa	1	39	39
Insertos inoxidables	1	30.59	30.59
Mecanizado	1	30	30
Total general	—	—	1773.24

## Normas y estándares

### ASME VIII BOILER & PRESSURE VESSEL CODE

Norma internacional con origen en Estados Unidos, establece estándares para el diseño, fabricación, inspección y pruebas de recipientes a presión. Se utiliza la norma para garantizar la seguridad, confiabilidad y eficiencia de los recipientes a presión, reduciendo posibles riesgos, garantizando seguridad operativa, cumplimiento de estándares normativos, diseño eficiente, fácil control de calidad y mantenimiento. En el caso de un Secador de Punto crítico, trabaja con CO<sub>2</sub> de alta presión por lo que es indispensable usar la normativa para la fabricación de un recipiente de presión que contenga el CO<sub>2</sub> hasta alcanzar el punto crítico de 31°C y 1070 psi, siguiendo las especificaciones y factores de seguridad sugeridos en la norma.

Según el alcance de la norma ASME VIII, División 1 (UG-1), está puede ser aplicada a cualquier tipo de recipientes a presión, y es el caso de la cámara de secado. De esta manera, establece puntos clave para el diseño, como es el espesor mínimo, los esfuerzos máximos permitidos y el factor de seguridad que se debe trabajar para cualquier tipo de tanque (The American Society of Mechanical Engineers, 2004, p. 7). Otro punto clave en el uso de este código, es que se establece información importante en el manejo de la seguridad del equipo, sobre todo en la implementación de pruebas hidrostáticas para garantizar que el recipiente cumpla con su función y evitar cualquier tipo de accidente.

### **ASME B1.1 UNIFIED INCH SCREW THREADS**

La ASME B1.1 establece especificaciones para roscas unificadas usadas en pernos, tornillos y componentes roscados. Tiene como objetivo asegurar la compatibilidad de roscas en equipos mecánicos. Para el caso del Secador de Punto Crítico se va a realizar varios mecanizados en la cámara para incorporar las diferentes piezas y componentes como manómetros, termómetros, válvulas etc, las cuales irían empernadas y tendrían una rosca estándar que se debería replicar en la cámara a la que irían empernadas. Por lo cual es indispensable el uso de la norma para asegurarnos que las piezas roscadas del SPC sean seguras

y compatibles con los estándares industriales (The American Society of Mechanical Engineers, 2003).

### **ISO 4126-1 Safety devices for protection against excessive pressure**

Esta normativa establece los requisitos de diseño, selección y prueba de válvulas de seguridad y alivio de presión utilizadas en sistemas que manejan fluidos presurizados. La finalidad de este tipo de regulaciones es evitar fallos catastróficos por sobrepresión. Esto asegura que los elementos presentes como recipientes y tuberías puedan liberar o almacenar presión de manera controlada. En este caso el diseño del Secador de Punto crítico opera con CO<sub>2</sub> a elevada presión, por lo que esta norma resulta fundamental para garantizar que el dispositivo disponga de válvulas de seguridad adecuadas. De esta forma se busca proteger tanto el equipo como a los operadores de posibles fallos por acumulación excesiva de presión interna.

En la norma se describe que “Se aplica a válvulas de seguridad con un diámetro de flujo de 4 mm o superior, destinadas a ser utilizadas a presiones de tarado de 0,1 bar manométrico o más” (International Organization for Standardization, 2013, p. 1). El SPC debe trabajar a presiones altas, específicamente a 1070 psi (73.8 bar) por lo cual justifica la utilización de una válvula de alivio.

### **ISO 3601 Fluid Power Systems- O-rings**

La norma ISO 3601 establece especificaciones dimensionales y tolerancias para juntas tóricas que se utilizan en sistemas de potencia de fluidos. Estos son elementos de sellado que se usan para evitar fugas, que, en el caso del Secador de Punto Crítico, este opera a una presión muy elevada, por lo cual es necesario garantizar hermeticidad en toda la cámara, para que no existan fugas de presión y no se pueda llegar al punto crítico del CO<sub>2</sub>. Esta norma establece especificaciones sobre los diámetros internos, secciones transversales y tolerancias que serán

necesarias para el diseño correcto de los O-rings que principalmente serán utilizados en la tapa del equipo (International Organization for Standardization, 2012).

## Materiales y métodos

### Selección de materiales y componentes

La selección de materiales para el secador de punto crítico fue fundamental para el funcionamiento correcto del mismo. Se siguió un proceso de investigación y análisis ingenieril, para establecer cuáles serán los mejores materiales y componentes. Para que se llegue a la mejor decisión, se tomó en cuenta factores como funcionalidad, durabilidad, seguridad operativa, facilidad de manufactura y viabilidad económica del prototipo. En el apartado ingenieril, se tomó en cuenta parámetros mecánicos, térmicos, normativos y de compatibilidad técnica, con el fin de construir un equipo confiable, replicable y que sea más económico en comparación a otras opciones que existen en el mercado. Por otro lado, se buscó estandarizar el material que se utiliza, que es el acero inoxidable 316, para que todos los componentes utilizados, sean del mismo.

Tabla 4. Selección de materiales y componentes.

Componentes y materiales	Descripción	Referencia
Selección del material estructural – Acero inoxidable AISI 316	Todas las partes importantes del Secador fueron fabricadas a partir de barras de acero inoxidable 316, tanto el cuerpo, la tapa y el porta muestras. Para esto se adquirió 3 barras, la del cuerpo fue una de 5 pulgadas de diámetro y 250 mm de largo. Para la tapa fue una de 4 pulgadas de diámetro y 70 mm de largo. Por último, para el porta muestras, fue una de 3 pulgadas y 190 mm de largo. La elección de este acero se fundamenta en sus propiedades superiores	 <p>Figura 10. Barra de acero inoxidable 316.</p>

	frente a la corrosión y excelente comportamiento a altas presiones.	
Sistema de calentamiento – Banda calefactora de 100 W	Para lograr que el CO <sub>2</sub> alcance su punto crítico (31 °C y 1070 psi), se evaluaron diferentes tecnologías de calentamiento. Para esto se seleccionó una banda calefactora que funciona como una resistencia eléctrica. La potencia seleccionada en base a cálculos realizados fue de 100 W. Esta banda está acoplada a un regulador de temperatura, el cual ayuda a establecer la temperatura a la que se necesita llegar. La elección de este componente se basa en su facilidad de uso y en su forma cilíndrica, que ayuda a que se asiente mejor en la cámara de presión.	
Manómetro	Para el manómetro, se utilizó uno mecánico. Ya que la cámara está sometido a altas presiones, se optó por uno con un rango de 3000 psi. La conexión del mismo fue de 1/4 " NPT. Dado que los agujeros, todos son los mismos, se optó por una conexión de 1/2" NPT. El manómetro utilizado es de acero inoxidable, de la serie PFP, con un diámetro de 2.5 pulgadas.	
Termómetro bimetálico	La medición de temperatura se realiza mediante un termómetro de vástago. Este sistema funciona de manera manual y tiene un rango de	

	<p>temperaturas entre -20 y 120 grados centígrados. De igual manera se ajusta mediante una rosca de 1/2" NPT y el diámetro es de 3 pulgadas.</p>	
Válvulas de aguja	<p>El control del ingreso y liberación del CO<sub>2</sub> se realiza con válvulas de aguja de precisión fabricadas en acero inoxidable 316. El modelo utilizado soporta presiones de hasta 6000 psi, lo cual las hace muy seguras. Esta selección fue importante, ya que este tipo de válvulas permiten un ajuste gradual y preciso del flujo del gas, lo cual es importante en el uso del Secador de Punto Crítico. De igual manera, la rosca de esta es de 1/2" NPT.</p>	
O-ring	<p>El sistema de cierre hermético entre el cilindro y la tapa se logra mediante un O-ring de alto rendimiento. Ya que la tapa al ser un componente que se lo va a roscar frecuentemente, esta no puede ir con teflón. Este elemento de sellado garantiza la hermeticidad del sistema aún en condiciones de presión elevada, así evita fugas que podrían comprometer</p>	

	la seguridad o el funcionamiento del equipo. Este tiene un diámetro exterior de 81 mm y un diámetro interior de 70 mm. El espesor es de 4.40 mm.	
Tapa con visor	Dado que en el SPD se necesitaba una parte donde se pueda ver el interior de la cámara, se optó por una tapa que incluye un visor con vidrio fusionado en una carcasa de acero inoxidable 316. La rosca de este es de 1'' NPT. La presión máxima que soporta este componente es de 4000 psi.	 <p>Figura 16. Tapa con visor.</p>
Manguera	Para poder meter el CO2 líquido al tanque de presión, es necesario una manguera la cual funcione a altas presiones. Este contiene dos conexiones, una que es la que va al tanque de gas que es de tipo tuerca CGA 320 niple CGA320, y la que va a las válvulas de aguja, que es de tipo hembra 1/2'' NPT.	 <p>Figura 17. Manguera.</p>
Base soporte	El sistema necesita una base, la cual fue diseñada para poder alojar el cuerpo completo del SPD. Para el mismo se utilizó impresión 3D FDM. Las especificaciones de fabricación de esta base incluyen: pieza fabricada por impresión 3D FDM, material PLA, relleno 100 %, tolerancia general $\pm 0,3$	 <p>Figura 18. Soporte.</p>

	mm, y orientación de impresión en eje vertical.	
Cesta para muestras	El porta muestras de acero inoxidable 316 y tiene huecos donde se alojan estas cestas. La selección de este componente fue importante, ya que se necesitaba un compartimiento donde se puedan colocar las muestras biológicas que van a ser secadas. Estas son de 15 mm de diámetro y 10 mm de altura, las cuales se asientan de manera ajustada en los huecos del porta muestras.	 <p>Figura 19. Cesta.</p>

### Plan de manufactura

El SPC es un método esencial en microscopía electrónica de barrido (SEM) para preservar la estructura de muestras biológicas y materiales porosos. Su principio se basa en eliminar tensiones superficiales mediante la transición de fase de un fluido supercrítico, evitando el colapso estructural durante el secado (Goldstein et al., 2003). Sin embargo, los altos costos de los equipos comerciales limitan su acceso en laboratorios con recursos restringidos, lo que impulsa la búsqueda de alternativas más asequibles. Este proyecto propone el diseño, manufactura y evaluación de un prototipo de máquina SPC, utilizando dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) como fluido supercrítico por su bajo costo, seguridad y eficacia en el reemplazo de solventes intermedios como el etanol (Anderson, 1951). La manufactura del equipo se centrará en la construcción de una cámara cilíndrica de acero inoxidable 316. Esta cámara soportará presiones de hasta 1070 psi y temperaturas de 31 °C, asegurando condiciones óptimas para el secado.

El proceso de manufactura incluirá la integración de sistemas de control de temperatura y presión, un cinturón calefactor para el calentamiento uniforme del  $\text{CO}_2$ , O-rings de alto

rendimiento para garantizar la hermeticidad entre otros componentes. Se priorizará un diseño ergonómico y seguro, con válvula de alivio para despresurización controlada y una disposición optimizada de los controles para facilitar su operación manual.

### **Listado de tecnologías de fabricación y componentes a fabricar/ensamblar:**

Tabla 5. Listado de componentes.

#	Componente	Descripción
1	Válvulas de Aguja de Precisión	Regulan con precisión el flujo de CO <sub>2</sub> , permitiendo ajustes controlados en el proceso de secado.
2	Termómetro Manual de Alta Precisión	Mide manualmente la temperatura interna del sistema para garantizar el estado supercrítico del CO <sub>2</sub> .
3	Manómetro de Alta Presión	Monitorea manualmente la presión interna de la cámara para asegurar condiciones seguras y controladas.
4	Válvula de Alivio de Seguridad	Permite la liberación controlada de presión excesiva para prevenir accidentes.
5	Chaqueta Térmica con Control de Temperatura	Proporciona un calentamiento uniforme a la cámara, facilitando la transición del CO <sub>2</sub> al estado supercrítico.
6	Cuerpo de la Cámara de Secado	Estructura cilíndrica de acero inoxidable que soporta las condiciones de alta presión y temperatura.
7	Carcasa Protectora	Envoltura externa que protege el sistema y contribuye a la seguridad operativa.
8	Portamuestras Modular	Soporte interno diseñado para asegurar las muestras durante el proceso de secado.
9	Tapa Modular Superior	Cierre superior desmontable que facilita la introducción y extracción de muestras.
10	Tapa Fija con Visor de Cristal	Permite la observación segura del interior del sistema sin comprometer la hermeticidad.
11	Mangueras de Alta Presión con Acoplos	Conectores macho y hembra que aseguran la conducción segura del CO <sub>2</sub> .
12	Tanque de CO <sub>2</sub>	Fuente principal de dióxido de carbono utilizado en el proceso de secado en punto crítico.
13	Gaskets Metálicos de Alta Resistencia	Sellos metálicos que garantizan la estanqueidad en uniones críticas del sistema.
14	O-ring de Alto Rendimiento	Sello de elastómero diseñado para evitar fugas en conexiones móviles del sistema.
15	Base Soporte en Impresión 3D	Estructura diseñada para montar y estabilizar el aparato, facilitando su instalación y uso.

## Cronograma de fabricación

*Tabla 6. Cronograma de fabricación.*

Fase	Inicio	Duración (días)	Descripción	Fin
Recepción de Portamuestras y Tanque de CO <sub>2</sub>	4/4/2025	1	Recepción y verificación de los componentes críticos.	4/5/2025
Fabricación del Cuerpo y Componentes Metálicos	3/21/2025	10	Fabricación de la cámara, tapas y elementos metálicos.	3/31/2025
Montaje de Componentes	3/31/2025	5	Montaje del cuerpo, tapas, válvulas y sistemas de sellado.	4/5/2025
Integración de Sistema de Control Manual	4/5/2025	3	Instalación de manómetros, termómetros y válvulas manuales.	4/8/2025
Instalación de Portamuestras y Tanque de CO <sub>2</sub>	4/5/2025	2	Integración de los últimos componentes críticos al sistema.	4/7/2025
Pruebas de Funcionamiento y Seguridad	4/7/2025	5	Verificación de la operación del equipo, incluyendo pruebas de presión y hermeticidad.	4/12/2025
Ajustes Finales y Verificación	4/12/2025	2	Ajustes de última hora y confirmación del correcto funcionamiento.	4/14/2025
Entrega Final	4/14/2025	1	Entrega del equipo listo para su uso.	4/15/2025

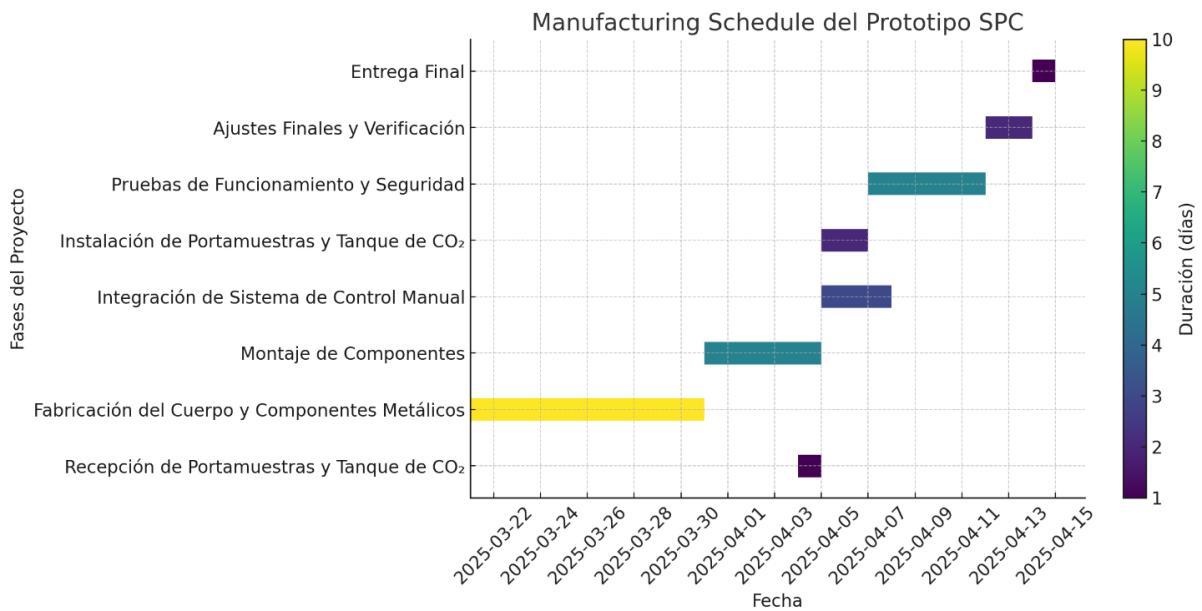


Figura 20. Cronograma con días de duración de cada proceso.

Plan de verificación de tolerancias y dimensionamiento de fabricación:

Tabla 7. Tolerancias y dimensionamiento.

Componente	Dimensiones Críticas	Tolerancia Permitida	Método de Verificación
Cuerpo	1. Preparación del Material	$\pm 0,25$	Cinta métrica, vernier
	2. Torneado Exterior	$\pm 0,1$	Micrómetro, vernier
	3. Torneado interior	$\pm 0,1$	Micrómetro, vernier
	4. Perforado Central	$\pm 0,1$	Calibrador de profundidad
	5. Perforado a 45 grados.	$\pm 0,1$	Calibrador de profundidad
	6. Roscado Interno	$\pm 0,1$	Galga de rosca
Carcasa	1. Corte del Tubo	$\pm 0,25$	Micrómetro, vernier
	2. Perforado Circular	$\pm 0,25$	Calibrador de profundidad
	3. Perforado Cuadrado	$\pm 0,25$	Plantilla de forma cuadrada
	4. Perforado de Agujeros Pequeños	$\pm 0,25$	Calibrador de profundidad
	5. Inspección Dimensional	$\pm 0,25$	Calibrador, micrómetro
PORTAMUESTRAS	1. Torneado Semicilíndrico	$\pm 0,1$	Calibrador de profundidad
	2. Perforado Lateral	$\pm 0,25$	Calibrador de profundidad
	3. Perforado Superior	$\pm 0,25$	Calibrador de profundidad
	4. Inspección Dimensional	$\pm 0,25$	Micrómetro, vernier
	5. Acabado y Desbarbado	$\pm 0,25$	Inspección visual
TAPA	1. Corte del Material	$\pm 0,25$	Micrómetro, vernier
	2. Torneado de Superficie	$\pm 0,25$	Micrómetro de exteriores
	3. Corte de Ranuras Circulares	$\pm 0,25$	Micrómetro de ranuras
	4. Taladrado del Eje	$\pm 0,25$	Calibrador de profundidad
	5. Roscado Interno	$\pm 0,1$	Galga de rosca, micrómetro

## **Resultados y discusión**

### **Reporte de Diseño**

El equipo SPC diseñado consta de un solo cuerpo cilíndrico con cambios de sección, en el cual se añaden varios subcomponentes como válvulas, termómetro, manómetro, etc. a partir de juntas roscadas. Este sistema opera con dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) como fluido de trabajo, aprovechando su transición a estado supercrítico a temperaturas superiores a 31 °C y presiones cercanas a 1070 psi. El diseño se enfoca en ser totalmente mecánico, sin automatización electrónica, facilitando su fabricación, mantenimiento y operación en contextos de laboratorio con recursos limitados. El sistema se configura como un equipo cerrado, operado manualmente, y controlado térmicamente mediante una chaqueta calefactora eléctrica que permite llevar el CO<sub>2</sub> a su estado supercrítico.

El componente principal del sistema es una cámara cilíndrica de presión, fabricada a partir de una barra sólida de acero inoxidable AISI 316L. El cilindro tiene una longitud total de 217 mm, con un diámetro exterior de 122 mm y una perforación interior de 105 mm para alojar la muestra. La sección final interna, donde se acopla la tapa, se reduce a 70 mm de profundidad con un diámetro de 105 mm, terminando en una rosca interna de 1" NPT que garantiza un cierre hermético y seguro. En el cuerpo cilíndrico se incluyen también roscas laterales de 1/2" NPT para la entrada y salida del CO<sub>2</sub>.

Como subcomponente se puede resaltar la presencia de la cámara interna de presión. Esta fue torneada a partir de la barra sólida de acero inoxidable, con un mecanizado exterior desde 127 mm a 122 mm y con una perforación interna de 105 mm. El diseño incluye una rosca interna calculada para la tapa y agujeros roscados NPT para los elementos adicionales. El siguiente componente diseñado fue la tapa de sellado que se ubica en uno de los costados del cilindro, para esta se mecanizó la rosca calculada y la ranura en la cara contraria que permite

utilizar algún elemento para garantizar un ajuste y sellado adecuado. Así mismo la tapa cuenta con un O-ring en la cara interior que hace contacto con el cilindro para que el sellado sea completamente hermético. El siguiente componente diseñado fue el porta muestras que ingresa en la cámara de presión con los elementos que se deseé secar. Este fue mecanizado a partir de una barra sólida de acero 316, se redujo su radio hasta 35 mm y su largo a 145 mm. Se desbastó de forma radial hasta que el componente resultante fuera un semicilindro con una cara plana en la cual se hicieron 4 agujeros interconectados. En estos agujeros se ubican las empaquetadoras de muestras y debe circular el CO<sub>2</sub> para que el proceso se dé como está estipulado.

Del mismo modo se diseñó una base adecuada para poder apoyar todo el sistema una vez que este fuera ensamblado y tener mejor manejo de este. La base se diseñó a partir del centro de gravedad referencial del sistema en modelo CAD y se imprimió en 3D. Finalmente se tiene la chaqueta térmica que se controla a través de un termostato y es la encargada de calentar la cámara interna hasta que el CO<sub>2</sub> llegue al punto crítico. Esta se ubica de manera exacta en el cambio de sección externo del cilindro mecanizado. A pesar de que la chaqueta no fue fabricada como tal, fueron necesarios varios cálculos para estimar la potencia adecuada del mismo y que el tiempo de calentamiento del sistema no fuera excesivamente corto o largo.

Dado a que el cilindro fue mecanizado desde un inicio con roscas NPT, todos los accesorios adicionales fueron adquiridos con esta especificación estándar, de modo que se garantiza un buen funcionamiento y sellado hermético de estos en sus respectivas juntas roscadas. Los elementos adicionales están conformados por: manómetro, tapón de seguridad, termómetro, válvula de ingreso de CO<sub>2</sub> y válvula de desfogue. Todos estos componentes están

hechos de acero inoxidable 316. El sistema ensamblado y diseñado en su totalidad se muestra en la imagen a continuación:

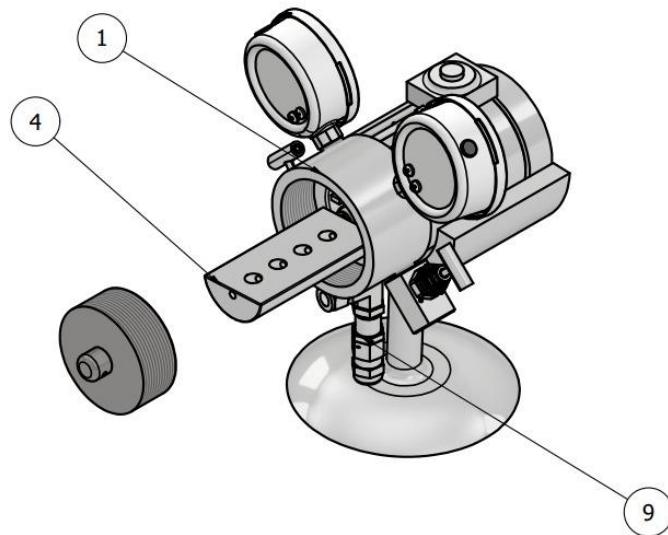


Figura 21. Secador de Punto Crítico completo

El sellado hermético de la cámara es esencial para mantener la presión interna necesaria para alcanzar el estado supercrítico del CO<sub>2</sub>. Se dio especial atención al diseño de las roscas internas y a la selección y acoplamiento del O-ring, siguiendo especificaciones de la norma ISO 3601. La calidad del mecanizado, los acabados superficiales (N7 en torneado y N10 en taladrado) y el control de tolerancias ( $\pm 0.25$  mm) son fundamentales para evitar fugas y asegurar la integridad del sistema durante la operación.

### **Análisis ingenieril**

Con el objetivo de analizar componentes y procesos clave del sistema se determinaron 3 cálculos principales para que el sistema no presente fallos inesperados al momento de que este entre en operación. En este caso se toma en consideración los tres aspectos más críticos para el funcionamiento del SPC, primero el cálculo del espesor para garantizar que la cámara

interna soporte la carga de presión interna de 1070 psi, luego el cálculo de transferencia de calor que es indispensable para conocer la potencia que se requiere para calentar la cámara interna desde el exterior hasta 31 °C, y finalmente el diseño de rosca de la tapa posterior del SPC para garantizar que este componente este completamente sujeto a la cámara y soporte la presión sin comprometer la integridad o hermeticidad del sistema. A continuación, se describen los procesos realizados y los principales resultados para cada caso, para mayor detalle en los cálculos revisar el Apéndice B.

### **Cálculo del espesor:**

El diseño del cilindro en el secador en punto crítico (SPC) busca garantizar su resistencia frente a las altas presiones del proceso. Para ello, se analizaron los esfuerzos tangenciales, radiales y longitudinales bajo una presión interna de 7.38 MPa y externa de 0.101 MPa, aplicando las ecuaciones de cilindros presurizados. El resultado mostró un esfuerzo máximo de 18.82 MPa, muy por debajo del límite elástico del acero inoxidable 316 (240 MPa), asegurando que el material soportará sin problemas las condiciones de operación. Además, con un factor de seguridad de 12.75, se confirma que el espesor de 17.5 mm es suficiente para evitar fallas estructurales. Este enfoque conservador mejora la resistencia del cilindro ante fluctuaciones de presión, impactos y vibraciones, lo que contribuye a una mayor durabilidad.

Se detallan los cálculos y resultados en el anexo B.

Formulas principales usadas:

$$\sigma_t = \frac{P_{iri}^2 - P_{oro}^2 - \frac{ri^2 ro^2 (Po - Pi)}{r}}{ro^2 - ri^2}$$

$$\sigma_r = \frac{P_{iri}^2 - P_{oro}^2 + \frac{ri^2 ro^2 (Po - Pi)}{r}}{ro^2 - ri^2}$$

### **Cálculo de transferencia de calor:**

Los cálculos se centran en la transferencia de calor y masa, determinando la eficiencia térmica del sistema. Se emplea la ecuación de difusión de calor en coordenadas radiales para modelar la distribución térmica en el cilindro y se considera la resistencia térmica de sus paredes. Dado que el número de Biot es menor a 1, se aplica el método de capacitancia concentrada (Lumped Capacitance Method) para estimar el tiempo de calentamiento del CO<sub>2</sub>. Además, se determina la potencia en watts necesaria para calentar el cilindro y el fluido interno hasta alcanzar el punto crítico. Estos cálculos permiten optimizar el diseño del SPC, mejorar la eficiencia energética y definir estrategias adecuadas para el control del proceso como lo es la potencia necesaria de la banda calefactora que se requiere. Se detallan los cálculos y resultados en el anexo B.

Formulas principales:

$$\frac{T(t) - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = e^{-\frac{hA}{\rho CpV}t} \quad (\text{Conducción en estado transitorio})$$

### Cálculo de roscado en la tapa:

El diseño de la rosca en el secador en punto crítico (SPC) se evaluó para garantizar su resistencia ante esfuerzos axiales y de cizalladura. Se utilizó una rosca estándar M105X4, con un diámetro exterior de 105 mm y un paso de 4 mm. Para determinar su seguridad, se calcularon los esfuerzos principales. La fuerza axial sobre la tapa del cilindro resultó en 28.4 kN, lo que generó un esfuerzo axial de 3.17 MPa, muy por debajo del límite elástico del material (240 MPa), obteniendo un factor de seguridad de 75.71, lo que indica una alta resistencia en esta condición. Además, se evaluó el esfuerzo por cizalladura, obteniendo 1.28 MPa, también dentro de límites seguros, con un factor de seguridad de 107.97. Estos resultados confirman que el diseño de la rosca es estructuralmente robusto, evitando fallas por carga axial o cizallamiento. Se detallan los cálculos y resultados en el anexo B.

## **Formulas principales:**

$$\sigma = \frac{F_{axial}}{A_t} \quad (\text{Esfuerzo axial sobre la tapa})$$

## **Simulaciones**

### **1) Definición de problema**

El presente estudio tiene como objetivo analizar el comportamiento estructural-térmico de un cilindro hueco empleado como cámara de calentamiento en un sistema de Secador de punto crítico (SPC). En este tipo de sistemas el cuerpo del equipo es el componente mas crucial y es en el cual se va a hacer énfasis en este análisis.

Para este propósito, se ha desarrollado una simulación computacional en ANSYS Workbench 2025 R1, con el fin de evaluar la respuesta del cilindro bajo condiciones de uso normal.

Análisis estructural estático-térmico, en el que se somete el cilindro a una presión interna de 1070 psi (7,39 MPa) y 31°C operación del SPC en condiciones normales.

### **2) Descripción del Modelo**

Geometría: Cilindro hueco de sección circular.



*Figura 22. Cuerpo de SPC*

Material: Acero inoxidable AISI 316, elegido por su alta resistencia a la corrosión, excelente comportamiento térmico y buena respuesta mecánica bajo presión.

Dimensiones clave:

Espesor de pared:  $t = 17,5$  mm

Radio interno:  $ri = 35$  mm

Radio externo:  $ro = 52,5$  mm

Medio interno: Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), cuyo comportamiento es fundamental en procesos de secado por punto crítico debido a su transición directa entre estado líquido y gaseoso al alcanzar condiciones críticas ( $\approx 31^\circ\text{C}$ , 1070 psi).

## 2.1) Condiciones de frontera

Condiciones de frontera análisis termal:

**D: Transient Thermal**  
 Transient Thermal  
 Time: 1920, s  
 11/5/2025 11:05:41

Heat Flow: 67, W

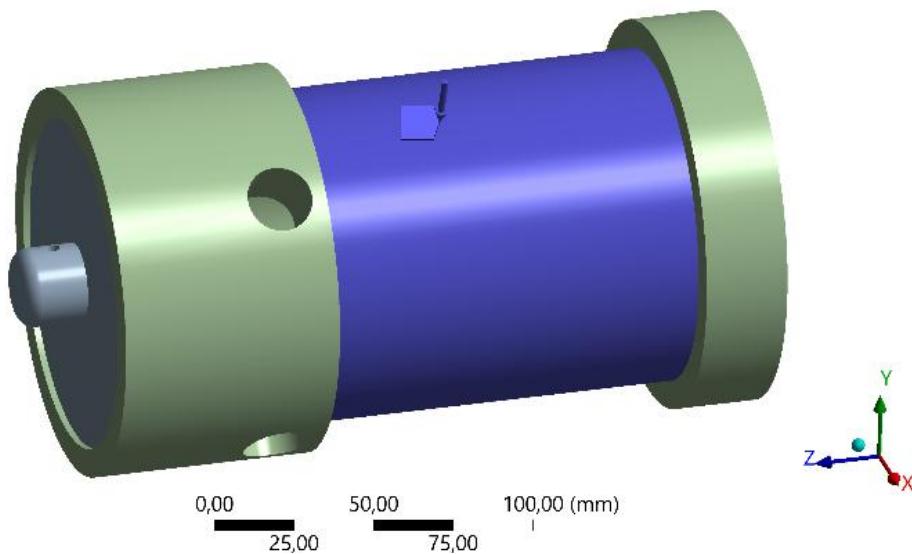


Figura 23. Condiciones de frontera térmicas

Flujo de calor por convección: 67 W

Tiempo: 1920 s

Esto debido a que 67 [W] es la potencia real que se introduce al sistema contando las pérdidas de energía y 1920 [s] es el tiempo que toma en calentarse el sistema a la temperatura deseada.

Las condiciones de frontera en el módulo estructural fueron:

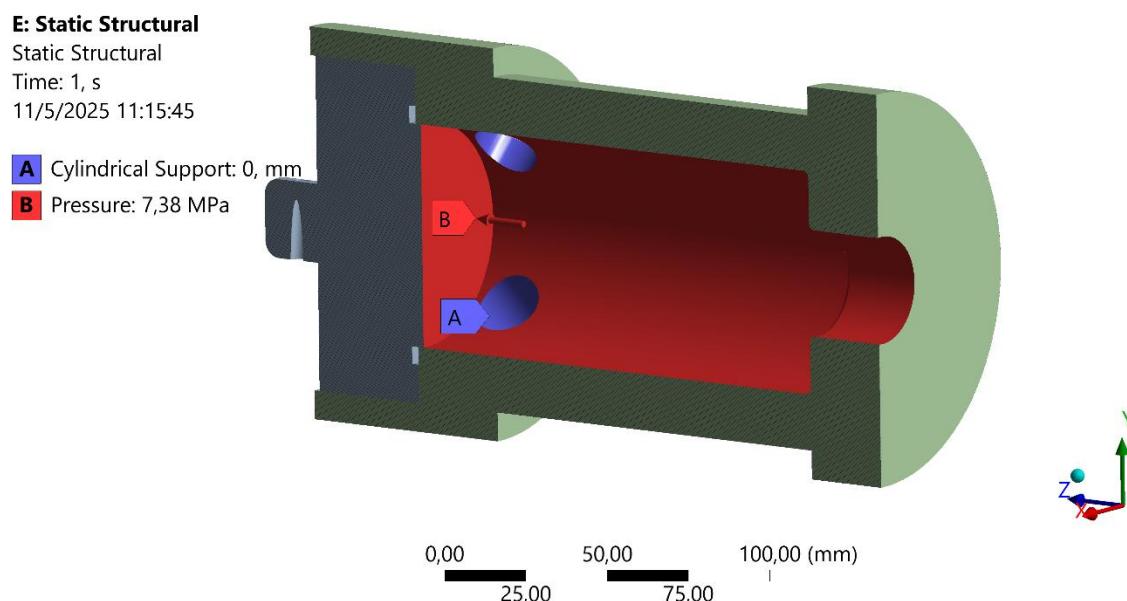


Figura 24. Condiciones de frontera estructural

Soportes cilíndricos en los orificios de los accesorios

Presión en las paredes internas del SPC 1070 [Psi] (7,39 MPa)

Se ocupó soportes cilíndricos en los orificios de los accesorios del SPC ya que es una zona que va a estar restringida y sirve muy bien para este análisis ya que no concentra esfuerzos en zonas críticas como pasaría con un fixed support. Por otro lado se asumió una presión interna de la cámara uniforme y se aplicó el valor correspondiente en las paredes internas de la pieza.

### 3) Mallado

Se realizó una independencia de mallado en donde se busca una convergencia de malla con los resultados analizando esfuerzo o deformación, este es un proceso que determina el rango

de tamaño de malla a utilizar en la simulación y cuando estos resultados afectan significativamente a la misma. También de este análisis se logra determinar con exactitud puntos críticos en el sistema que son las zonas del equipo para luego realizar un refinamiento de malla para mayor exactitud de valores en esas zonas.

Tabla 8. Análisis de independencia de mallado.

Independencia de mallado SPC				
Mallado	Tamaño de elemento [mm]	Nodos #	Elementos #	Esfuerzo equivalente (Von misses) [MPa]
1	50	6067	3122	24,679
2	40	7064	3876	27,265
3	30	8294	4517	29,797
4	20	9613	5221	32,562
5	15	12696	7082	36,885
6	12	16781	10402	37,934
7	10	23590	13760	39,456
8	9	29536	17708	40,012

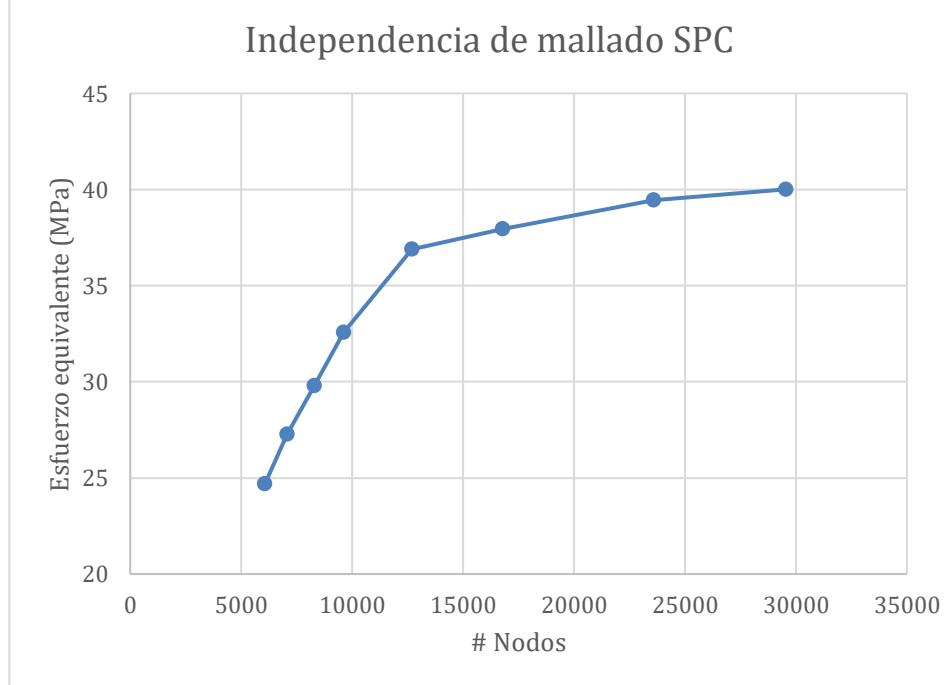
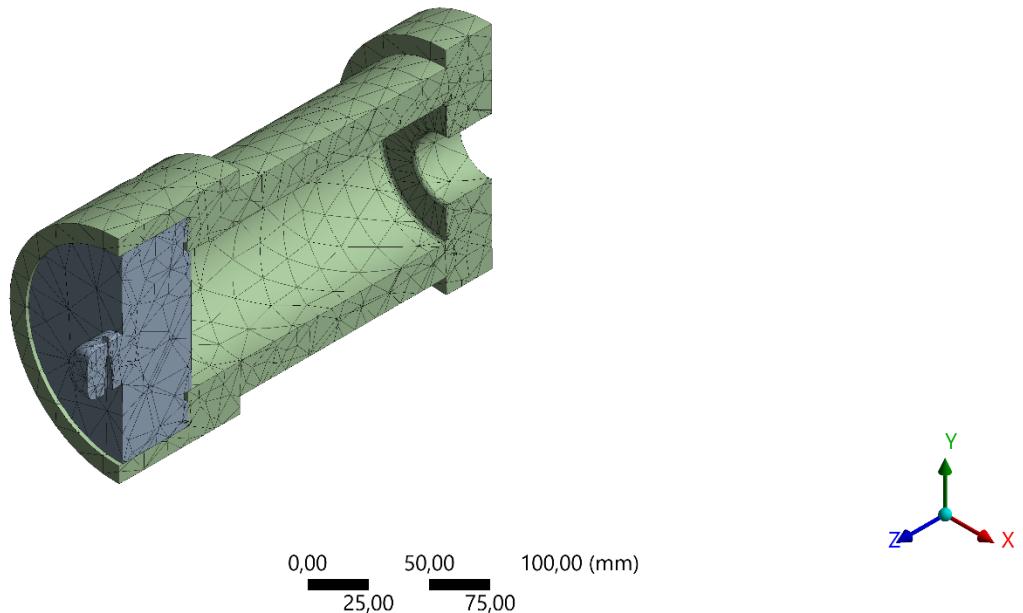


Figura 25. Independencia de mallado

Al analizar los resultados de esfuerzo en comparación con el número de nodos se logra determinar que el rango en el que converge la solución es arriba de 11000 nodos, por lo que se optó por un tamaño de malla de 15 [mm] con un refinamiento de 5 [mm] en las zonas críticas, con un número de elementos de nodos de 12696 que se encuentra dentro del rango que la solución converge tomando en cuenta un error de  $\pm 4\%$ .



*Figura 26. Tamaño de malla 15 mm*

### 3.1) Resultados del análisis

Para los presentes resultados cabe mencionar que se realizó un análisis estructural-térmico con dos módulos de ANSYS, en donde se importa la carga de la temperatura a los análisis estructurales para una mayor precisión de los resultados.

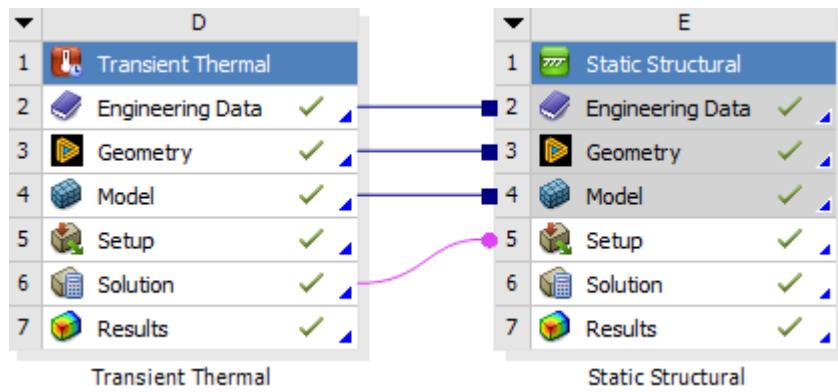


Figura 27. Módulos usados de ANSYS

### Temperatura en estado transitorio

El valor de la temperatura se encuentra en un rango de 47,676°C a 39,908°C con la potencia real del calentador de 67 W, localizando una mayor temperatura en el centro de el cilindro en donde se acumula el calor y una menor temperatura en la zona mas alejada de la chaqueta térmica que es en donde se pierde calor.

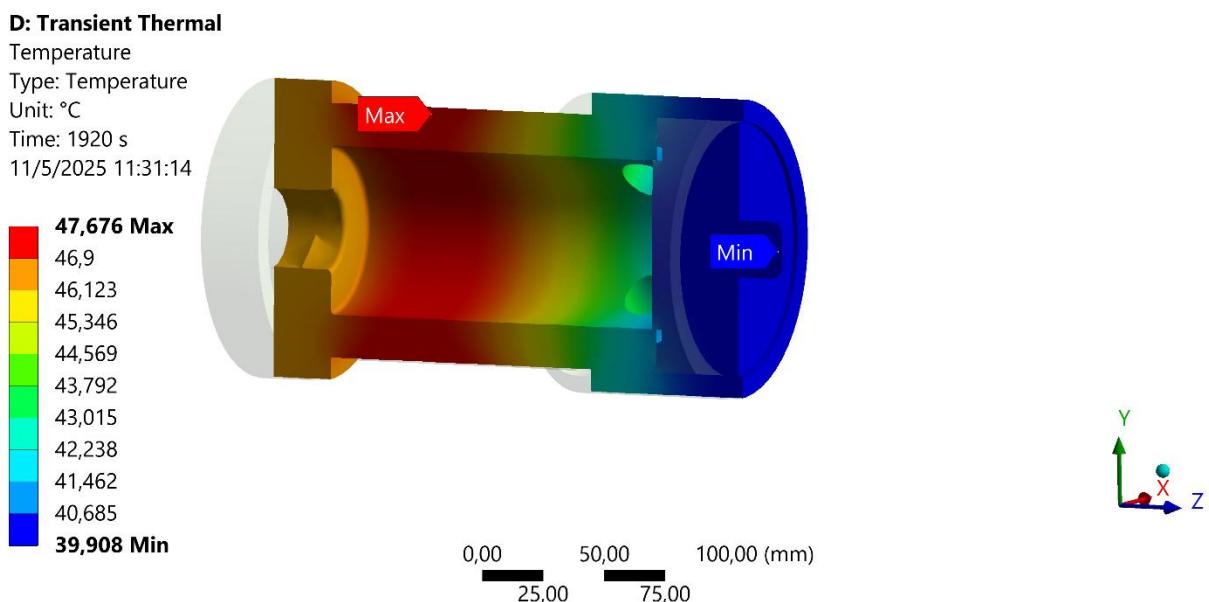


Figura 28. Carga de temperatura SPC

## Esfuerzo de von Mises (Equivalent Stress)

El valor máximo de esfuerzo equivalente fue de 36,885 MPa, localizado en la zona del extremo lateral del cuerpo, generalmente estas discontinuidades o cambios bruscos de sección en la forma del cilindro dan lugar a picos de esfuerzo en esas zonas, aunque esta magnitud se encuentra por debajo del límite elástico del acero inoxidable 316 ( 240 MPa), indicando que no se supera el umbral de fluencia del material.

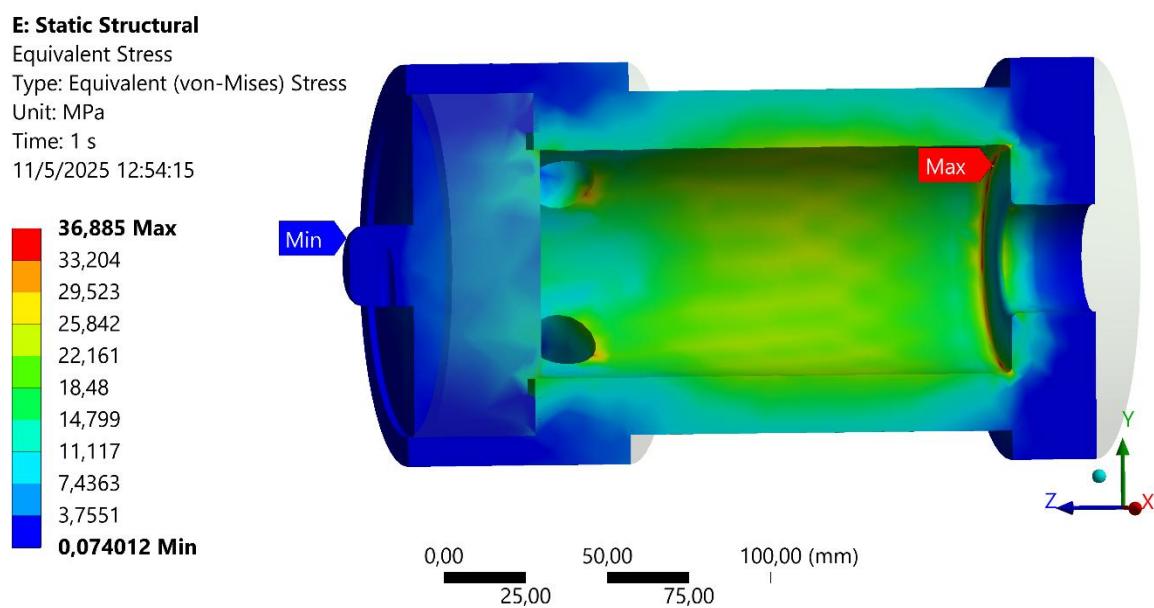


Figura 29. Esfuerzo Von Mises cuerpo SPC

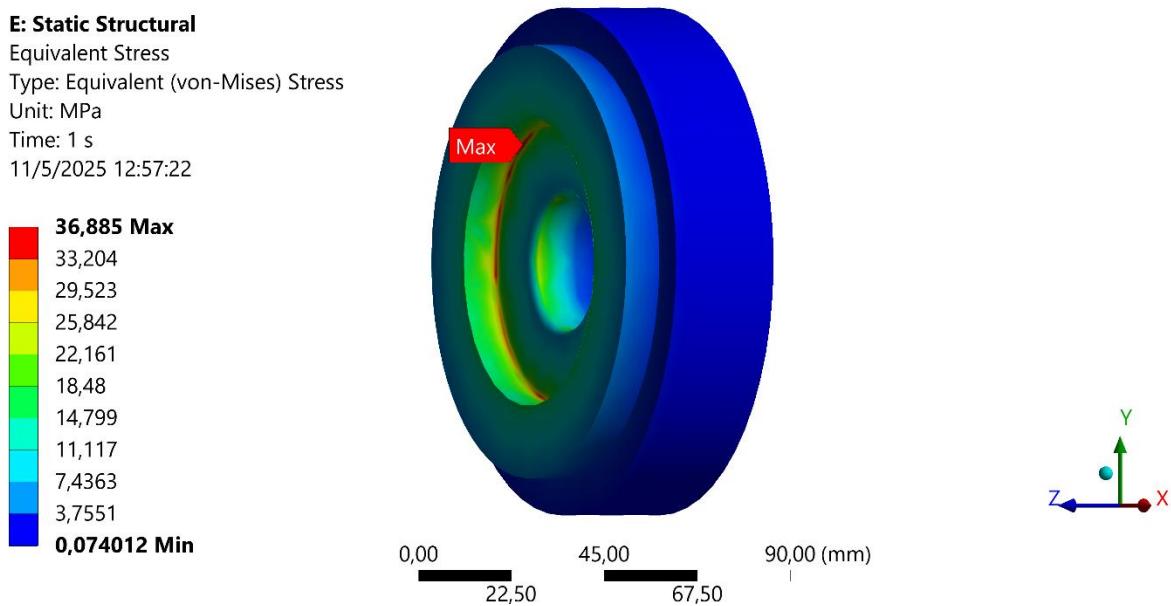


Figura 30. Detalle de esfuerzo Von Mises cuerpo SPC

## Deformación

El cilindro al concentrar sus esfuerzos máximos en las zonas de los extremos laterales es coherente que el lugar con mayor deformación sea el centro ya que las zonas de los extremos se encuentran también restringidas y el lugar en el que se tiende a deformar es en la parte media en donde se abomba radialmente alcanzando un pico de 0,0038 mm que es un valor pequeño que no afectaría a elementos acoplados o tolerancias en el diseño de esa zona. Por otro lado, si se necesita reducir la deformación del diseño se debería aumentar el espesor y así también se tendría un equipo más robusto y resistente.

**E: Static Structural**

Total Deformation

Type: Total Deformation

Unit: mm

Time: 1 s

11/5/2025 13:08:05

**0,0038421 Max**

0,0034152

0,0029883

0,0025614

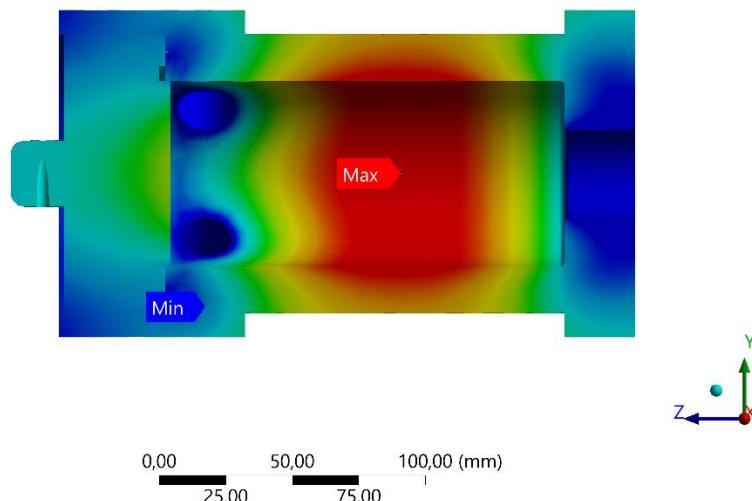
0,0021345

0,0017076

0,0012807

0,00085379

0,0004269

**0 Min***Figura 31. Deformación estructural cuerpo SPC***E: Static Structural**

Total Deformation

Type: Total Deformation

Unit: mm

Time: 1 s

11/5/2025 13:09:36

**0,0038421 Max**

0,0034152

0,0029883

0,0025614

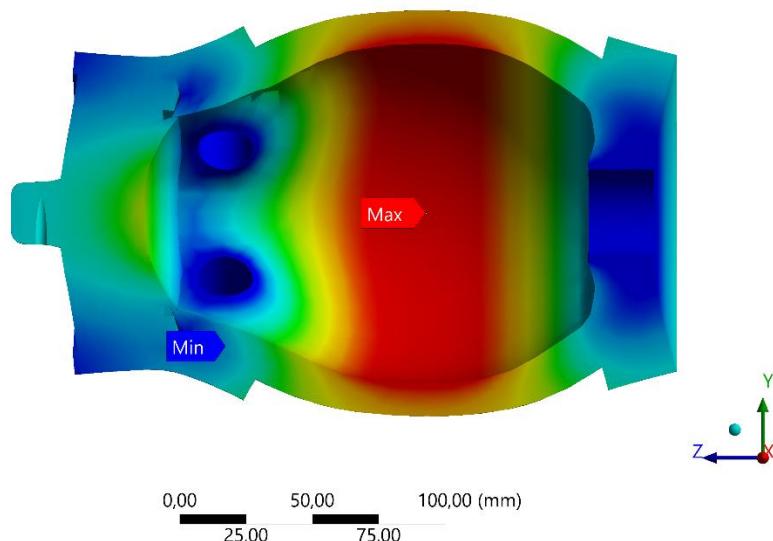
0,0021345

0,0017076

0,0012807

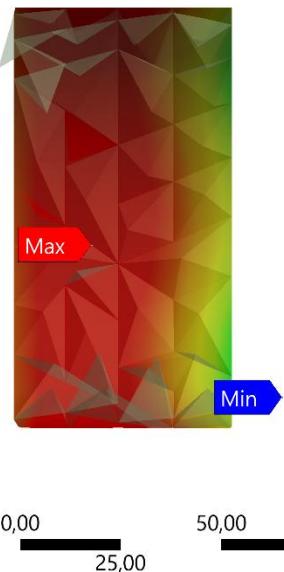
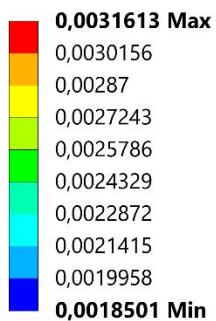
0,00085379

0,0004269

**0 Min***Figura 32. Deformación estructural cuerpo SPC (escala 2x)*

**E: Static Structural**

Total Deformation 2  
 Type: Total Deformation  
 Unit: mm  
 Time: 1 s  
 11/5/2025 13:19:52



100,00 (mm)

0,00      25,00      50,00      75,00

Figura 33. Deformación estructural zona critica cuerpo SPC

### Análisis deformación en diferentes presiones de trabajo

Tabla 9. Análisis presión vs deformación

Presión (MPa)	Deformación (mm)
4,82	0,0025092
5,17	0,0026914
5,51	0,0028684
5,86	0,0030506
6,2	0,0032276
6,55	0,0034099
6,89	0,0035869
7,23	0,0037641
7,58	0,0039254

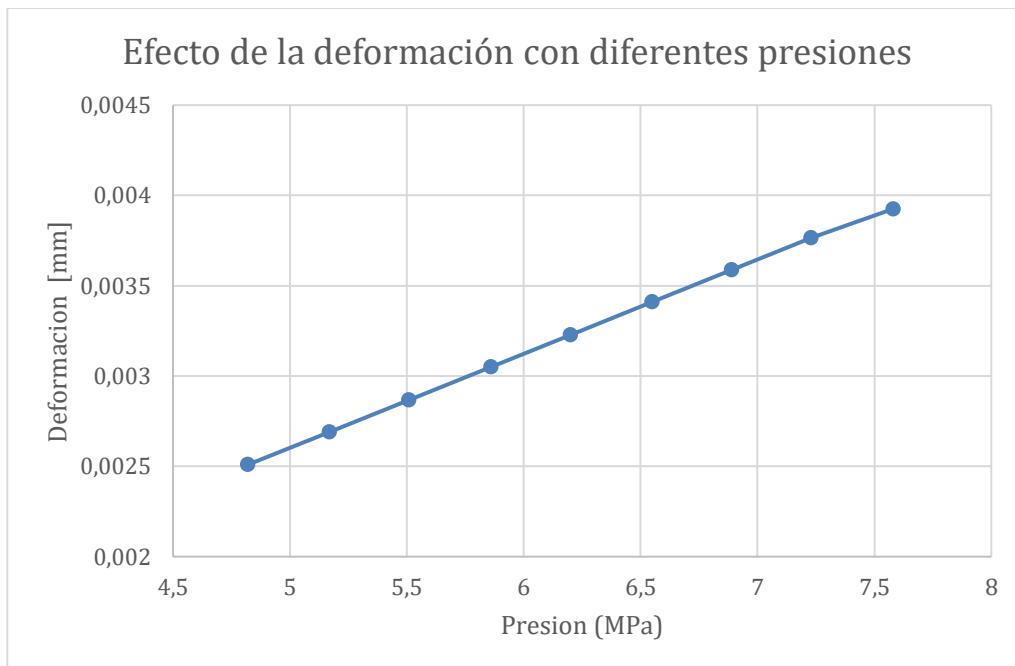


Tabla 10. Efecto presión vs deformación.

### Factor de seguridad de diseño

El factor de seguridad es un factor que nos indica el margen frente a la falla de un componente, se define el esfuerzo máximo que soporta la pieza sobre la resistencia del material (límite de fluencia o elástico). Obteniendo un factor de seguridad de diseño de 13,257 que es un valor con un margen grande que impide la falla del equipo, permitiendo tener variabilidad de cargas y mayor seguridad ante picos de esfuerzos posiblemente ocasionados garantizando su uso en condiciones de trabajo normales o imprevistos siempre permaneciendo en una zona elástica para que la pieza no sufra deformaciones permanentes que comprometan su seguridad.

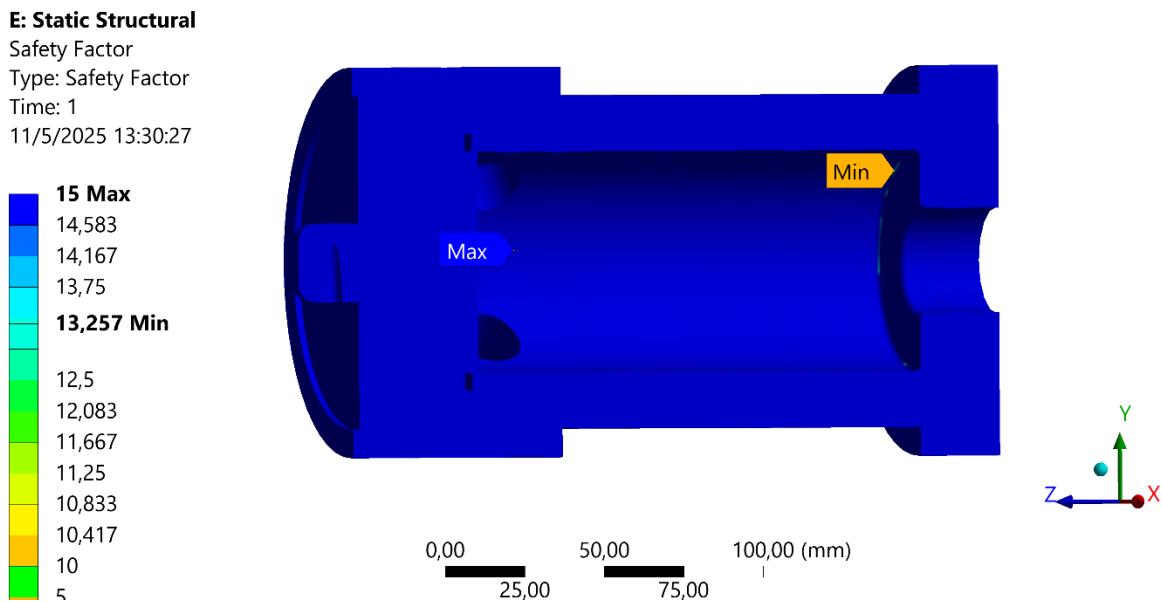
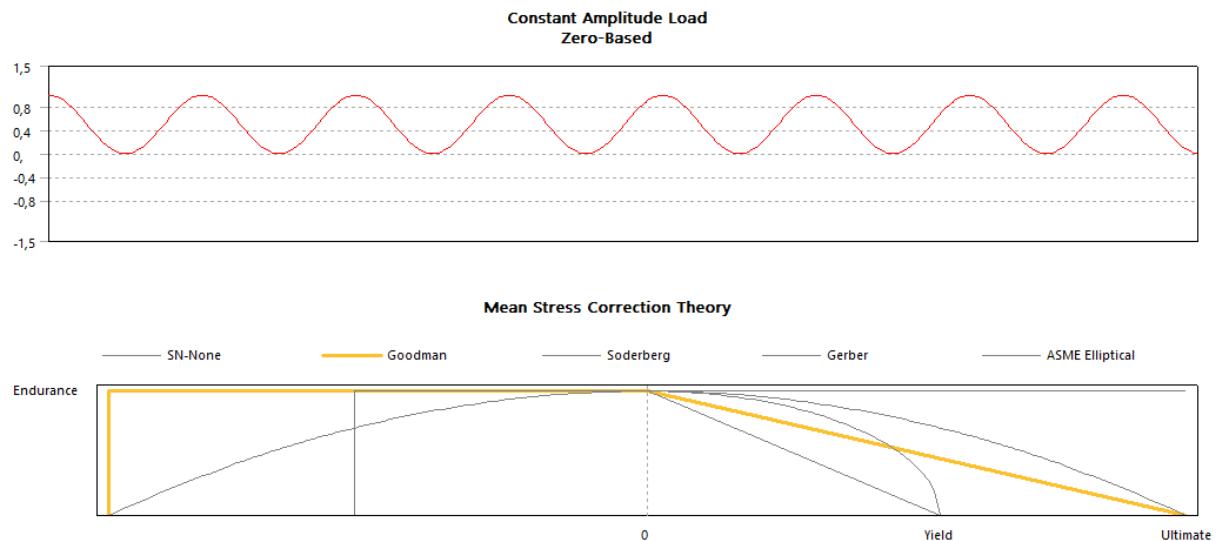


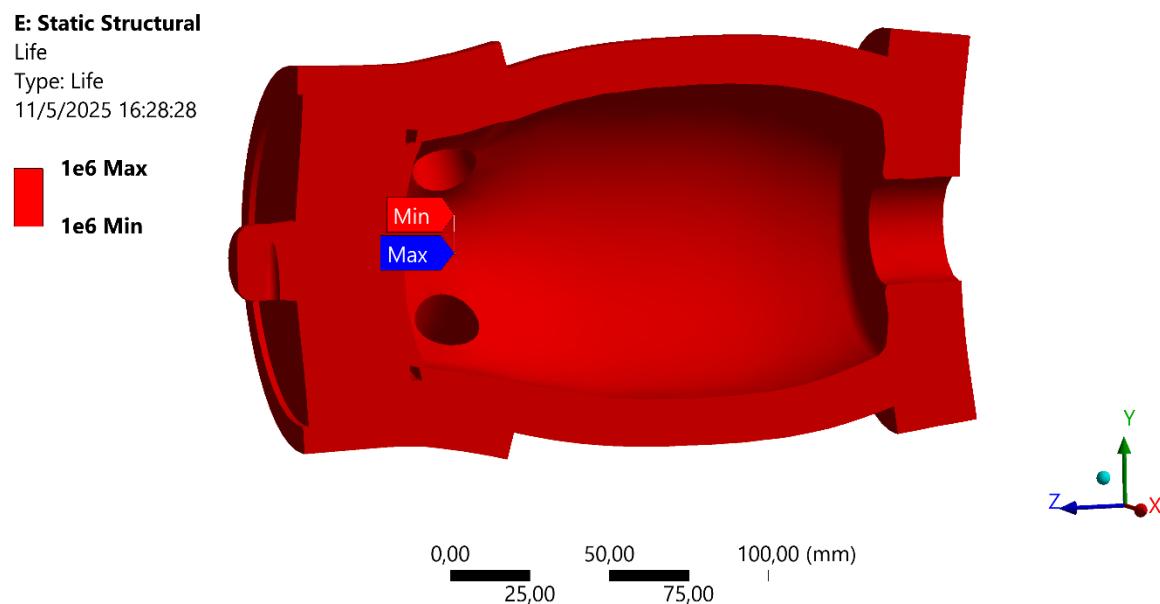
Figura 34.Factor de seguridad de diseño.

### Factor de seguridad a fatiga

Para el factor de seguridad a fatiga bajo cargas cíclicas se optó por la teoría de Goodman bajo un cielo de presión de únicamente tensión, es decir de 0 a la presión máxima de trabajo. Para la vida del componente ANSYS nos da un resultado de 1e6 que es un numero de ciclos que puede soportar la pieza antes de la falla por fatiga, que no es tan alto y se puede analizar fatiga mediante un análisis de esfuerzo, en cambio si el número de ciclos es mayor a 1e7 es recomendable realizar el análisis de fatiga tomando en cuenta la deformación para resultados más precisos. Por otro lado, el factor de seguridad obtenido es de 4,02 que indica un margen de seguridad elevado y un poco sobredimensionado pero justificable debido a que es un equipo que debe contar con alta seguridad para su uso.



*Figura 35. Amplitud y teoría de fatiga*



*Figura 36. Vida a fatiga*

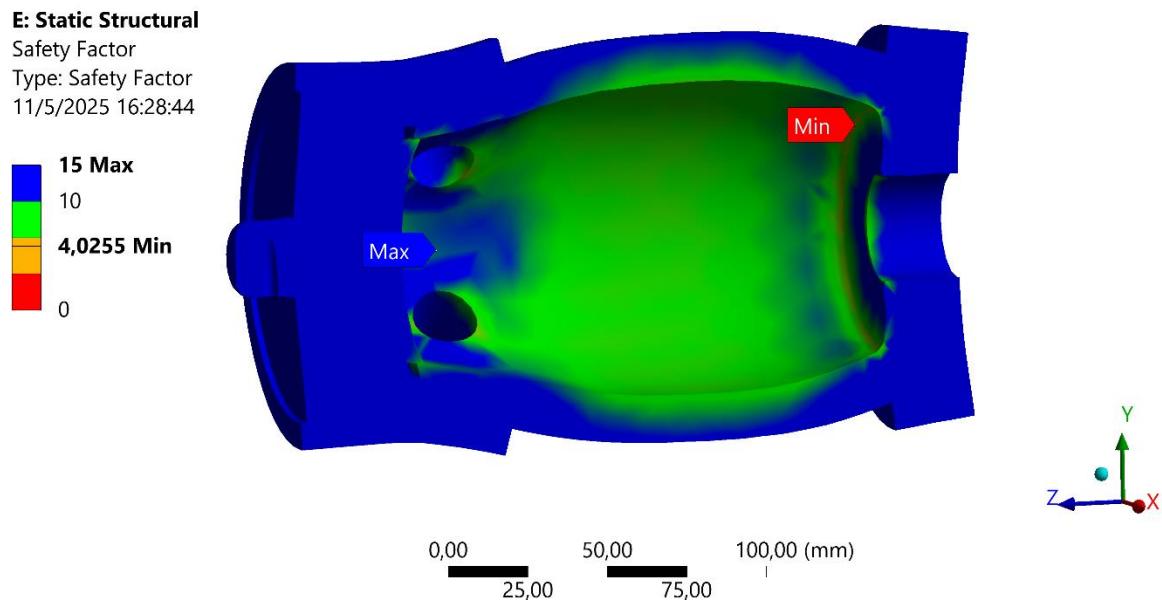


Figura 37. Factor de seguridad a fatiga

## Discusión

El análisis combinado estructural-térmico del cuerpo del SPC muestra que en sus condiciones de operación normales 1070 psi y 31 °C el componente cumple de manera cómoda con los requisitos y cargas a las que va a estar expuesto presentando un comportamiento seguro y confiable. Se puede destacar que el esfuerzo máximo al cual es sometido el componente (36,9 MPa) y que está muy por debajo del límite elástico del acero AISI 316 (240 MPa) obteniendo un factor de seguridad de seguridad de 13,26 que si llega a estar sobredimensionado pero al realizar el análisis de fatiga con cargas cíclicas del equipo vemos que este factor baja considerablemente a 4,03 que un factor de seguridad común en equipos que están sometidos a condiciones de trabajo exigentes y en donde es esencial presentar un diseño seguro. Es preciso también mencionar que los resultados de simulación no son un hecho y siempre van a tener que ser validados experimentalmente. Plan de pruebas de prototipo El diseño y material del

cilindro en AISI 316 para el SPC ha sido validado mediante simulación de cargas térmicas y estructurales soportando la presión interna requerida y temperatura de operación asegurando transición del CO<sub>2</sub> a su punto crítico que es el fin del equipo. Por otro lado, los resultados obtenidos de esfuerzo máximo, deformación, factor de seguridad de diseño (13,26) y factor de seguridad en fatiga (4,03) ayuda a definir características del equipo que en un futuro ayuden para mejorar el diseño de este o su replicación exitosa.

### **Plan de pruebas de prototipo**

Para validar el desempeño y seguridad del prototipo diseñado, se realizaron pruebas siguiendo las recomendaciones establecidas en el Código ASME VIII para Calderas y Recipientes a Presión. En este se establecen las prácticas estándar para la verificación de recipientes que soportan presiones elevadas en su interior. El objetivo principal de esta fase fue comprobar la integridad mecánica y la hermeticidad de la cámara de secado bajo condiciones de operación simuladas.

### **Procedimiento de prueba y montaje**

Se llevaron a cabo las dos pruebas fundamentales

#### **Prueba hidrostática:**

La cámara fue sometida a una prueba de presión hidrostática utilizando el mismo fluido de trabajo que en este caso es el CO<sub>2</sub>, dado a que este fluido sale del tanque de almacenamiento a una presión de 800 psi, representa un acercamiento bastante adecuado para determinar si el sistema es capaz de soportar dicha presión en su interior. Para garantizar la seguridad del operador y del entorno de prueba, se fabricó una cámara de contención con láminas de acero y malla metálica que permitiera observar el comportamiento del equipo en su interior. La presión

aplicada superó en un 30% la presión de trabajo estimada, como establece el código ASME VIII. Durante la prueba no se evidenciaron deformaciones ni fallas estructurales del cilindro.



Figura 38. Secador de Punto Crítico dentro de la cámara de contención

**Prueba de hermeticidad (fugas):**

También se realizó una verificación de fugar mediante solución jabonosa aplicada en las uniones roscadas de componentes y tapas. La presencia de burbujas indicaría escape de gas, sin embargo, no se observó ninguna formación de burbujas lo cual confirmaría la efectividad del sellado por O-ring y uniones roscadas. En el caso de existir alguna fuga en las uniones roscadas, se recomendaría usar cinta aislante en las roscas para que se pueda garantizar un ajuste adecuado



Figura 39. Pruebas con solución jabonosa en juntas roscadas

Evaluación del desempeño:

*Tabla 11. Criterios de desempeño*

Criterio	Método de Prueba	Valor objetivo	Resultado	Estado
Integridad Estructural	Prueba hidrostática	30% más de la presión de trabajo	Aprobado, sin fallas	Cumple
Hermeticidad	Prueba con solución jabonosa	Sin fugas visibles	Aprobado	Cumple
Contención de Presión	Observación de manómetro	1070 psi o mas	Se eleva presión hasta 1400 psi, sin fallas	Cumple
Seguridad ante fallas	Inspección de cámara de pruebas	Sin daños externos	Contenido y controlado	Cumple
Cumplimiento Normativo	ASME Sección VII Div. 1	Ensayos de la norma	Confirmado	Cumple

El prototipo cumple satisfactoriamente con todos los criterios de ingeniería definidos.

Las pruebas hidrostáticas y de hermeticidad confirmaron que el sistema es seguro, estanco y apto para operar bajo las condiciones requeridas para alcanzar el estado supercrítico del CO<sub>2</sub>.

Se verificó el cumplimiento de las restricciones de diseño y la fabricación siguió las

recomendaciones establecidas por la normativa ASME Sección VIII. Con ello, se valida la preparación del sistema para pruebas funcionales con muestras reales.

### **Análisis de riesgos**

En el proceso de análisis del proyecto se identificó una serie de riesgos potenciales que podrían afectar su funcionamiento, seguridad y eficiencia. Para cada riesgo, se evaluó su probabilidad e impacto utilizando una matriz de clasificación de riesgos, en la cual se puede asignar un responsable para cada riesgo, el cual es encargado de priorizar y definir estrategias a estos problemas. Al adoptar este enfoque se garantiza un cuidado preventivo de posibles riesgos y una gestión eficiente, reduciendo posibles fallas y mejorando el trabajo en conjunto del equipo.

El método usado de la matriz de clasificación se basa en dos factores: el impacto y la probabilidad de ocurrencia. La probabilidad se califica en una escala del 1 al 5, donde 1 representa una baja probabilidad de que suceda y 5 indica una alta probabilidad de ocurrencia. De igual manera, el impacto se mide en una escala del 1 al 5, donde un valor bajo implica una afectación mínima y un valor alto representa consecuencias graves para el sistema. Al asignar un valor a los riesgos se los categorizan con un código de colores para facilitar su priorización: los riesgos de baja probabilidad y bajo impacto se marcan con color verde, los moderados con amarillo y los altos de color rojo.

Risk Assessment Control Measure		Severity				
		Negligible	Minor	Moderate	Major	Extreme
From 1 – 4 = Low Risk		1	2	3	4	5
From 5 – 10 = Med Risk						
From 12 – 25 = High Risk						
Likelihood (Probability)	Very Unlikely	1	2	3	4	5
	Rarely Occur	2	4	6	8	10
	Possible	3	6	9	12	15
	Likely Occur	4	8	12	16	20
	Occurs Frequently	5	10	15	20	25

Figura 40. Matriz de riesgos

Tabla 12. Matriz de riesgos.

N	Riesgos	Responsable	Probabilidad	Impacto	Prioridad	Decisión	Estatus	Observaciones
1	Maquinado de rosca en el cilindro de diferentes componentes (válvulas, manómetro, termómetro, ventana y compuerta).	Sebastián Reyes	2	5	10	Asegurar: Trabajar juntamente con personal que tenga experiencia.	Pendiente	Realizar según la norma necesaria y los cálculos realizados y priorizar usar uniones hembra para las conexiones
2	Que el sistema no llegue al punto crítico del CO <sub>2</sub> (temperatura y presión).	Kevin Fierro	2	5	10	Evitar: Ver alternativas o opciones de diseño.	Pendiente	Controlar que todos los parametros se cumplan en tiempo y forma

3	Fallas de fábrica en los componentes.	Sebastián Reyes	2	5	10	Asegurar: Trabajar juntamente con personal que tenga experiencia.	Pendiente	Fallas en la fabricación podría aumentar costos.
4	Retraso en importación de componentes (calentador, ventana).	Mateo Obando	2	4	8	Prepararse : Ver opciones de compra local o diseños alternativos.	Pendiente	Buscar proveedores para usarlos como respaldo
5	Gasificación del CO <sub>2</sub> en la cámara.	Kevin Fierro	2	4	8	Evitar: Monitoreo continuo del proceso.	Pendiente	Supervisión constante durante las pruebas.
6	Daño de muestras en el proceso de secado.	Mateo Obando	5	1	5	Prepararse : Implementar controles de calidad.	Pendiente	Realizar un control del funcionamiento y puesta en marca de la máquina
7	Fugas de presión en todo el sistema.	Nicolas Villacis	4	1	4	Mitigar: Implementar controles de calidad y normas para la hermeticidad.	Pendiente	Verificar la hermeticidad en pruebas iniciales.
8	Explosión debido a la presión elevada.	Mateo Obando	1	4	4	Mitigar: Realizar pruebas hidrostáticas.	Pendiente	Pruebas hidrostáticas según ASME 8 antes de usarse.
9	Riesgo económico (comprar	Mateo	2	2	4	Prepararse : Verificar cálculos y	Pendiente	Resguardar la integridad

	nuevamente componentes).	Obando				simulaciones para evitar daños		de los componentes
10	Riesgos operacionales en el manejo del sistema (presurización y despresurización).	Sebastián Reyes	1	4	4	Mitigar: Ajustar el diseño para reducir riesgos.	Pendiente	Tener cuidado en el manejo de presiones elevadas.
11	Inhalación de CO <sub>2</sub> por fugas en el tanque o critical point dryer.	Kevin Fierro	3	1	3	Prepararse : Ajustar el diseño para reducir riesgos.	Pendiente	Hacer las primeras pruebas al aire libre o en un lugar con ventilación.
12	Que los componentes no soporten las presiones indicadas.	Nicolas Villacis	1	3	3	Evitar: Trabajar con componentes que resistan más presión de la necesaria.	Pendiente	Verificar que los componentes y el cilindro resista la presión.

A continuación, se detallan los riegos:

### Descripción de los riesgos

**Maquinado de rosca en el cilindro de diferentes componentes (Válvulas, manómetro, termómetro y ventana, compuerta)**

*Tabla 13. Descripción de riesgo 1*

Número de riesgo	Riesgos	Responsable	Probabilidad	Impacto	Prioridad	Decisión	Estatus	Observaciones
1	Maquinado de rosca en el cilindro de diferentes componentes (válvulas, manómetro, termómetro, ventana y compuerta).	Sebastián Reyes	2	5	10	Asegurar: Trabajar juntamente con personal que tenga experiencia.	Pendiente	Realizar según la norma necesaria y los cálculos realizados y priorizar usar uniones hembra para las conexiones

Se requiere un maquinado preciso para asegurar un sellado correcto y evitar fugas en cada punto de conexión, se prevé un control dimensional riguroso para que de esta manera no existan errores que puedan aumentar los costos del CPD.

#### **Que el sistema no llegue al punto crítico del CO<sub>2</sub> (temperatura y presión)**

*Tabla 14. Descripción de riesgo 2*

Número de riesgo	Riesgos	Responsable	Probabilidad	Impacto	Prioridad	Decisión	Estatus	Observaciones
2	Que el sistema no llegue al punto crítico del CO <sub>2</sub> (temperatura y presión).	Kevin Fierro	2	5	10	Evitar: Ver alternativas o opciones de diseño.	Pendiente	Controlar que todos los parámetros se cumplan en tiempo y forma

Si no se cumplen las condiciones requeridas, el proceso supercrítico no ocurre y el

secado puede fallar. Se prevé monitorear los parámetros en tiempo real y ajustar las condiciones operativas según sea necesario.

### **Fallas de fábrica en los componentes**

*Tabla 15. Descripción de riesgo 3*

Número de riesgo	Riesgos	Responsable	Probabilidad	Impacto	Prioridad	Decisión	Estatus	Observaciones
3	Fallas de fábrica en los componentes.	Sebastián Reyes	2	5	10	Asegurar: Trabajar juntamente con personal que tenga experiencia.	Pendiente	Fallas en la fabricación podría aumentar costos.

Defectos de fabricación pueden ocasionar fallas inesperadas y comprometer la seguridad del sistema. Se inspeccionará los componentes antes de su instalación y verificará su correcto funcionamiento.

### **Retraso en importación de componentes (calentador, ventana)**

*Tabla 16. Descripción de riesgo 4*

Número de riesgo	Riesgos	Responsable	Probabilidad	Impacto	Prioridad	Decisión	Estatus	Observaciones
4	Retraso en importación de componentes (calentador, ventana).	Mateo Obando	2	4	8	Prepararse: Ver opciones de compra local o diseños alternativos.	Pendiente	Buscar proveedores para usarlos como respaldo

Los componentes clave pueden demorar en llegar, lo que atrasa la instalación y el inicio de pruebas, se contempla la búsqueda de proveedores locales en caso de que las piezas u instrumentos que pedimos desde el exterior tengan algún inconveniente.

## Gasificación del CO<sub>2</sub> en la cámara

*Tabla 17. Descripción de riesgo 5*

Número de riesgo	Riesgos	Responsable	Probabilidad	Impacto	Prioridad	Decisión	Estatus	Observaciones
5	Gasificación del CO <sub>2</sub> en la cámara.	Kevin Fierro	2	4	8	Evitar: Monitoreo continuo del proceso.	Pendiente	Supervisión constante durante las pruebas.

Al alcanzar el punto crítico, el CO<sub>2</sub> pasa rápidamente a estado gaseoso, modificando la presión en el interior. Se supervisará el control de temperatura y presión para evitar variaciones inesperadas.

## Daño de muestras en el proceso de secado

*Tabla 18. Descripción de riesgo 6*

Número de riesgo	Riesgos	Responsable	Probabilidad	Impacto	Prioridad	Decisión	Estatus	Observaciones
6	Daño de muestras en el proceso de secado.	Mateo Obando	5	1	5	Prepararse: Implementar controles de calidad.	Pendiente	Realizar un control del funcionamiento y puesta en marca de la máquina

Cambios bruscos de presión o temperatura pueden deteriorar las muestras y alterar sus propiedades. Se definirá un protocolo de secado adecuado para minimizar daños en las muestras.

## Fugas de presión en todo el sistema

*Tabla 19. Descripción de riesgo 7*

Número de riesgo	Riesgos	Responsable	Probabilidad	Impacto	Prioridad	Decisión	Estatus	Observaciones
7	Fugas de presión en todo el sistema.	Nicolas Villacis	4	1	4	Mitigar: Implementar controles de calidad y normas para la hermeticidad.	Pendiente	Verificar la hermeticidad en pruebas iniciales.

Cualquier fuga compromete la presión interna, pudiendo afectar la seguridad y el correcto funcionamiento. Se verificará la hermeticidad del sistema y realizará pruebas de presión para identificar posibles fugas.

## Explosión debido a la presión elevada

*Tabla 20. Descripción de riesgo 8*

Número de riesgo	Riesgos	Responsable	Probabilidad	Impacto	Prioridad	Decisión	Estatus	Observaciones
8	Explosión debido a la presión elevada.	Mateo Obando	1	4	4	Mitigar: Realizar pruebas hidrostáticas.	Pendiente	Pruebas hidrostáticas según ASME 8 antes de usarse.

Un aumento excesivo de la presión puede provocar fallas estructurales y causar explosiones peligrosas. Se asegurará de que las válvulas de seguridad funcionen correctamente y que la presión se mantenga dentro de los parámetros establecidos.

## Riesgo económico (comprar nuevamente componentes)

*Tabla 21. Descripción de riesgo 9*

Número de riesgo	Riesgos	Responsable	Probabilidad	Impacto	Prioridad	Decisión	Estatus	Observaciones
9	Riesgo económico (comprar nuevamente componentes).	Mateo Obando	2	2	4	Prepararse: Verificar cálculos y simulaciones para evitar daños	Pendiente	Resguardar la integridad de los componentes

Tener que sustituir partes costosas aumenta el presupuesto y retrasa el proyecto. Se llevará un control de calidad en la adquisición de componentes para evitar compras innecesarias.

#### **Riesgo operacional de manejo del sistema (presurización y despresurización)**

*Tabla 22. Descripción de riesgo 10*

Número de riesgo	Riesgos	Responsable	Probabilidad	Impacto	Prioridad	Decisión	Estatus	Observaciones
10	Riesgos operacionales en el manejo del sistema (presurización y despresurización).	Sebastián Reyes	1	4	4	Mitigar: Ajustar el diseño para reducir riesgos.	Pendiente	Tener cuidado en el manejo de presiones elevadas.

Un control inadecuado en la presión eleva la probabilidad de accidentes durante la operación. Se capacitará al personal en los procedimientos adecuados de presurización y despresurización.

#### **Inhalación de CO2 por fugas en tanque**

*Tabla 23. Descripción de riesgo 11*

Número de riesgo	Riesgos	Responsable	Probabilidad	Impacto	Prioridad	Decisión	Estatus	Observaciones
11	Inhalación de CO <sub>2</sub> por fugas en el tanque o critical point dryer.	Kevin Fierro	3	1	3	Prepararse: Ajustar el diseño para reducir riesgos.	Pendiente	Hacer las primeras pruebas al aire libre o en un lugar con ventilación.

La liberación de CO<sub>2</sub> al ambiente puede ser riesgosa para el operador, requiriendo ventilación y protección adecuada. Se verificará la correcta instalación de sellos y garantizará una adecuada ventilación en el área de trabajo.

#### **Que los componentes no soporten las presiones indicadas**

*Tabla 24. Descripción de riesgo 12*

Número de riesgo	Riesgos	Responsable	Probabilidad	Impacto	Prioridad	Decisión	Estatus	Observaciones
12	Que los componentes no soporten las presiones indicadas.	Nicolas Villacis	1	3	3	Evitar: Trabajar con componentes que resistan más presión de la necesaria.	Pendiente	Verificar que los componentes y el cilindro resista la presión.

La insuficiente resistencia de piezas clave puede provocar rupturas y accidentes graves. Se validará que los materiales y componentes utilizados cumplan con las especificaciones técnicas necesarias especificadas antes de adquirirlos.

Por lo tanto, el análisis y gestión de riesgos en un sistema es esencial para garantizar su operatividad y seguridad, ya que cada posible falla puede desencadenar consecuencias significativas en el rendimiento y costos del proyecto. La precisión en el maquinado y la inspección de componentes minimizan errores estructurales que podrían comprometer la hermeticidad y funcionamiento del sistema. Asimismo, la estabilidad de temperatura y presión en el CO<sub>2</sub> es crítica, pues cualquier desviación podría afectar el proceso supercrítico y la integridad de las muestras. La dependencia de importaciones añade un factor de incertidumbre que exige alternativas locales, mientras que la gasificación no controlada y las fugas representan riesgos tanto operacionales como de seguridad. La posibilidad de explosión debido a una presión elevada resalta la importancia de válvulas de seguridad bien calibradas, al igual que la capacitación del personal en procedimientos de presurización y despresurización es clave para evitar fallos humanos. Finalmente, la resistencia de los materiales y un control de calidad riguroso no solo previenen fallos catastróficos, sino que también evitan gastos innecesarios en reposiciones. Un enfoque preventivo con responsables designados permite una gestión eficiente de estos riesgos, asegurando un sistema más seguro, estable y rentable.

### **Manual de operación y mantenimiento**

Véase en el Anexo C y D

### **Resultados principales y discusión**

El resultado principal esperado del proyecto fue la validación funcional del sistema de secado por punto crítico (SPC) diseñado, comprobando su capacidad de llevar dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) a su estado supercrítico y utilizar este medio para deshidratar muestras biológicas sin provocar colapsos estructurales. Este tipo de secado es crucial en aplicaciones que requieren el análisis detallado de estructuras microanatómicas mediante microscopía electrónica de barrido

(SEM), ya que los métodos convencionales suelen producir distorsiones por tensión superficial durante la evaporación del líquido.

Para demostrar esta capacidad, se realizó una comparación experimental entre el secado por lámpara (convencional) y el secado por punto crítico, usando como muestras biológicas:

- Alas de *Aedes aegypti*, insecto de interés médico
- Cabeza y patas de abeja (*Apis mellifera*), insecto con estructuras finas y sensibles a la deformación

Se tomaron dos muestras de cada parte mencionada. La primera se sometió a un secado convencional al aire mediante una lámpara incandescente, mientras que la segunda fue tratada con el sistema SPC. En este se reemplaza el agua del tejido por etanol y luego por CO<sub>2</sub> líquido, antes de realizar el proceso de secado por punto crítico que parte cuando el sistema llega a 31 °C y 1070 psi.

Una vez que se completaron ambos procesos de secado con las muestras, todas fueron observadas bajo el SEM para evaluar su morfología y la preservación de detalles estructurales.

#### **Alas de *Aedes aegypti* Secado por Punto Crítico con CO<sub>2</sub>:**

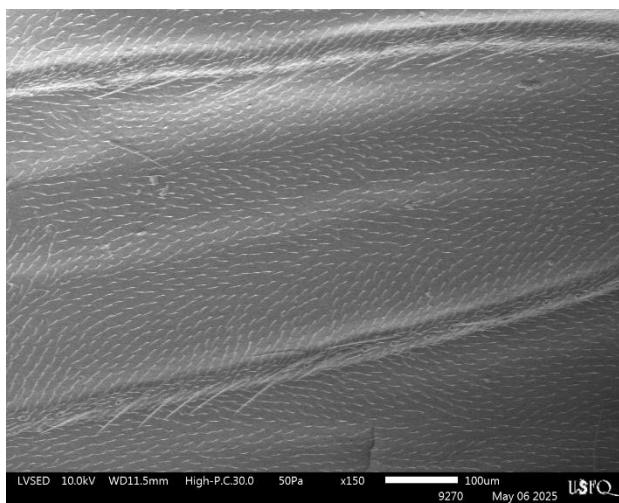


Figura 41. Alas de *Aedes aegypti* en 150x.

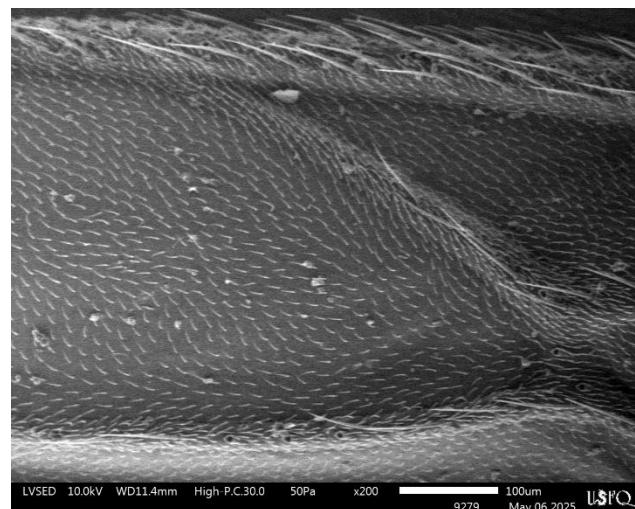


Figura 42. Alas de *Aedes aegypti* en 200x.

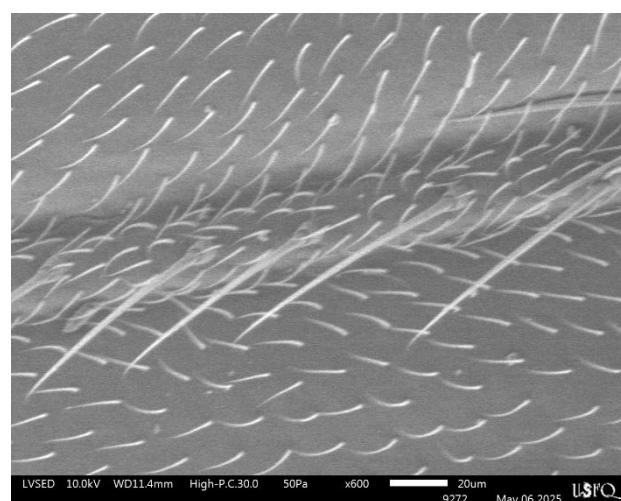


Figura 43. Alas de *Aedes aegypti* en 600x.

#### Alas de *Aedes aegypti* Secado por Calor:

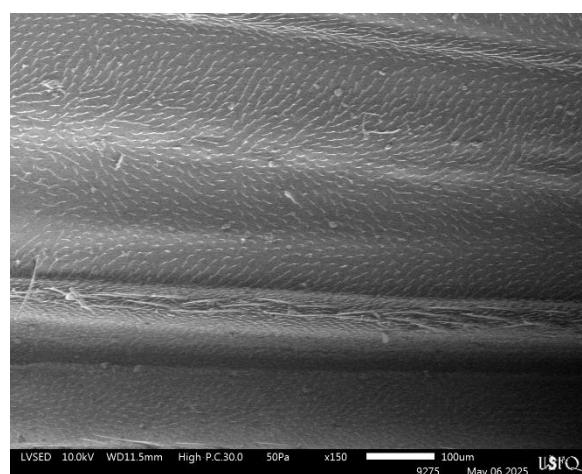


Figura 44, Alas de Aedes aegypti secadas por calor en 150x.

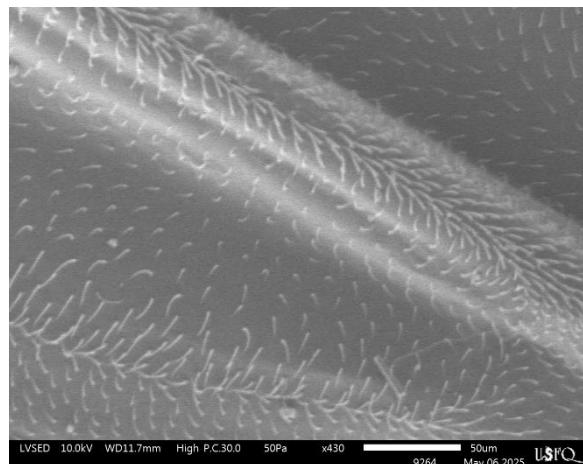


Figura 45. Alas de Aedes aegypti secadas por calor en 430x.

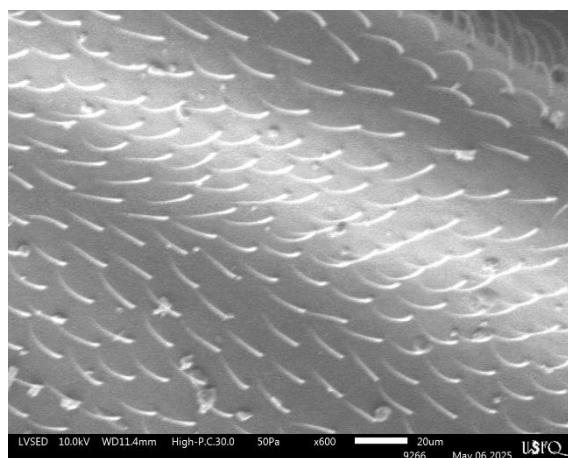


Figura 46. Alas de Aedes aegypti secadas por calor en 600x.

**Comparativa de ambos secados en alas de Aedes Aegypti en misma magnificación y ubicación**

Siendo la imagen A (secado por calor) e imagen B (Secado por punto crítico):

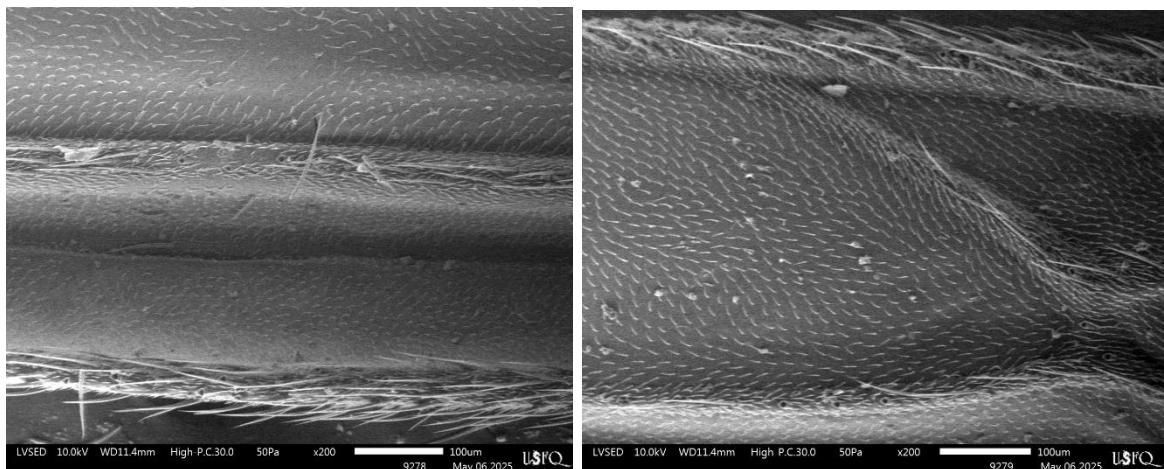


Figura 47. Secado al aire vs Secado por punto Crítico.

En el presente análisis se realizó una comparación morfológica entre las muestras de *Aedes Aegypti* tratadas mediante dos métodos de secado: secado con lámpara de calor y secado por punto crítico (SPC), ambas observadas bajo microscopía electrónica de barrido (SEM) a 200 aumentos.

En la muestra sometida a secado con lámpara (Imagen A), se evidencian alteraciones notables en la estructura superficial del insecto. La cutícula presenta zonas con colapsos parciales y fisuras, indicativos de una deshidratación rápida que generó tensiones superficiales no controladas. Las escamas se encuentran desorganizadas, algunas levantadas o desplazadas de su posición natural, lo cual sugiere deformaciones debidas al estrés mecánico generado durante la evaporación acelerada del agua. Además, se observan artefactos y residuos en la superficie, que dificultan la interpretación morfológica fina y reducen el contraste general de la imagen.

En contraste, la muestra procesada mediante secado por punto crítico (Imagen B) muestra una conservación estructural significativamente superior. La cutícula se mantiene íntegra, sin evidencia de colapsos, fisuras ni artefactos asociados al secado. Las microestructuras superficiales, como las escamas y setas, se encuentran ordenadas y conservan

su orientación original, lo que permite una observación clara y precisa de los detalles morfológicos. El contraste en la imagen es óptimo, lo que refleja una superficie limpia y sin residuos.

**Patas de *Apis mellifera* Secado por Punto Crítico:**

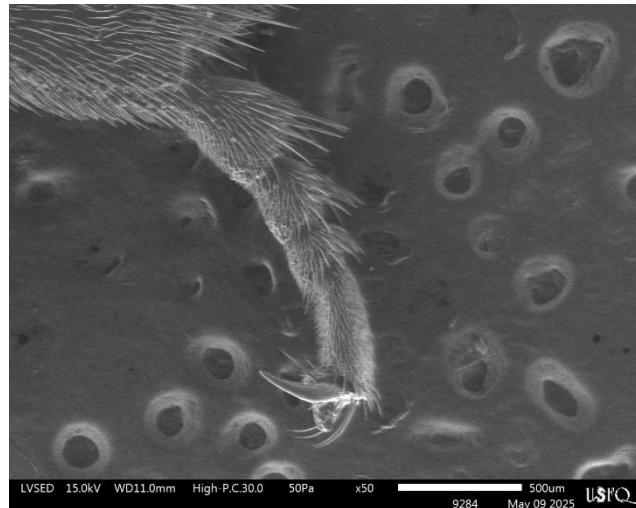


Figura 48 Pata de *Apis mellifera* en 50x

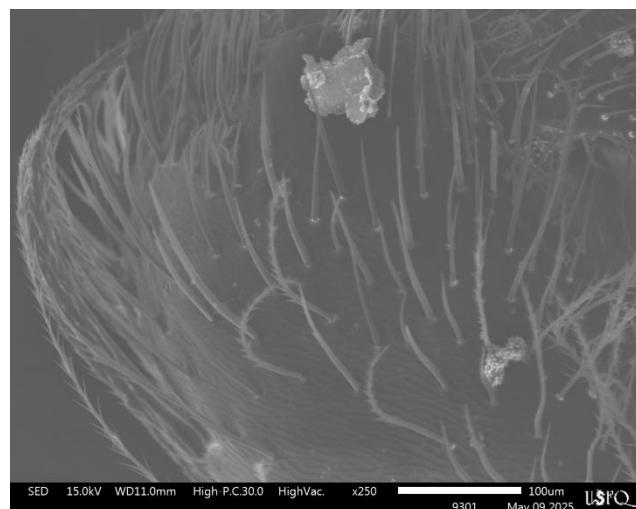


Figura 49 Pata de *Apis mellifera* en 250x

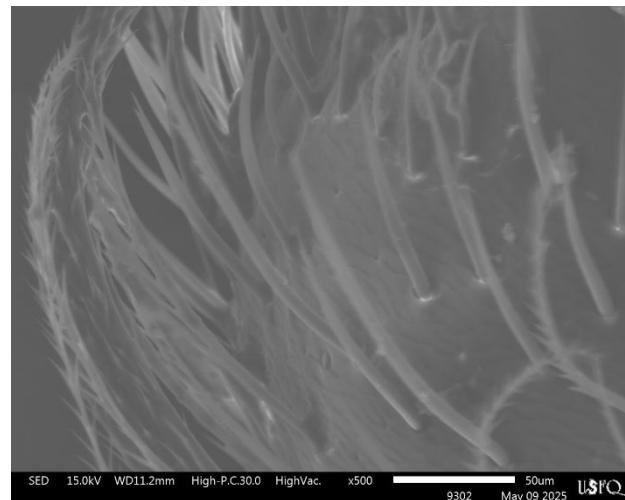


Figura 50 Pata de *Apis mellifera* en 500x

**Patas de *Apis mellifera* Secado por Calor:**

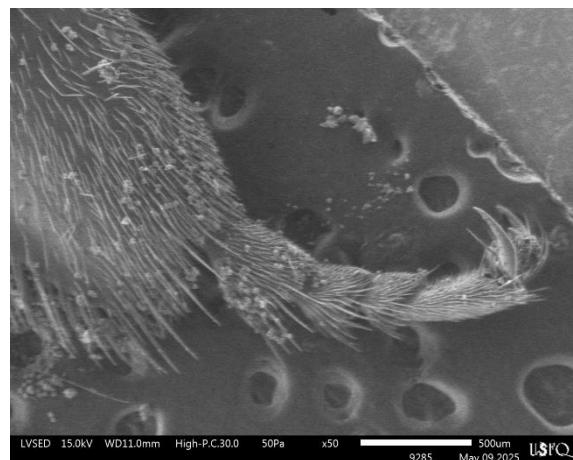


Figura 51 Pata de *Apis mellifera* en 50x

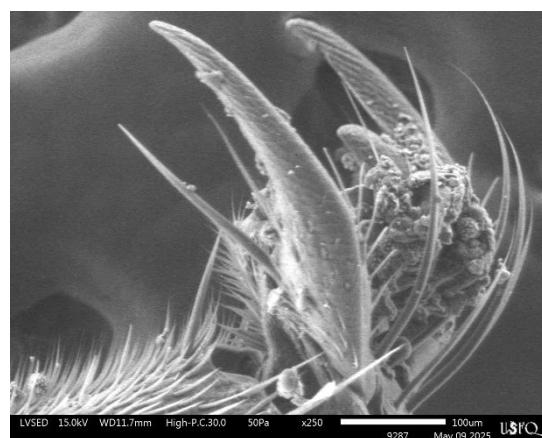


Figura 52 Pata de *Apis mellifera* en 250x

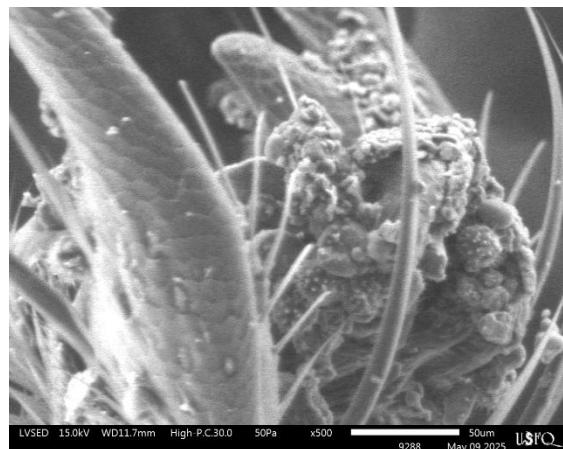


Figura 53 Pata de *Apis mellifera* en 500x

### Comparativa de ambos secados de Patas de *Apis mellifera* en misma magnificación y ubicación

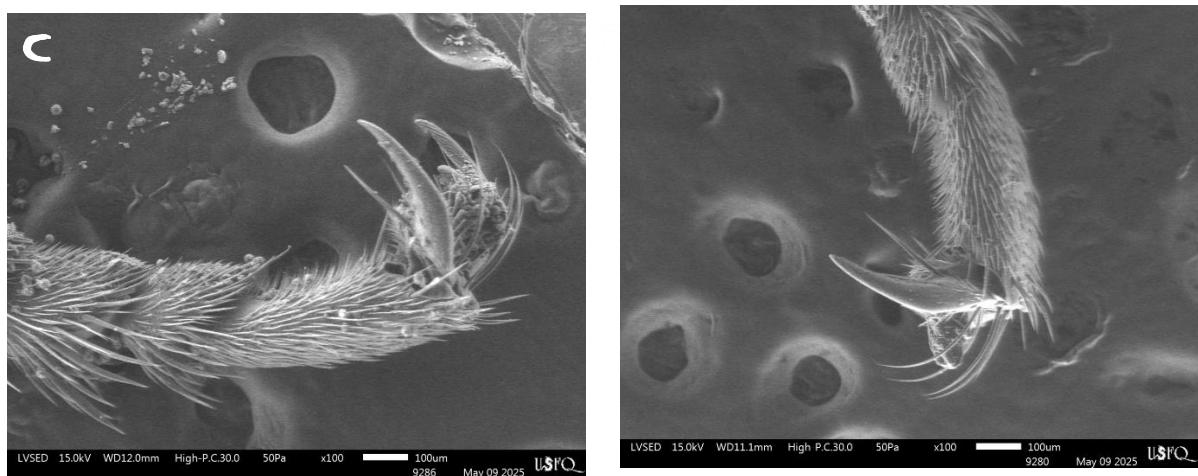


Figura 54 Pata de *Apis mellifera* (Secado por punto crítico vs Secado en calor

En esta comparación se analizaron patas de *Apis mellifera* preparadas para SEM mediante secado por punto crítico (Imagen C) y secado por calor (Imagen D), ambas observadas a 100 aumentos.

En la muestra tratada con secado por punto crítico, se evidencia una preservación morfológica óptima. Las estructuras especializadas como espinas, setas y uñas están íntegras y

bien definidas, sin indicios de colapso, pérdida de rigidez o deformaciones. Las superficies cuticulares presentan una textura homogénea y libre de impurezas, lo cual facilita un análisis morfológico claro y detallado.

Por el contrario, en la muestra secada por calor (Imagen D) se aprecian deformaciones notorias, como la adherencia parcial de estructuras filamentosas a la cutícula, debilitamiento de las espinas y alteración de la forma original de las uñas. Además, resalta de manera significativa la presencia de residuos y partículas adheridas a la superficie, los cuales no solo afectan la visibilidad de detalles finos, sino que también podrían ser interpretados erróneamente como parte de la morfología. Estos residuos son evidencia directa de una preparación inadecuada o agresiva, asociada a las tensiones superficiales generadas durante el secado térmico. La textura general de la cutícula aparece menos definida, y con zonas aplanadas, lo que compromete la fidelidad estructural de la muestra.

Finalmente se realizó la visualización en SEM de la cabeza de *Apis mellifera* secada en punto crítico y secada por calor. Se prepararon muestras de cabezas de *Apis mellifera* con el objetivo de comparar los efectos de dos métodos de secado sobre la integridad morfológica de las estructuras superficiales, en especial las del ojo compuesto. ambas muestras fueron recubiertas con una delgada capa conductora de oro para su observación en el microscopio electrónico de barrido (SEM). El análisis permitió visualizar diferencias claras en la preservación estructural: en las muestras secadas por SPC se conservaron adecuadamente los omatidios y otras microestructuras, sin colapsos ni residuos visibles.

#### **Cabeza de *Apis mellifera* Secado por punto crítico:**



Figura 55 Cabeza de *Apis mellifera*

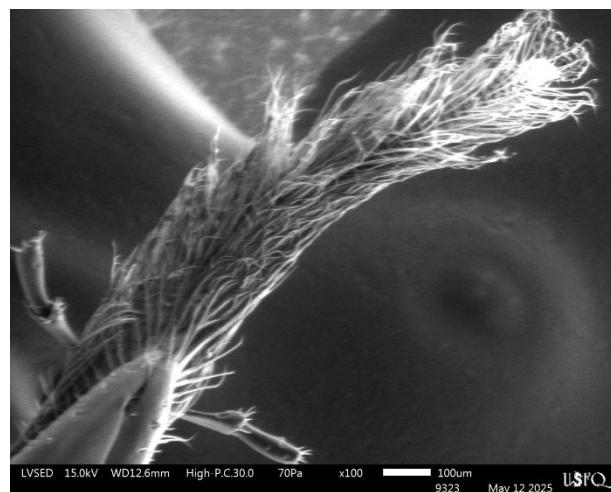


Figura 56 Probóscide de *Apis mellifera*

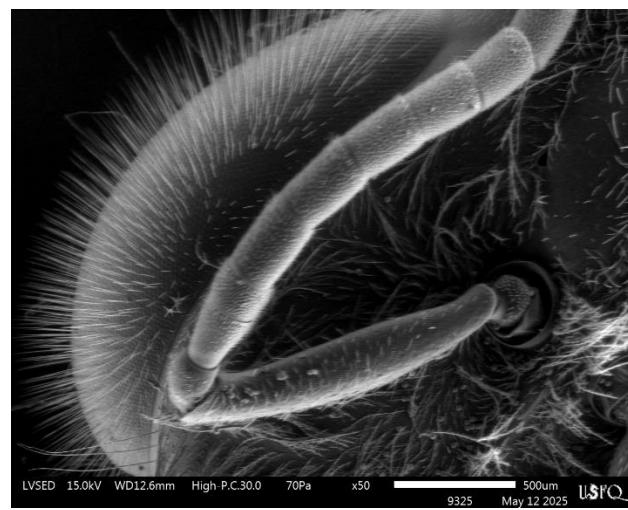
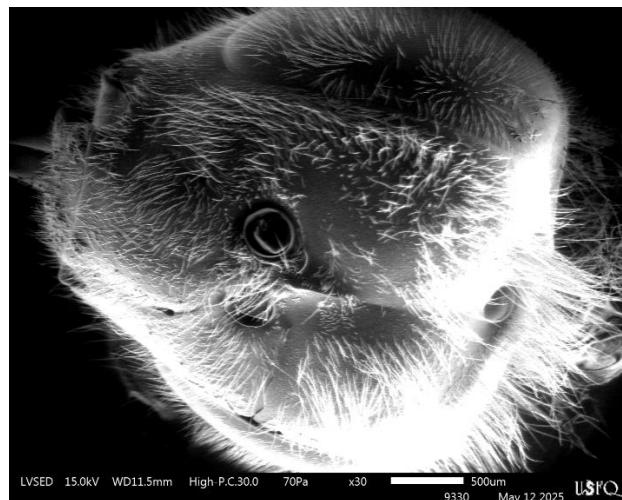
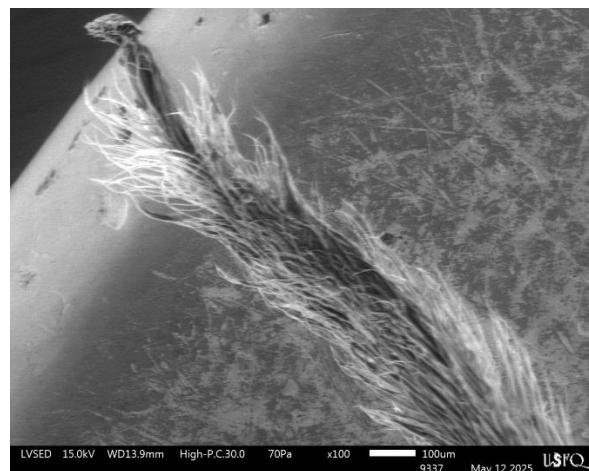
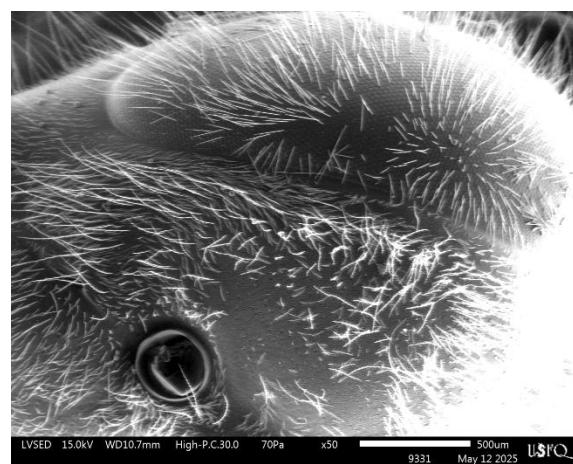


Figura 57 Ojo de *Apis mellifera*

**Cabeza de *Apis mellifera* Secado por Calor:**Figura 58 Cabeza de *Apis mellifera*Figura 59 Probóscide de *Apis mellifera*Figura 60 Ojo de *Apis mellifera*

## Comparativa de ambos secados de ojos de *Apis mellifera* en misma magnificación y ubicación

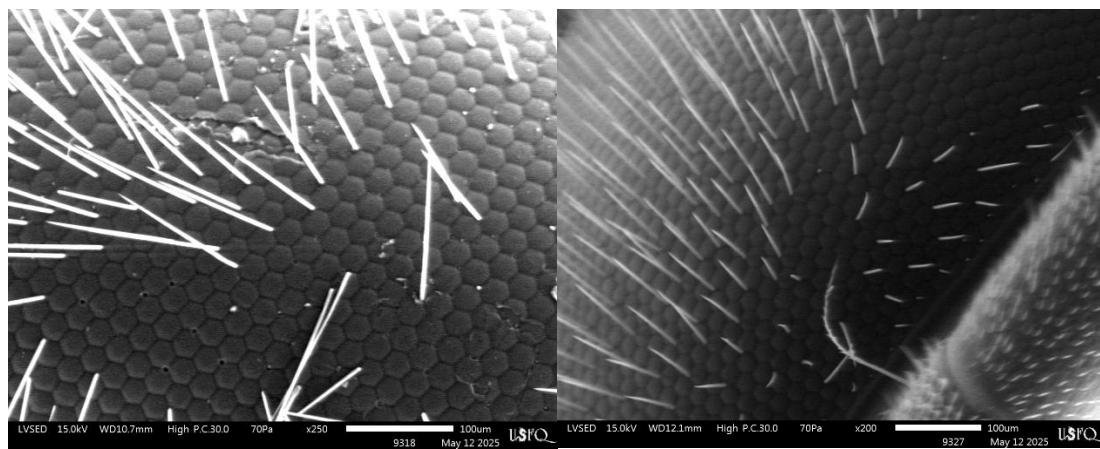


Figura 61 Ojos de *Apis melifera* secado en calor vs secado en punto crítico

Se realizó un análisis morfológico mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) de la superficie ocular de *Apis mellifera*, empleando dos métodos distintos de secado: uno por calor mediante lámpara y otro por punto crítico. En la muestra secada por calor, se observan irregularidades en la estructura de los omatidios, con colapsos parciales, deformaciones visibles y presencia de residuos adheridos a la superficie. Además, las setas sensoriales presentan una distribución desorganizada, algunas de ellas dobladas o caídas, lo que sugiere que las fuerzas de tensión superficial durante el proceso de evaporación afectaron negativamente la integridad estructural del tejido.

En contraste, la muestra tratada mediante secado por punto crítico muestra una conservación mucho más precisa de la morfología original. Los omatidios mantienen su forma hexagonal uniforme, sin evidencia de distorsión o colapso, y las setas sensoriales se mantienen erguidas y bien distribuidas. Este resultado evidencia que el secado por punto crítico, al evitar las tensiones generadas en la interfaz líquido-gas, permite preservar con mayor fidelidad las estructuras delicadas del tejido biológico, siendo por tanto el método más adecuado para la preparación de muestras destinadas a estudios SEM de alta resolución.

## Conclusiones

El desarrollo del prototipo de Secador de Punto Crítico (SPC) permitió alcanzar todos los objetivos establecidos al inicio del proyecto, que consistían en diseñar, fabricar y validar un equipo accesible, seguro y funcional para la preservación estructural de muestras biológicas mediante el secado con CO<sub>2</sub> en estado supercrítico. El equipo construido cumplió con todos los requerimientos técnicos, como operar a presiones superiores a 1070 psi y alcanzar temperaturas necesarias para el estado supercrítico del fluido, manteniendo la integridad y hermeticidad del sistema. Durante las pruebas experimentales, el prototipo logró superar de manera satisfactoria la prueba hidrostática, alcanzando una presión de 1400 psi sin presentar deformaciones. De la misma manera, el sistema superó exitosamente la prueba de hermeticidad, sin presentar fugas en las juntas roscadas. Además, el diseño fue validado mediante cálculos que garantizan un factor de seguridad elevado, lo cual respalda la durabilidad y robustez del sistema.

La selección y uso de una cámara de acero inoxidable 316, un calentador tipo banda con control manual y un diseño a partir de componentes totalmente mecánicos permite reducir los costos significativamente frente a las opciones que se pueden encontrar comercialmente, mientras se mantiene el rendimiento necesario para que el secador funcione de manera adecuada y precisa. El prototipo también fue evaluado ergonómicamente y permite una manipulación eficiente y segura del proceso, con posibilidades futuras de automatización e integración con tecnologías IoT. El proyecto demuestra que es viable desarrollar un sistema SPC funcional con recursos relativamente limitados, lo que abre las puertas a su implementación en laboratorios académicos y de investigación. Los resultados más relevantes obtenidos en las pruebas del prototipo validan tanto el diseño estructural como la funcionalidad

operativa del sistema, indicando que este cumple con todos los estándares como ASME VIII e ISO 3601.

### **Trabajos a Futuro**

El sistema de secado por punto crítico desarrollado ha demostrado ser funcional y cumplir con todos los objetivos establecidos, sin embargo, existen oportunidades de mejora que podrían ser consideradas en futuras etapas del proyecto para poder optimizar su desempeño, seguridad y facilidad de uso.

Una primera mejora identificada está relacionada con la implementación de una válvula de seguridad. En el diseño actual, uno de los agujeros roscados del cilindro permanece cerrado mediante un tapón metálico. Esto es debido a que en el código ASME VIII para cilindros a presión se establece en los parámetros de diseño la presencia de una válvula de seguridad. Este punto fue previsto originalmente para albergar dicha válvula de alivio de presión que sea capaz de actuar automáticamente en caso de sobrepresión dentro de la cámara. La instalación futura de este componente es fundamental para aumentar el nivel de seguridad del sistema, especialmente durante pruebas con usuarios no especializados o en escenarios de operación continua. Además, es preciso cumplir con las normativas estándar de diseño que se establecen. La válvula que se propone colocar es “VALVULA ALIVIO 1/2” M-H SS316 6000 PSI SET 5000 A 6000 PSI”, cotizada en la empresa Servivapor o similares.



Figura 62. Valvula de alivio.

Por otro lado, durante las pruebas de funcionamiento se evidenció que el tiempo requerido para alcanzar la temperatura crítica del CO<sub>2</sub> a 31°C es relativamente largo, debido a la potencia limitada de la chaqueta térmica actual de 100 W. Para reducir significativamente este tiempo y hacer que el sistema funcione de manera más eficiente energéticamente, se plantea como mejora el uso de una chaqueta térmica de mayor potencia o en su defecto, se puede optar por la implementación de aislamiento térmico externo, utilizando materiales refractarios o espumas aislantes de alta temperatura para minimizar las pérdidas de calor hacia el ambiente y que la transferencia de calor se produzca con mayor eficiencia hacia el interior de la cámara donde se almacena el CO<sub>2</sub>.

Finalmente, una línea de desarrollo particularmente relevante para el futuro del sistema es su automatización, ya sea de forma parcial o total. Esta evolución permitiría no solo simplificar su operación, sino también aumentar la precisión del proceso de secado, haciéndolo más confiable y reproducible.

Entre las mejoras que podrían implementarse, se considera el reemplazo de las válvulas manuales por electroválvulas, lo cual permitiría controlar con mayor exactitud el ingreso y la liberación del CO<sub>2</sub>, regulando tiempos y caudales de forma programada. Asimismo, la incorporación de sensores digitales, como un termómetro y manómetro con lectura electrónica, permitiría llevar un registro continuo de las variables críticas, además de activar alarmas si se superan ciertos límites de seguridad. Complementariamente, se plantea el diseño de un sistema de control embebido, basado en tecnologías accesibles como microcontroladores (Arduino) o autómatas programables compactos (PLC), que podrían encargarse de automatizar el calentamiento, monitorear las condiciones internas del sistema y ejecutar ciclos completos de secado con mínima intervención del operador.

## Referencias

- Anderson, T. F. (1951). Techniques for the preservation of three-dimensional structures in preparing specimens for the electron microscope. *Transactions of the New York Academy of Sciences*, 13(4), 130–134.
- Boyde, A., & Tamarin, A. (1984). Improvement to critical point drying technique for SEM. *Scanning*, 6(2), 30-35. <https://doi.org/10.1002/sca.4950060204>
- Bray, D. F. (2008). Critical point drying of biological specimens for scanning electron microscopy. In *Methods in Molecular Biology* (Vol. 235, pp. 235-243). Humana Press. <https://doi.org/10.1385/1-59259-030-6:235>
- Cagle, G. D. (1974). Critical-point drying: Rapid method for the determination of bacterial extracellular polymer and surface structures. *Applied Microbiology*, 28(2), 312-316.
- Chirino, O. S., Escobar, A. I., Camps, C. E., & García, E. J. I. (2000). Design and fabrication of a chamber for the deposit of thin films by laser ablation; Diseño y fabricación de una cámara para el depósito de películas delgadas por ablación láser. *México*.
- Eleftherios, S., Wahl, D. A., Triffitt, J. T., & Czernuszka, J. T. (2008). The impact of critical point drying with liquid carbon dioxide on collagen–hydroxyapatite composite scaffolds. *Acta Biomaterialia*, 4(5), 1322-1331. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2008.03.016>
- Goldstein, J., Newbury, D. E., Joy, D. C., Lyman, C. E., Echlin, P., Lifshin, E., Sawyer, L., & Michael, J. R. (2003). *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis*. Springer.
- International Organization for Standardization. (2012). *ISO 3601-1:2012 - Fluid power systems — O-rings — Part 1: Inside diameters, cross-sections, tolerances and designation codes*. ISO.

- International Organization for Standardization. (2013). *ISO 4126-1:2013 - Safety devices for protection against excessive pressure – Part 1: Safety valves*. ISO.
- Kang, K.-Y., Hwang, K.-R., Park, J.-Y., Lee, J.-P., Kim, J.-S., & Lee, J.-S. (2018). Critical point drying: An effective drying method for direct measurement of the surface area of a pretreated cellulosic biomass. *Polymers*, 10(6), 676. <https://doi.org/10.3390/polym10060676>
- Leica EM CPD300 Critical Point Dryer. (2020). *Technical Documentation*.
- Prin, J. L., González, N., Villarroel, H., Ramírez, M., & Rojas de Gáscue, B. (2012). El secado de punto crítico (SPC) como técnica aplicada en la preparación de geles de POLI (acrilamida-co-ácido acrílico) por microscopía electrónica de barrido. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, S5, 20-23.
- Rizwan, A., El-Boubou, K., & Boudjelal, M. (2021). An easy, fast and inexpensive method of preparing a biological specimen for scanning electron microscopy (SEM). *MethodsX*, 8, 101521. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2021.101521>
- Sánchez Borja, S. V. (2020). *Construcción y prueba de un prototipo a escala de laboratorio de un secador por CO<sub>2</sub> subcrítico con control de temperatura* [Tesis de grado, Universidad Técnica de Ambato].
- The American Society of Mechanical Engineers. (2003). *ASME B1.1-2003: Unified Inch Screw Threads (UN and UNR Thread Form)*. ASME.
- The American Society of Mechanical Engineers. (2004). *ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1: Rules for Construction of Pressure Vessels*. The American Society of Mechanical Engineers.

Universidad Simón Bolívar. (2012). *Memorias del III Taller de Biodegradación “Biomateriales y Nuevas Tendencias”*. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, S5, 20-23.

Wang, T., Zhan, D., Wu, W., Hou, Y., Wu, X., & Wang, Y. (2024). Optimal working conditions and energy economic analysis of closed trans-critical CO<sub>2</sub> heat pump drying system. *Applied Thermal Engineering*, 262, 125260. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.125260>

**Anexos:**

## Anexo A: Ponderaciones criterios ingenieriles

Posibles diseños SPC

### 1.- Evaluación del peso específico de cada criterio

DISCUSIÓN

Facilidad de manufactura > Costo de fabricación > Estética > Fácil manejo del sistema

CRITERIO	Costo de fabricación	Facilidad de manufactura	Estetica	Fácil manejo del sistema	Suma+1	Ponderado del Criterio
Costo de fabricación			0	1	1	3 0,3
Facilidad de manufactura		1		1	1	4 0,4
Estética	0		0		1	2 0,2
Fácil manejo del sistema	0		0		1	0,1
					10	1

### 2.- Evaluación del peso específico del criterio 1: Costo de fabricación

DISCUSIÓN -Evaluación de cuál de las alternativas tiene menor peso

solución C > solución B > solución A

CRITERIO	Solución A	Solución B	Solución C	Suma+1	Ponderado de la Calificación
Solución A			0	1	2 0,33
Solución B		1		1	3 0,50
Solución C	0		0	1	0,17
				6	1,00

### 3.- Evaluación del peso específico del criterio 2: Facilidad de manufactura

DISCUSIÓN -Evaluación de cuál de las alternativas es más fácil/flexible de regular

solución B > solución A > solución C

CRITERIO	Solución A	Solución B	Solución C	Suma+1	Ponderado de la Calificación
Solución A			0	1	2 0,33
Solución B		1		1	3 0,50
Solución C	0		0	1	0,17
				6	1,00

### 4.- Evaluación del peso específico del criterio 3: Estética

DISCUSIÓN -Evaluación de cuál de las alternativas es más fácil/flexible de mantener (falla menos)

solución B > solución A > solución C

CRITERIO	Solución A	Solución B	Solución C	Suma+1	Ponderado de la Calificación
Solución A			0	1	2 0,29
Solución B		1		0	2 0,29
Solución C	1		1	3	0,43
				7	1,00

### 5.- Evaluación del peso específico del criterio 4: Fácil manejo del sistema

DISCUSIÓN -Evaluación de cuál de las alternativas es más barata

solución C > solución B > solución A

CRITERIO	Solución A	Solución B	Solución C	Suma+1	Ponderado de la Calificación
Solución A			0	0	1 0,17
Solución B		1		0	2 0,33
Solución C	1		1	3	0,50
				6	1,00

Tabla 25. Posibles diseños SPC.

## Sistemas de calentamiento para el SPC

### 1.- Evaluación del peso específico de cada criterio

DISCUSIÓN

Implementación > precisión > precio moderado > estética

CRITERIO	Precision	Precio moderado	Estetica	Implementacion	Suma+1	Ponderado del Criterio
Precisión		1	1	0	3	0,3
Precio moderado	0		1	0	2	0,2
Estética	0	0		0	1	0,1
Implementación	1	1	1		4	0,4
					10	1

### 2.- Evaluación del peso específico del criterio 1: Precisión

DISCUSIÓN - Evaluación de cuál de las alternativas tiene menor peso

solución B > solución A > solución C

CRITERIO	Solución A	Solución B	Solución C	Suma+1	Ponderado de la Calificación
Solución A		0	1	2	0,33
Solución B	1		1	3	0,50
Solución C	0	0		1	0,17
				6	1,00

### 3.- Evaluación del peso específico del criterio 2: Precio moderado

DISCUSIÓN - Evaluación de cuál de las alternativas es más fácil/flexible de regular

solución A > solución B > solución C

CRITERIO	Solución A	Solución B	Solución C	Suma+1	Ponderado de la Calificación
Solución A		1	1	3	0,50
Solución B	0		1	2	0,33
Solución C	0	0		1	0,17
				6	1,00

### 4.- Evaluación del peso específico del criterio 3: Estética

DISCUSIÓN - Evaluación de cuál de las alternativas es más fácil/flexible de mantener (falla menos)

solución A > solución B > solución C

CRITERIO	Solución A	Solución B	Solución C	Suma+1	Ponderado de la Calificación
Solución A		1	1	3	0,50
Solución B	0		1	2	0,33
Solución C	0	0		1	0,17
				6	1,00

### 5.- Evaluación del peso específico del criterio 4: Implementación

DISCUSIÓN - Evaluación de cuál de las alternativas es más barata

solución A > solución B > solución C

CRITERIO	Solución A	Solución B	Solución C	Suma+1	Ponderado de la Calificación
Solución A		1	1	3	0,50
Solución B	0		1	2	0,33
Solución C	0	0		1	0,17
				6	1,00

Tabla 26. Sistemas de calentamiento para el SPC.

## Anexo B: Calculos principales

### Cálculo del Espesor

#### 1. Datos Iniciales

Presión interna: 1070 psi = 7,38MPa (Pi)

Presión externa: 0,101 MPa (presión atmosférica) (Po)

Para garantizar la resistencia del cilindro ante las cargas de presión interna, se asumió un espesor inicial de 17.5 mm. Esto debido a que con este margen ya se tiene espacio suficiente para ubicar el calentador y además se asegura un diseño estructural seguro y funcional sin desperdiciar material en exceso.

#### 1. Datos Iniciales

Presión interna: 1070 psi = 7,38MPa (Pi)

Presión externa: 0,101 MPa (presión atmosférica) (Po)

Para garantizar la resistencia del cilindro ante las cargas de presión interna, se asumió un espesor inicial de 17.5 mm. Esto debido a que con este margen ya se tiene espacio suficiente para ubicar el calentador y además se asegura un diseño estructural seguro y funcional sin desperdiciar material en exceso.

Espesor =  $t = 0,0175 \text{ m}$

Radio interno:  $r_i = 0,035 \text{ m}$

Radio externo del cilindro =  $r_o = 0,0525$

El valor del esfuerzo máximo se obtiene de la ficha técnica del acero inoxidable 316. En este caso se utiliza (Ficha Técnica del Acero Inoxidable 316/316L, EUROPER), ya que es una marca comercial común en el Ecuador. El valor obtenido es de 240 Mpa

#### 2. Cálculo del Espesor del Cilindro

Según libro de diseño mecánico Shigley Mechanical Engineering Design la sección 3-14 stresses in pressurized cylinders los recipientes sometidos a altas presiones

desarrollan esfuerzos radiales, tangenciales y longitudinales. Para determinar la tensión radial, tangencial y longitudinal se usa la ecuación 3-49:

$$\sigma_t = \frac{P_{iri}^2 - P_{oro}^2 - \frac{ri^2 ro^2 (Po - Pi)}{r^2}}{ro^2 - ri^2}$$

$$\sigma_r = \frac{P_{iri}^2 - P_{oro}^2 + \frac{ri^2 ro^2 (Po - Pi)}{r^2}}{ro^2 - ri^2}$$

$$\sigma_l = \frac{piri^2}{ro^2 - ri^2}$$

Se reemplaza  $r=ri$  que se desea conocer el esfuerzo que soporta la pared interna del cilindro, siendo que la presión interna es considerablemente superior a la externa:

$$\sigma_t = \frac{P_{iri}^2 - P_{oro}^2 - \frac{ri^2 ro^2 (Po - Pi)}{ri^2}}{ro^2 - ri^2}$$

$$\sigma_r = \frac{P_{iri}^2 - P_{oro}^2 + \frac{ri^2 ro^2 (Po - Pi)}{ri^2}}{ro^2 - ri^2}$$

$$\sigma_l = \frac{piri^2}{ro^2 - ri^2}$$

Por lo tanto, se calculan los tres esfuerzos que se presentan al tener una presión interna y externa en un cilindro:

Esfuerzo Tangencial:

$$\sigma_t = \frac{P_{iri}^2 - P_{oro}^2 - \frac{ri^2 ro^2 (Po - Pi)}{ri^2}}{ro^2 - ri^2}$$

$\sigma_t$

$$= \frac{7,38 \text{ MPa} * 35 \text{ mm}^2 - 0,101 \text{ MPa} * 52,5 \text{ mm}^2 - \frac{35 \text{ mm}^2 * 52,5 \text{ mm}^2 * (0,101 \text{ MPa} - 7,38 \text{ MPa})}{35 \text{ mm}^2}}{52,5^2 - 35^2}$$

$$\sigma_t = \frac{9030,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}} - 278,38 \frac{\text{N}}{\text{mm}} + 27574,5 \text{ MPa}}{1531,25 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma_t = \frac{36326,62 \text{ N/mm}^2}{1531,25 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma_t = 23,72 \text{ MPa}$$

Esfuerzo Radial:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{Pir_i^2 - Por_o^2 + \frac{ri^2ro^2(Po - Pi)}{ri^2}}{ro^2 - ri^2} \\ &= \frac{7,38 \text{ MPa} * 35\text{mm}^2 - 0,101 \text{ Mpa} * 52,5\text{mm}^2 + \frac{35\text{mm}^2 * 52,5\text{mm}^2 * (0,101\text{MPa} - 7,38 \text{ Mpa})}{35\text{mm}^2}}{52,5 \text{ mm}^2 - 35 \text{ mm}^2} \\ \sigma_r &= \frac{9030,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}} - 278,38 \frac{\text{N}}{\text{mm}} - 27574,5 \text{ MPa}}{1531,25 \text{ mm}^2} \\ \sigma_r &= \frac{-18818,38 \text{ N/mm}^2}{1531,25 \text{ mm}^2} \\ \sigma_r &= -12,29 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Esfuerzo Longitudinal:

$$\sigma_l = \frac{pir_i^2}{ro^2 - ri^2}$$

$$\sigma_l = \frac{7,38 \text{ Mpa} * 35\text{mm}^2}{52,5\text{mm}^2 - 35\text{mm}^2}$$

$$\sigma_l = \frac{9034,5 \text{ N}}{1531,5\text{mm}^2}$$

$$\sigma_l = 5,90 \text{ MPa}$$

El mayor esfuerzo es el esfuerzo circunferencial  $\sigma_t = 23,72 \text{ MPa}$ , lo que significa que este será el criterio de diseño más importante para la resistencia del cilindro.

A partir de este valor se puede calcular el factor de seguridad del diseño:

$$FS = \frac{\sigma_{elástico}}{\sigma_{máx}}$$

$$FS = \frac{240 \text{ MPa}}{23.72 \text{ MPa}}$$

$$FS = 10,11$$

La elección de un espesor de 17.5 mm fue acertada, ya que permite que el cilindro soporte las cargas de presión interna sin riesgo de falla, con un esfuerzo máximo de 23.72 MPa, muy por debajo del límite elástico del material de 240 MPa, y un factor de seguridad de 10.72, lo que garantiza una estructura altamente segura. Aunque este FS es elevado, no representa un problema dado que proporciona mayor resistencia a variaciones de carga, impactos, vibraciones y posibles fluctuaciones operativas, además de extender la vida útil del cilindro y reducir la necesidad de mantenimiento. En aplicaciones de alta presión, un diseño conservador es preferible para asegurar confiabilidad estructural y evitar fallas imprevistas, por lo que la selección del espesor inicial es adecuada y justificada.

#### Cálculos de transferencia de calor

Se busca estimar la potencia requerida para un calentador externo en un Secador de Punto Crítico (SPC) con el propósito de llevar el CO<sub>2</sub> dentro de un cilindro hasta su punto crítico. Para ello, se utilizan principios de transferencia de calor y propiedades termodinámicas del CO<sub>2</sub> obtenidas del libro *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. El cálculo se basa en la energía necesaria para el calentamiento y el tiempo estimado del proceso.

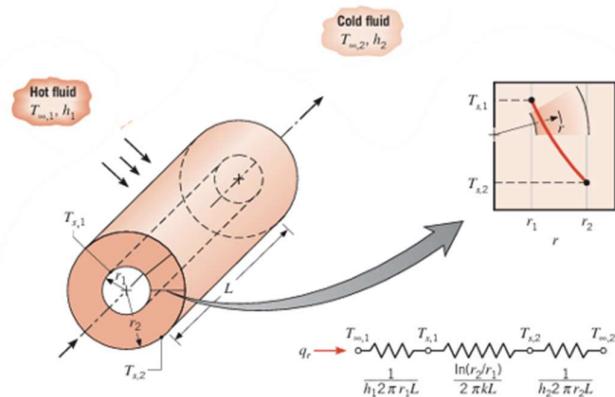


FIGURE 3.7 Hollow cylinder with convective surface conditions.

Se tienen los siguientes valores iniciales conocidos para poder realizar las aproximaciones necesarias:

$$r_1 = 0,035 \text{ m}$$

$$r_2 = 0,0525 \text{ cm}$$

$$L = 0,015 \text{ cm}$$

$$T_1 = 25^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 31,1^\circ\text{C}$$

La siguiente ecuación extraída de la sección 1.3 del libro Fundamentals of heat and mass transfer, permite calcular la energía necesaria para calentar una sustancia sin cambio de fase y se deriva de la primera ley de la termodinámica. Para aplicarla al CO<sub>2</sub> en su punto crítico, se requieren su masa, su capacidad calorífica específica (cp) obtenida de tablas termodinámicas y la variación de temperatura deseada ( $\Delta T$ ). Con estos valores, se determina el calor necesario para el proceso.

$$q = mc_p(T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) \quad (1.12e)$$

**TABLE A-2**Ideal-gas specific heats of various common gases (*Continued*)

(b) At various temperatures

Temperature, K	$c_p$ kJ/kg·K	$c_v$ kJ/kg·K	$k$	$c_p$ kJ/kg·K	$c_v$ kJ/kg·K	$k$
	Air			Carbon dioxide, $CO_2$		
250	1.003	0.716	1.401	0.791	0.602	1.314
300	1.005	0.718	1.400	0.846	0.657	1.288
350	1.008	0.721	1.398	0.895	0.706	1.268

De la Tabla A-2, se obtiene el valor para el calor específico del dióxido de carbono en punto crítico, dado a que no se presenta la temperatura exacta se usa interpolación entre los dos valores pertenecientes a 300 y 350 grados Kelvin, entonces se obtiene que:

$$cp = 0,8502 \text{ (Tablas Cengel)}$$

Debido a que la masa del dióxido de carbono en este estudio es una variable desconocida se puede descomponer dicho valor en un equivalente, siendo este el producto entre la densidad y el volumen de este. A partir de esto se obtiene la siguiente expresión:

$$q = \rho V * cp * (Tf - Ti)$$

A partir de las tablas del Libro Fundamentals of heat and mass transfer se obtiene el valor de la densidad del dióxido de carbono en punto crítico:

$$\rho = 371,73 \frac{kg}{m^3} \text{ (Tablas Cengel } CO_2 1000 \text{ psi, } 304,25 \text{ Kelvin)}$$

Posteriormente se calcula el volumen del cilindro:

$$V = \pi r i^2 L$$

$$V = \pi (0,035 \text{ m})^2 0,15 \text{ m}$$

$$V = 0,0005772 \text{ m}^3$$

Finalmente es posible reemplazar todos los valores en la ecuación planteada:

$$q = \left( 371,73 \frac{kg}{m^3} * 0,0005772 \text{ m}^3 \right) * \left( 0,8502 \frac{kJ}{kg * K} \right) * (304,25 K - 298,15 K)$$

$$q = 1,1127686 \text{ kJ}$$

De esta forma se obtiene el valor de energía necesaria para calentar el CO<sub>2</sub>, lo cual es un aproximado cercano que puede tomarse como referencia para conocer la cantidad de energía que debería ingresar por las paredes internas del cilindro.

Debido a que el calentador se ubica en la parte exterior del cilindro que forma parte del SPC es preciso realizar una aproximación de la potencia que se requiere para calentar el sistema, para ello se utilizan los conceptos de transferencia de calor tomando en cuenta la resistencia de las paredes del cilindro. Partiendo de la ecuación 2/12 del libro Fundamentals of heat and mass transfer:

$$q = \frac{2\pi LK(T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

En este caso se tienen las siguientes suposiciones y valores conocidos:

$$r_1 = 0,035 \text{ m}$$

$$r_2 = 0,0525 \text{ m}$$

T<sub>2</sub> = 31,1°C ya que seria la temperatura del CO<sub>2</sub> al interior de la cámara

T<sub>1</sub> = 55°C, temperatura a la que se calienta la chaqueta térmica en el exterior

Usando la Tabla A.1 del libro CENGEL se puede obtener el valor para k del Aceroinoxidable 316:

Stainless steels												
AISI 302		8055	480	15.1	3.91		17.3	20.0	22.8	25.4		
AISI 304	1670	7900	477	14.9	3.95	9.2	12.6	16.6	19.8	22.6	25.4	28.0
AISI 316		8238	468	13.4	3.48	272	402	515	557	582	611	640
AISI 347		7978	480	14.2	3.71			15.2	18.3	21.3	24.2	
Lead		601	11340	129	35.3	24.1	39.7	36.7	34.0	31.4		
Magnesium		923	1740	1024	156	87.6	169	159	153	149	146	

$$k \text{ for stainless steel usign interpolation} = 14,615 \frac{W}{mK}$$

Posteriormente se procede a reemplazar los valores conocidos en la ecuación:

$$q = \frac{2\pi(0,15 \text{ m})(14,615 \frac{W}{m \times K})(328,15 K - 304,25 K)}{\ln\left(\frac{0,0525 \text{ m}}{0,035 \text{ m}}\right)}$$

$$q = 302,34 \text{ watts}$$

De esta forma se obtiene el valor de potencia necesario para calentar la pared interna del cilindro de Acero inoxidable.

Conociendo los valores de energía y potencia previamente presentados, se calcula el tiempo necesario para calentar el CO<sub>2</sub> en el cilindro a partir de la cantidad de energía requerida y la potencia disponible del calentador. Este cálculo permite estimar cuánto tardará el sistema en alcanzar la temperatura deseada, suponiendo una transferencia de calor ideal sin pérdidas térmicas.

$$P = \frac{q}{t}$$

$$t = \frac{q}{P}$$

$$t = \frac{1112,76 J}{302,34 \frac{J}{s}}$$

$$t = 3,68 \text{ s}$$

El resultado obtenido indica la rapidez con la que se puede lograr el calentamiento en las condiciones establecidas. En este caso se obtiene un tiempo de calentamiento que es bastante corto, y para las condiciones reales de funcionamiento no sería adecuado ya que se puede generar sobrecalentamiento en el sistema. Por ello, se puede establecer una relación entre la potencia, energía y tiempos calculados para determinar la potencia adecuada si se desea tener un rango de tiempo mayor para el calentamiento del sistema.

Para una aproximación adecuada de la potencia adecuada del calentador se puede establecer una relación entre la energía requerida para calentar el CO<sub>2</sub> y el cilindro. Por

lo que se debe calcular está energía a partir de la expresión previamente utilizada pero ahora con las propiedades del acero inoxidable 316:

$$q = m * cp * \Delta T$$

Para ello:

$$T_1 = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 31,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Tomando en cuenta los datos extraídos de las fichas técnicas provenientes de los fabricantes o distribuidores más comerciales del Acero inoxidable 316 se obtiene:

$$\rho = 7980 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ (Propiedades del Acero inox 316, Kloeckner Metals)}$$

$$cp = 502 \frac{\text{J}}{\text{kg} \times \text{K}} \text{ (Acero inoxidable 316, Gnee Garden Metals)}$$

Se obtiene la siguiente expresión descomponiendo los componentes de la masa:

$$q = \rho V * cp * (T_f - T_i)$$

Para el volumen se utiliza la siguiente expresión:

$$V = \pi(r_{externo}^2 - r_{interno}^2)L$$

$$V = \pi(0,0525\text{m}^2 - 0,035\text{m}^2)0,15\text{m}$$

$$V = 0,0007216\text{m}^3$$

Se reemplazan todos los valores conocidos:

$$q = \left(7980 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) (0,0007216 \text{ m}^3) * (502 \frac{\text{J}}{\text{kg} \times \text{K}}) * (304,25 \text{ K} - 298,15 \text{ K})$$

$$q = 17633,2744 \text{ J} = 17,633274 \text{ kJ}$$

Por lo tanto, se obtiene que:

$$q_{\text{Acero}} = 17,633274 \text{ kJ}$$

$$q_{\text{CO}_2} = 1,1127686 \text{ kJ}$$

Sabiendo que la potencia de 302,34 watts es demasiado alta, se puede establecer una potencia de 70 watts como una suposición inicial para realizar un cálculo de cuánto tiempo tomaría calentar ambos componentes, dado a que la chaqueta de calefacción estará en el exterior del cilindro, el tiempo de calentamiento no será el mismo en el Acero que en el CO<sub>2</sub>. Se genera un proceso de conducción por lo que se calculan los tiempos por separado y se suma su totalidad:

$$P = \frac{q}{t}$$

$$t = \frac{q}{P}$$

Para el acero:

$$t_{acero} = \frac{17633,274 J}{70 Watts}$$

$$t_{acero} = 251,903 s$$

Para el dióxido de Carbono:

$$t_{CO_2} = \frac{1112,7686 J}{70 Watts}$$

$$t_{CO_2} = 15,89 s$$

Se calcula el tiempo total, que refleja el calentamiento secuencial que sufre el sistema desde que se calientan las paredes del cilindro de acero hasta que se llega a calentar el CO<sub>2</sub>:

$$t = t_{acero} + t_{CO_2}$$

$$t = 251,90 s + 15,89 s$$

$$t = 267,79 s = 4,46 \text{ minutos}$$

Se optó por una chaqueta de 100 watts común en el mercado debido al cálculo aproximado, sin embargo, conociendo esta potencia inicial se puede realizar un cálculo adicional para mejorar la precisión del modelo. Debido a que el sistema de calentamiento

no cuenta con aislamiento térmico, se dan perdidas hacia el ambiente por lo que se pueden utilizar los conceptos de radiación y convección térmica para poder establecer la potencia real que estaría ingresando al sistema tomando en cuenta las perdidas.

Perdidas por Radiación al ambiente:

$$q''_{\text{rad}} = \frac{q}{A} = \varepsilon E_b(T_s) - \alpha G = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{\text{sur}}^4) \quad (1.7)$$

Material	Emissivity Value
Stainless Steel: type 303, oxidized	0.74 - 0.87
Stainless Steel: type 303, 304: 8Cri 18Ni light silvery, rough brown, after heating	0.36 - 0.44
Stainless Steel: type 303, After 42 hours of heating at 527°C	0.62 - 0.73
Stainless Steel: type 310 - 25Cr, 20Ni, Brown, splotched, oxidized from furnace service	0.90 - 0.97
Stainless Steel: type 310, rolled	0.56 - 0.81
Stainless Steel: type 316	0.76 - 0.90
Stainless Steel: type 321	0.27 - 0.32
Stainless Steel: type 321, polished	0.18 - 0.49
Stainless Steel: type 321, with BK oxide	0.66 - 0.76
Stainless Steel: type 347, oxidized	0.87 - 0.91
Stainless Steel: type 350	0.18 - 0.27
Stainless Steel: type 350, polished	0.11 - 0.35
Stainless Steel: type 17-7 PH	0.44-0.51
Stainless Steel: type 17-7 PH, polished	0.09 - 0.16
Stainless Steel: type C1020, oxidized	0.87 - 0.91

Jaworske, D. A. (1998). Total hemispherical emissivity of oxidized stainless steel (NASA Technical Memorandum 107410). NASA Glenn Research Center.

<https://ntrs.nasa.gov/citations/19980228304>

En este documento de la NASA, se presentan valores experimentales de emisividad hemisférica total del acero inoxidable tipo 316. Los resultados muestran un rango de 0.76 a 0.90, dependiendo del grado de oxidación y temperatura alcanzada. Por lo que promediando los valores se utiliza 0.83 para el valor de emisividad.

Entonces se puede utilizar la ecuación de radiación:

$$q_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_{\infty}^4)$$

Donde:

$T_s = 328,15 \text{ K}$  Temperatura de la chqueta en el exterior

$T_{\infty} = 293,15 \text{ K}$  Temperatura ambiente

$\varepsilon = 0,83$  Coeficiente de emisividad termica

$$\sigma = 5,67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \text{ Constante de Stefan - Boltzmann}$$

$A$  = Area superficial en contacto con la resistencia térmica

$$A = 2\pi * r_{ext} * L$$

$$A = 2\pi * (0,0525 m) * (0,15 m)$$

$$A = 0,0495 m^2$$

$$q_{rad} = (0,83)(5,67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4})(0,0495 m^2)(328,15^4 - 293,15^4)$$

$$q_{rad} = 9,55 W$$

Perdidas por convección al ambiente:

$$q = \bar{h} A_s (T_s - T_\infty) \quad (6.12)$$

$$q_{conv} = h * A (T_s - T_\infty)$$

Donde:

$$h = 13,5 \frac{W}{m^2 K} \text{ coeficiente de convección}$$

**TABLE 1.1** Typical values of the convection heat transfer coefficient

Process	$h$ (W/m <sup>2</sup> · K)
Free convection	
Gases	2–25
Liquids	50–1000
Forced convection	
Gases	25–250
Liquids	100–20,000
Convection with phase change	
Boiling or condensation	2500–100,000

$A$  = Area superficial en contacto con la resistencia térmica

$T_s = 328,15 K$  Temperatura de la chqueta en el exterior

$T_\infty = 293,15 K$  Temperatura ambiente

$$q_{conv} = (13,5 \frac{W}{m^2 K}) * (0,0495 m^2)(328,15 K - 293,15 K)$$

$$q_{conv} = 23,38 \text{ W}$$

Para este caso se puede expresar las perdidas con la siguiente ecuación:

$$q_{loss} = q_{conv} + q_{rad}$$

$$q_{loss} = 23,38 \text{ W} + 9,55 \text{ W}$$

$$q_{loss} = 32,93 \text{ W}$$

Por lo tanto:

$$q_{real} = q_{in} - q_{loss}$$

$$q_{real} = 100 \text{ W} - 32,93 \text{ W}$$

$$q_{real} = 67,07 \text{ W}$$

Sabiendo esto se puede establecer que de los 100 Watts tan solo ingresan 67,07 Watts al sistema debido a las perdidas. Entonces para poder aplicar un modelo transitorio más preciso se puede calcular la temperatura de la pared interna del cilindro justo en el punto en el que se conoce que la chaqueta se estabiliza en 55 grados y la temperatura del Co2 debería ser 31,1 grados. Para ello:

$$T_{CO2} = T_{chaqueta} - q(R_{cond} + R_{conv, int})$$

$$T_{pared\ interna} = T_{chaqueta} - q * R_{cond}$$

$$T_{pared\ interna} = T_{chaqueta} - \frac{q * \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L k}$$

Con los valores conocidos se reemplaza en la ecuación:

$$T_{pared\ interna} = 55 \text{ C} - \frac{67,07 \text{ W} * \ln\left(\frac{0,0525 \text{ m}}{0,035 \text{ m}}\right)}{2\pi(0,15 \text{ m})(14,615 \frac{\text{W}}{\text{mK}})}$$

$$T_{pared\ interna} = 53,03 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Este valor de temperatura pertenece a la pared interna del cilindro al momento en que la chaqueta está a 55 grados.

Calculo transitorio:

$$T(t) = T\infty - (T\infty - T_0) * e^{-t/T}$$

$$t = \tau * \ln \left( \frac{T\infty - T_0}{T\infty - T(t)} \right)$$

$$\tau = \frac{\rho * V * Cp}{h * A}$$

Pared de acero:

$$\tau = \frac{4,19 \text{ kg} * 502 \frac{J}{kgK}}{100 \frac{W}{m^2K} * 0,0495 m^2}$$

$$\tau = 584,2 \text{ seg}$$

$$t = 584,2 \text{ seg} * \ln \left( \frac{55 - 20}{55 - 50,03} \right)$$

$$t = 1681 \text{ seg} = 28 \text{ minutos}$$

Calentamiento Co2:

$$\tau = \frac{0,2147 \text{ kg} * 850,2 \frac{J}{kgK}}{10 \frac{W}{m^2K} * 0,033 m^2}$$

$$\tau = 543,1 \text{ seg}$$

$$t = 543,2 \text{ seg} * \ln \left( \frac{53,03 - 20}{53,03 - 31,1} \right)$$

$$t = 553,1 \text{ seg} = 3,8 \text{ minutos}$$

$$t_{real} = t_{pared} + t_{co2} = 1681 + 226,5 = 1907,5 \text{ seg} = 31,8 \text{ min}$$

El sistema se calienta en su totalidad hasta la temperatura deseada en 31,8 minutos.

Cálculo para la rosca

Se debe tomar en cuenta dos formas en las que puede fallar la rosca, por esfuerzo axial o esfuerzo de cizalladura

Se define un diámetro y paso de rosca común en el mercado (M105X4)

D<sub>e</sub>= 105mm (Diámetro exterior de diseño)

P= 4mm (Paso)

Con estos parámetros podemos obtener varios cálculos para definir la rosca

$$\begin{aligned} Lr &\geq \frac{2}{3}D \\ Lr &\geq \frac{2}{3}(105\text{mm}) \geq 70\text{mm} \end{aligned}$$

Esfuerzo axial

Fuerza axial

$$Faxil = P \cdot A = 7.38 \cdot 10^6 \frac{N}{m^2} \times \pi(0.035m)^2 =$$

28.4kN (*Fuerza axial sobre la tapa del cilindro*)

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{F}{A_t} = \frac{23,4 \times 10^3 N}{7390 mm^2} = 3.17 MPa & A_t &= \frac{\pi}{4} D^{k^2} \\ & & At &= \frac{\pi}{4} (0.097m)^2 \\ & & A_t &= 7.389 \times 10^{-3} m^2 \\ & & & A_t = 7390 mm^2 \end{aligned}$$

Factor de seguridad bajo carga axial

$$n = \frac{\sigma_y}{\sigma} = \frac{240 MPa}{3,17 MPa} = 75.71$$

Esfuerzo de la cizalladura

$$\tau = \frac{F}{Aciz}$$

$$Aciz = \pi (0,11m)(0,07m)$$

$$Aciz = 22,236mm^2$$

$$Tadm = 0,58Fy$$

$$Tadm = 0,58 (240MPa) = 139,2MPa$$

$$Aciz = \pi d_{\text{prom}} L_r$$

$$d_{\text{prom}} = \frac{D_{\text{e}} + D}{2} = \frac{105 + 70}{2} = 101mm = 0,101m$$

$$\tau = \frac{28,4 \times 10^3 N}{22,236 mm^2} = 1,28 MPa \text{ (Esfuerzo por cizalladura)}$$

$$nciz = \frac{139,2}{1,28} = 107,97 \text{ (Factor de seguridad)}$$

Cálculo de fatiga en el cilindro

Diámetro interno= 70 mm

Diámetro externo= 105 mm

Sut Acero inoxidable AISI 316= 515 MPa

En la imagen se presentan los esfuerzos principales obtenidos para el cilindro que ya fueron calculados anteriormente. Estos incluyen el esfuerzo tangencial, radial y longitudinal.

**Esfuerzo Tangencial:**

$$\sigma_t = \frac{P_{iri}r_i^2 - P_{oro}r_o^2 - \frac{r_i^2 r_o^2 (P_o - P_i)}{r_i^2}}{r_o^2 - r_i^2}$$

 $\sigma_t$ 

$$= \frac{7.38 \text{ MPa} * 35^2 \text{ mm} - 0.101 \text{ MPa} * 52.5^2 \text{ mm} - \frac{35^2 \text{ mm} * 52.5^2 \text{ mm} * (0.101 \text{ MPa} - 7.38 \text{ MPa})}{35^2 \text{ mm}}}{52.5^2 - 35^2}$$

$$\sigma_t = \frac{9030.5 \frac{N}{mm} - 278.38 \frac{N}{mm} + 27574.5 \text{ MPa}}{1531.25 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma_t = \frac{36326.62 \text{ N/mm}^2}{1531.25 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma_t = 23.72 \text{ MPa}$$

**Esfuerzo Radial:**

$$\sigma_r = \frac{P_{iri}r_i^2 - P_{oro}r_o^2 + \frac{r_i^2 r_o^2 (P_o - P_i)}{r_i^2}}{r_o^2 - r_i^2}$$

 $\sigma_r$ 

$$= \frac{7.38 \text{ MPa} * 35^2 \text{ mm} - 0.101 \text{ MPa} * 52.5^2 \text{ mm} + \frac{35^2 \text{ mm} * 52.5^2 \text{ mm} * (0.101 \text{ MPa} - 7.38 \text{ MPa})}{35 \text{ mm}^2}}{52.5 \text{ mm}^2 - 35 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma_r = \frac{9030.5 \frac{N}{mm} - 278.38 \frac{N}{mm} - 27574.5 \text{ MPa}}{1531.25 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma_r = \frac{-18818.38 \text{ N/mm}^2}{1531.25 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma_r = -12.29 \text{ MPa}$$

**Esfuerzo Longitudinal:**

$$\sigma_l = \frac{P_{iri}r_i^2}{r_o^2 - r_i^2}$$

$$\sigma_l = \frac{7.38 \text{ MPa} * 35 \text{ mm}^2}{52.5 \text{ mm}^2 - 35 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma_l = \frac{9034.5 \text{ N}}{1531.5 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma_l = 5.90 \text{ MPa}$$

El esfuerzo que se utiliza para el análisis de fatiga es el esfuerzo tangencial, que es de 23.72 MPa, ya que este es el más elevado, por lo cual el más crítico. De igual manera se tiene que el esfuerzo mínimo con el que se trabajara es 0.

$$\sigma_{max} = 23.72 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{min} = 0 \text{ MPa}$$

### Esfuerzo medio y alternante

Para un esfuerzo que varía entre un valor mínimo y máximo de forma cíclica, como ocurre con la presión interna del cilindro, se debe calcular el esfuerzo alternante y medio de la siguiente manera:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

$$\sigma_m = \frac{23.72 \text{ MPa} + 0 \text{ MPa}}{2} = 11.86 \text{ MPa}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

$$\sigma_a = \frac{23.72 \text{ MPa} - 0 \text{ MPa}}{2} = 11.86 \text{ MPa}$$

### Factores de Marín

#### Factor de superficie

El acabado superficial tiene una influencia significativa en el inicio de grietas por fatiga. Por lo cual hay que tomar en cuenta la superficie del cilindro. Con la ayuda de la siguiente tabla:

<b>Surface Finish</b>	<b>Factor <i>a</i></b>		<b>Exponent <i>b</i></b>
	<b><math>S_{ut}</math>, kpsi</b>	<b><math>S_{ut}</math>, MPa</b>	
Ground	1.34	1.58	-0.085
Machined or cold-drawn	2.70	4.51	-0.265
Hot-rolled	14.4	57.7	-0.718
As-forged	39.9	272.	-0.995

Figura 63. Parámetros para el factor de superficie.

Para este caso, se utilizan los valores de superficie mecanizada, ya que está pieza fue torneada, por cual se usan los siguientes valores para aplicarlo en la fórmula:

$$a = 4.51$$

$$b = -0.265$$

$$S_{ut} = 515 \text{ MPa}$$

$$k_a = a \cdot (S_{ut})^b$$

$$k_a = 4.51 \cdot (515)^{-0.265}$$

$$k_a = 0.862$$

### Factor de tamaño

Este factor tiene en cuenta el efecto de la dimensión del componente sobre la iniciación de falla por fatiga. A partir de esto, es necesario calcular un diámetro equivalente cuando se trabaja con componentes no rotacionales o de la geometría que es está, un cilindro. Esto se lo calcula con la siguiente fórmula:

$$de = 0.370 \times d$$

$$de = 0.370 \times 105$$

$$de = 38.85 \text{ mm}$$

Y con esto se puede aplicar la siguiente tabla, para poder calcular el factor Kb:

$$k_b = \begin{cases} (d/0.3)^{-0.107} = 0.879d^{-0.107} & 0.11 \leq d \leq 2 \text{ in} \\ 0.91d^{-0.157} & 2 < d \leq 10 \text{ in} \\ (d/7.62)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0.157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases} \quad (6-20)$$

Figura 64. Ecuaciones para calcular kb.

Y se aplica la tercera fórmula:

$$k_b = 1.24 \cdot d_e^{-0.107}$$

$$k_b = 1.24 \cdot (38.85)^{-0.107}$$

$$k_b = 0.838$$

### Factor de Carga

Este tipo de carga no es puramente axial ni torsional, pero por su naturaleza, se asemeja más a una carga de tipo axial, por lo que mediante de la tabla se usa el siguiente valor:

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{bending} \\ 0.85 & \text{axial} \\ 0.59 & \text{torsion} \end{cases}$$

Figura 65. Valores de Kc.

$$k_c = 0.85$$

### Factor de temperatura

Este factor tiene en cuenta cómo varía la resistencia a la fatiga del material en función de la temperatura de operación. Aunque la temperatura de operación no es muy alta, ya que es 31.2 °C u 88.16°F, que está muy cerca de la temperatura ambiente, se puede usar la siguiente ecuación del libro de Shigley:

$$k_d = 0.975 + 0.432 \cdot 10^{-3}T_F - 0.115 \cdot 10^{-5}T_F^2 + 0.104 \cdot 10^{-8}T_F^3 - 0.595 \cdot 10^{-12}T_F^4$$

Donde aplica con el siguiente rango:

$$70 \text{ } ^\circ\text{F} \leq T_F \leq 1000 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Como se puede ver, entra dentro del rango por muy poco, por lo que, para ser conservadores con esto, es necesario calcular el factor:

$$k_d = 0.975 + 0.432 \cdot 10^{-3}(88.16) - 0.115 \cdot 10^{-5}(88.16)^2 + 0.104 \cdot 10^{-8}(88.16)^3 \\ - 0.595 \cdot 10^{-12}(88.16)^4$$

$$k_d = 1$$

Como se puede ver el resultado, ya que la temperatura estaba muy cerca de la temperatura ambiente, el valor de este factor es 1, lo cual no afecta.

### Factor de confiabilidad

Este diseño requiere que la probabilidad de falla sea muy baja, al trabajar con una presión alta y estar sometido a diferentes pruebas, es necesario tener una buena confiabilidad, para asegurar el funcionamiento correcto y la seguridad tanto del dispositivo como del operador. Para lo cual se utiliza la siguiente tabla:

Reliability, %	Transformation Variate $z_a$	Reliability Factor $k_e$
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

Figura 66. Porcentajes de confiabilidad.

Para esto, se utilizará una confiabilidad del 99.9%, y con la siguiente fórmula se obtiene el factor:

$$k_e = 1 - 0.08 \cdot z_a$$

$$k_e = 1 - 0.08 \cdot 2.326 = 0.814$$

### Límite de resistencia a la fatiga

Para esto, se utiliza las siguientes ecuaciones, la que se debe utilizar es la primera, que relaciona el Sut del material y se lo calcula:

$$S'_e = \begin{cases} 0.5S_{ut} & S_{ut} \leq 200 \text{ kpsi (1400 MPa)} \\ 100 \text{ kpsi} & S_{ut} > \text{kpsi} \\ 700 \text{ MPa} & S_{ut} > 1400 \text{ MPa} \end{cases}$$

$$S'_e = 0.5 \cdot 515 = 257.5 \text{ MPa}$$

### Límite de resistencia a la fatiga corregido

Una vez calculado todos los factores de Marín, se puede obtener el límite a la fatiga corregido, con la siguiente fórmula:

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot S'_e$$

$$S_e = (0.862)(0.838)(0.85)(1)(0.814)(1)(257.5)$$

$$S_e = 128.70 \text{ MPa}$$

### Criterio de falla: Goodman

Para el análisis de fatiga del cilindro sometido a presión interna, se seleccionó el criterio de Goodman modificado como método de evaluación. Esta elección se fundamenta en la necesidad de aplicar un criterio que sea conservador, de esta manera se asegura un diseño seguro, que de igual manera pueda ser aplicado a la vida real. A partir de esto, y su ecuación, se puede calcular el factor de seguridad con la siguiente ecuación:

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n}$$

$$\frac{11.86}{128.70} + \frac{11.86}{515} = \frac{1}{n}$$

$$n = 8.68$$

Con base en el criterio de Goodman modificado, se obtuvo un factor de seguridad de 8.68, lo cual indica que el diseño es altamente seguro frente a la falla por fatiga. Esto confirma que, bajo las condiciones de carga cíclica esperadas, el componente podrá operar con una vida útil prolongada y con un amplio margen de confiabilidad.

#### Cálculo de O-ring:

La tapa para el sistema SPC requiere de un componente aislante que haga contacto con la pared interna del cambio de sección del cilindro, para esto se optó por calcular y determinar las dimensiones más apropiadas para un O-ring en estas condiciones.

#### Valores de referencia según norma ISO 3601-1:

Se recomienda que  $di$  sea entre 1% y 5% menor que el diámetro del alojamiento para garantizar interferencia.

#### Cálculo del ancho de la ranura (wr)

La ranura debe ser ligeramente más ancha que la sección del O-ring para evitar extrusión y permitir expansión.

#### Para sellado estático:

$$wr = ds + 0.1ds$$

#### Valores típicos según AS568:

Para un O-ring de 3 mm de grosor, la ranura debe ser 3.3 a 3.5 mm de ancho.

#### Cálculo de la compresión radial (Cr)

El O-ring se debe comprimir dentro de la ranura para un sellado efectivo. La compresión radial es el porcentaje de reducción del grosor del O-ring al ser instalado.

Donde:

$ds$  = diámetro de sección del O-ring.

$hr$  = altura de la ranura.

$$Cr = \left( \frac{ds - hr}{ds} \right) * 100$$

Valores recomendados de compresión según tipo de sellado:

Sellado estático: 15% - 30%

Sellado dinámico: 10% - 20%

Si la compresión es menor del 10%, el O-ring puede fallar por fugas. Si es mayor del 30%, se puede desgastar prematuramente.

Cálculo del volumen de llenado (Vf)

El O-ring no debe llenar completamente la ranura para permitir expansión térmica y evitar extrusión.

$$Vf = \frac{V_{oring}}{V_{groove}} * 100$$

Cálculo de la interferencia radial (Ir)

Es la diferencia entre el radio del alojamiento y el radio del O-ring antes de ser instalado.

$$Ir = \frac{ds}{2} - (dh - di)$$

Tapa lateral:

**Diámetro externo de la tapa: dt= 101,60. mm**

Diámetro de la sección transversal del O-ring ds=5.5 mm (**ISO 3601-3:2005**)

Título: ***Quality acceptance criterio***)

Compresión radial recomendada: Cr=20%

Interferencia radial recomendada: Ir=25%

Altura de la ranura:

$$hr = 5.5 * (1 - 0.2)$$

$$hr = 4.4 \text{ mm}$$

Ancho de la ranura:

$$wr = ds * 1.1$$

$$wr = 5.5 * 1.1$$

$$wr = 6.05 \text{ mm}$$

Interferencia radial:

$$Ir = \frac{ds}{2} - (dh - di)$$

$$Ir = \frac{5.5}{2} - (102.5 - 101,60)$$

$$Ir = 2.25 \text{ mm}$$

Volumen de llenado:

$$Vf = \frac{Voring}{Vgroove} * 100$$

$$Voring = \pi dt ds^2$$

$$Vranura = wr * dh * hr$$

$$Vf = \frac{\pi * 101,60 * (5.5)^2}{6.05 * 102.5 * 4.4} * 100$$

$$Vf = 70.1\%$$

Compresión Radial:

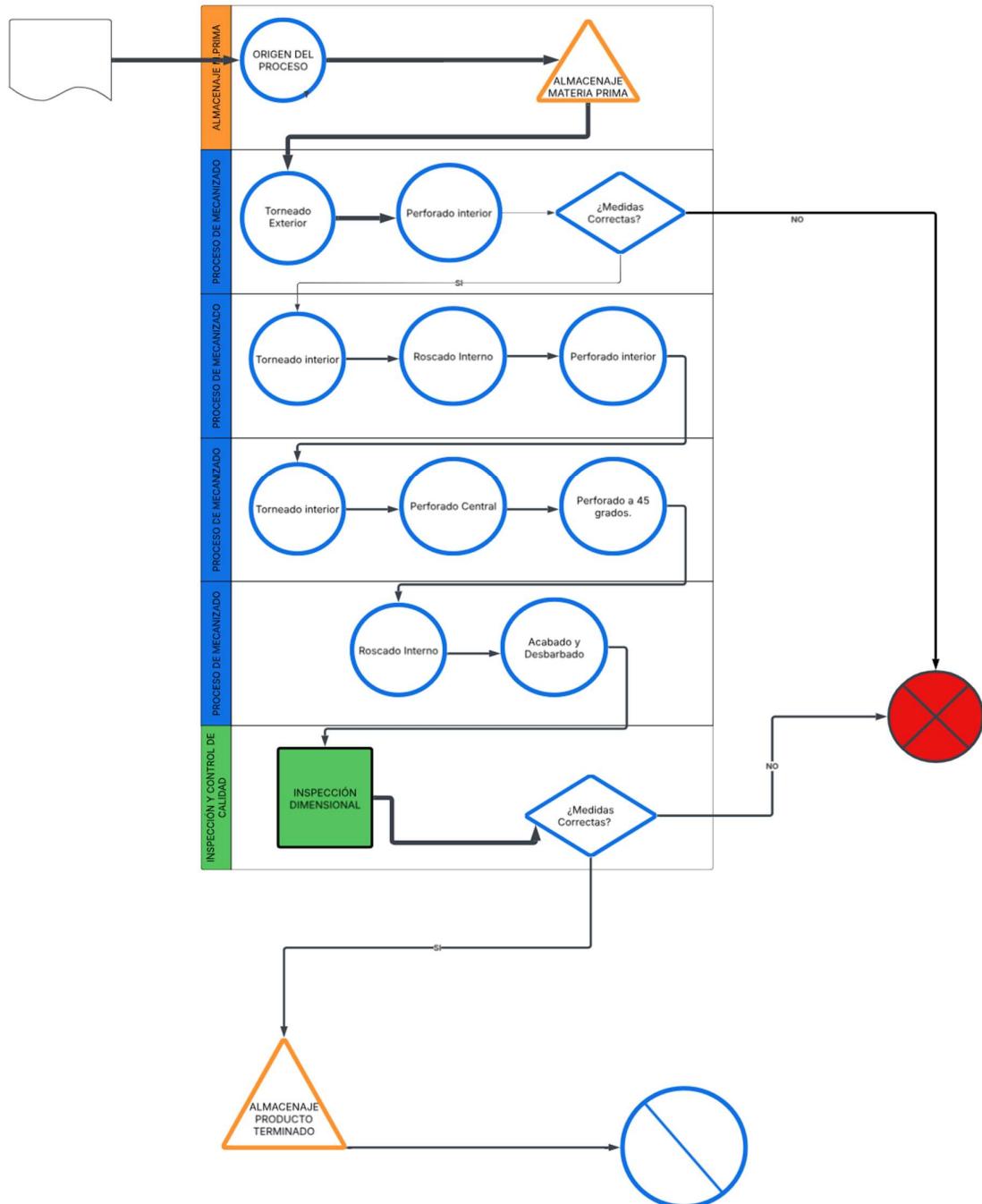
$$Cr = \left( \frac{ds - hr}{ds} \right) * 100$$

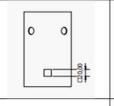
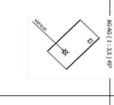
$$Cr = \left( \frac{5.5 - 4.4}{5.5} \right) * 100$$

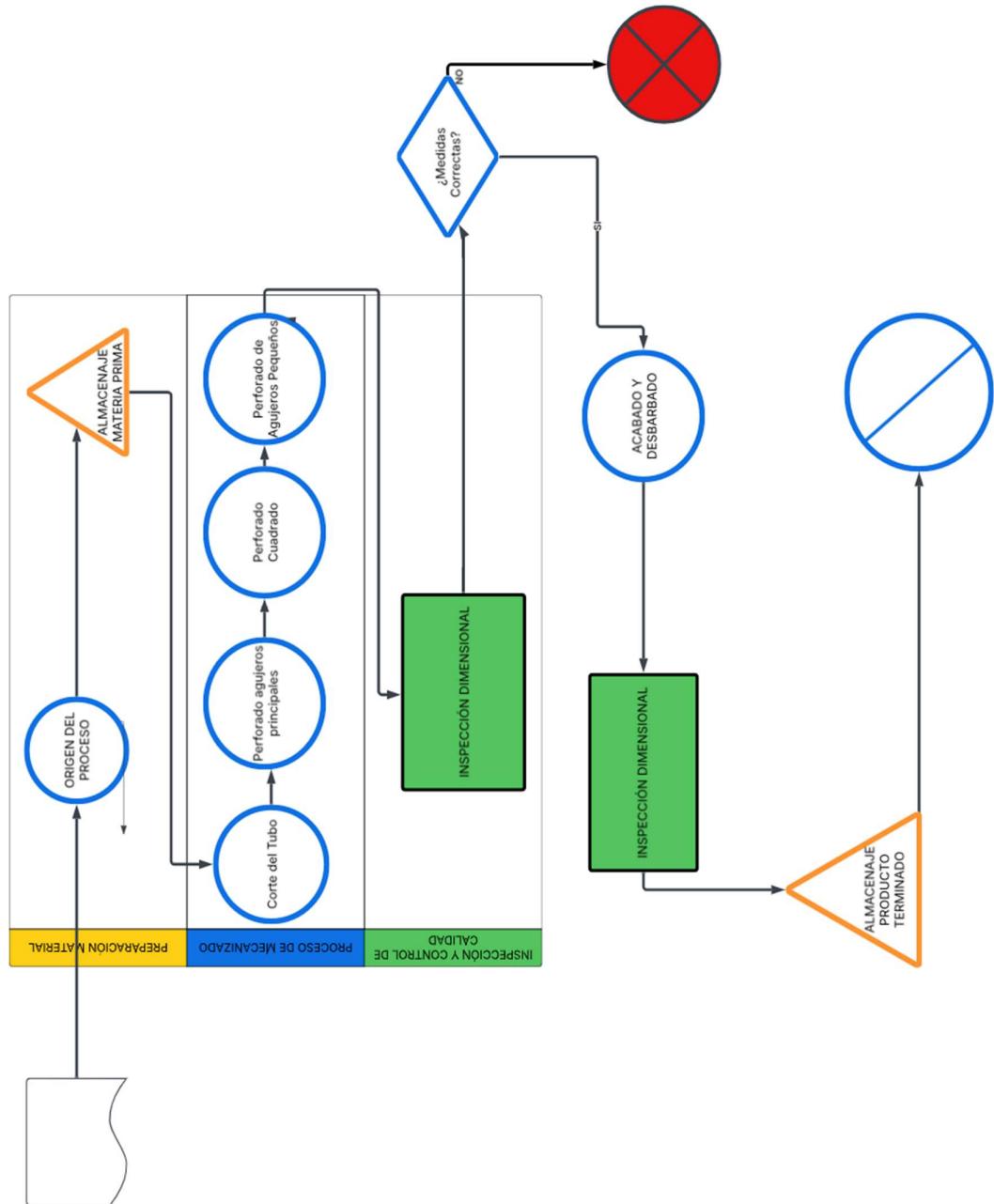
$$Cr = 20.05\%$$

## Anexo C: Plan de manufactura

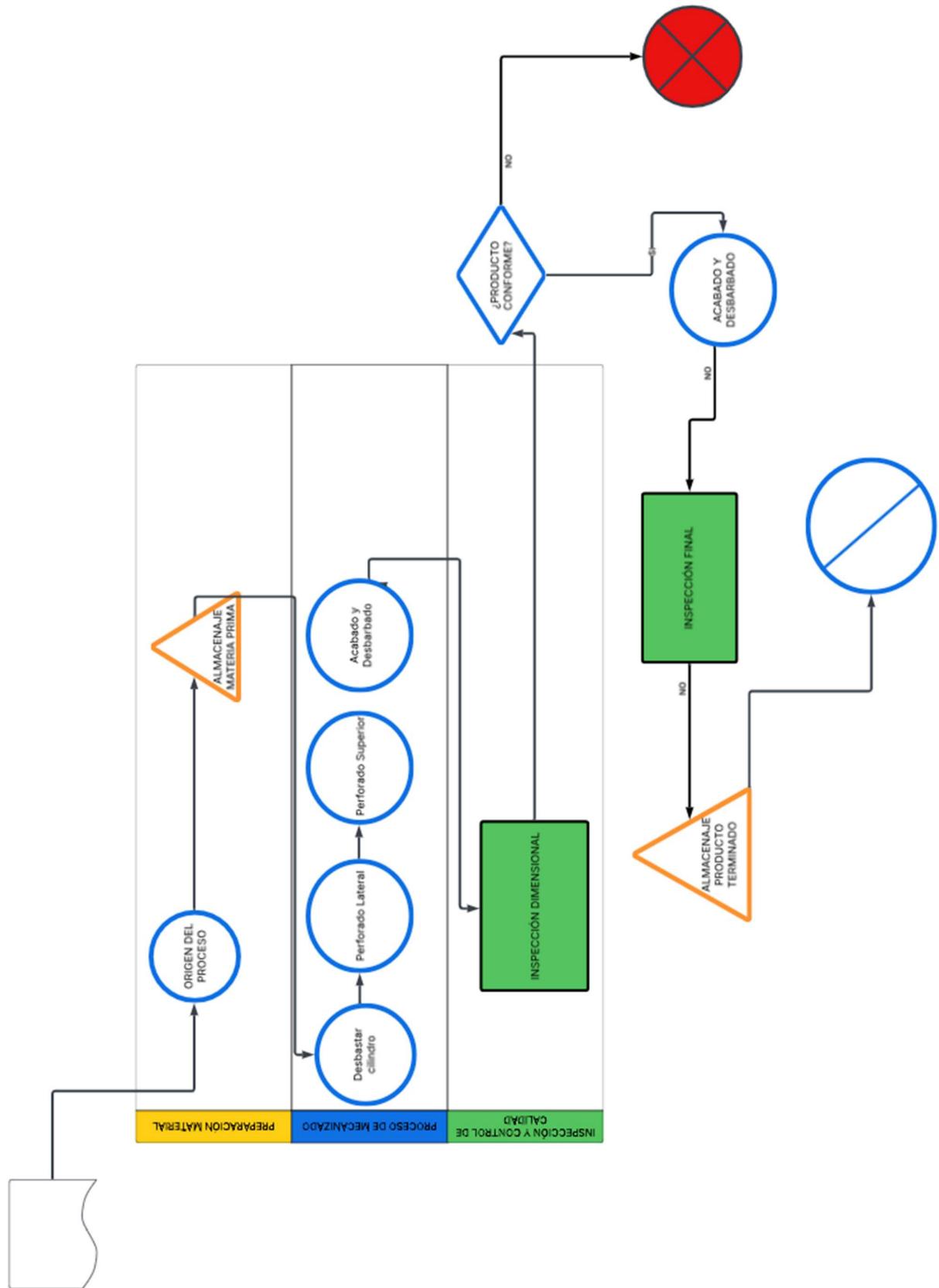
Etapa	Tarea	Conjunto	Secador de punto crítico		Material	ACERO INOXIDABLE 316	Herramienta de control	
			Punto	Realizado				
			Fecha	Mecanizado				
				Tolerancias (mm)	Parámetros	Esquema	Tiempo de máquina	
1. Preparación del Material.	Refrentar el material en bruto utilizando el torno para una mayor facilidad del manejo de la pieza	Torneado	$\pm 1$		Definir las dimensiones de trabajo y corregir imperfecciones ocasionadas por cortes imprecisos del material en bruto		10 min	Flexómetro
2. Torneado Exterior	Disminuir el diámetro del cilindro para obtener el diámetro exterior final	Torneado	$\pm 1$		Primero, reducir el diámetro en bruto del cilindro de 127 mm a 123 mm. Luego, realizar un cambio de sección disminuyendo el diámetro a 105 mm en la zona especificada en los planos		100 min	Vernier
3. Perforado interior	Perforar el cilindro sólido desde el centro, incrementando progresivamente el diámetro usando brocas de mayor tamaño	Perforado	$\pm 1$		Realizar el agujero hasta alcanzar el diámetro adecuado para el uso de insertos		400 min	Vernier
4. Torneado interior	Ampliar el diámetro interno hasta alcanzar las dimensiones y la zona especificadas en los planos técnicos	Torneado	$\pm 1$		Para empezar con el desgaste, se realiza la primera sección con una profundidad de 40mm y diámetro de 101 mm. Luego se pasa a la sección más larga en donde es critico tener apoyos para que no vibre el cilindro y realizar el desgaste con un inserto largo que permita realizar el material hasta la profundidad indicada en los planos		500 min	Vernier
5. Roscado Interno	Crear la rosca interna en el extremo correspondiente que se acopla a la tapa	Torneado	$\pm 0,005$		Mecanizar rosca - 14 UNS SE2A		30 min	Gaiga de rosca, acople con semejante
6. Perforado interior	Sujetar cilindro del lado opuesto para perforar desde el centro, incrementando progresivamente el diámetro	Perforado	$\pm 1$		Realizar el agujero hasta alcanzar el diámetro adecuado para el uso de insertos		40 min	Vernier
7. Torneado interior	Ampliar el diámetro interno hasta alcanzar las dimensiones y la zona especificadas en los planos técnicos	Torneado	$\pm 1$		Se desgasta el material hasta alcanzar el diámetro de 33,53 mm especificado en el plano		25 min	Vernier
8. Perforado Central	Realizar un taladrado axial central en la zona especificada en los planos	CNC	$\pm 0,25$		Perforación con broca de agujeros hasta alcanzar el diámetro inferior de las roscas 1/2 NPT		50 min	Vernier
9. Perforado a 45 grados.	Realizar un taladrado angular.	Centro de maquinado	$\pm 0,25$		Perforación de 4 agujeros hasta alcanzar el diámetro inferior de las roscas 1/2 NPT, a partir de un ángulo de 45° respecto al eje horizontal, con una separación angular de 90° entre ellos.		120 min	Vernier
10. Roscado Interno	Crear la rosca interna en el extremo correspondiente con ayuda de machuelos NPT	Manual	$\pm 0,05$		Ejecutar rotación de machuelos en los orificios maquinados planos: cinco con machuelo de 1/2" NPT y uno adicional para la ventana con machuelo de 1" NPT		600 min	Gaiga de rosca, acople con elementos
11. Acabado y Desbarbado	Eliminar rebabas y realizar el pulido final	Desbastado	NA		Polida con disco abrasivo de grano fino		8 min	Inspección visual
12. Inspección y Control de Calidad	Verificar dimensiones y calidad de la pieza	Medición y pruebas de calidad	NA				12 min	Inspección visual, vernier

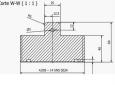


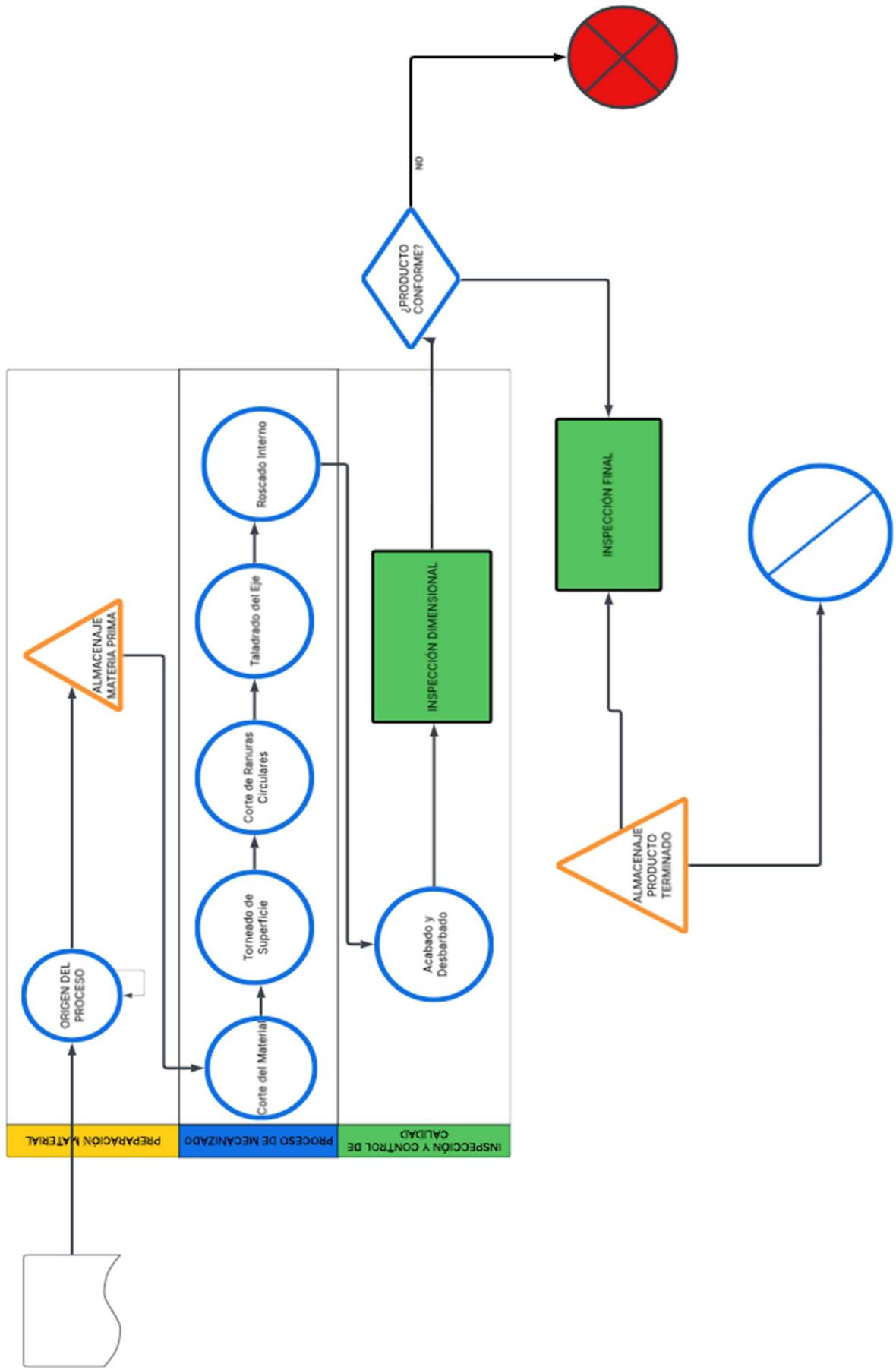
 <b>UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO</b>		Conjunto	Secador de punto crítico		Material	ACERO INOXIDABLE 316	
		Piano	CARCASA		Dimensiones en bruto	Di = 123 mm, De = 127 mm, L = 220 mm	
		Realizado	Nicolás Villacis		Comprobado	Mateo Obando	
		Fecha	5/8/2025		Fecha	5/8/2025	
Etapa	Tarea	Mecanizado	Tolerancia (mm)	Parámetros	Esquema	Tiempo de máquina	Herramienta de control
1. Corte del Tubo	Efectuar el corte inicial del tubo utilizando el torno, de acuerdo con las dimensiones especificadas	Corte	$\pm 1$	Corte del tubo a una longitud de 217 mm		10 min	Flexómetro
2. Perforado agujeros principales	Perforar un total de cinco agujeros circulares utilizando el taladro: uno alineado con el eje Y y los cuatro restantes distribuidos a partir de un ángulo de 45° respecto al eje horizontal, con una separación angular de 90° entre ellos.	Perforado	$\pm 0,5$	Perforación con broca de agujeros hasta alcanzar un diámetro interior de 2,15 mm		16 min	Vernier
3. Perforado Cuadrado	Realizar la perforación cuadrada en la ubicación correspondiente en el piano usando dremel	Corte	$\pm 1$	Corte cuadrado de 20x20 mm		10 min	Vernier
4. Perforado de Agujeros Pequeños	Perforar los agujeros pequeños en la parte contraria a el corte cuadrado utilizando taladro	Perforado	$\pm 0,25$	Orificios de diámetro 3 mm a una distancia de 70 mm		4 min	Vernier
5. Inspección Dimensional	Verificar las dimensiones y ubicación de los agujeros	Inspección	NA	Verificación de medidas con instrumento de medición		5 min	Vernier
6. Acabado y Desbarbado	Eliminar rebabas existentes utilizando dremel	Desbastado	NA	Lijado fino para eliminar rebabas		7 min	Inspección visual
7. Inspección Final	Realizar inspección para confirmar la calidad esperada	Inspección	NA	Uso de instrumentos de medición y verificación de compatibilidad con elementos acoplados		5 min	Plantilla de control



USFQ   UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO		Conjunto Plano	Secador de punto critico PORTAMUESTRAS		Material	ACERO INOXIDABLE 316 Ø76.2 mm X 190 mm	
Realizado			Nicolás Villacis	Dimensiones en bruto	Comprobado	Mateo Obando	
Fecha			5/8/2025	Fecha		5/8/2025	
Etapa	Tarea	Mecanizado	Tolerancia (mm)	Parámetros	Esquema	Tiempo de máquina	Herramienta de control
1. Preparación del material	Refrentar longitudinalmente el cilindro y desbastar su diámetro hasta alcanzar las dimensiones especificadas en los planos	Torneado	±0,5	Diametro de la barra: 70 mm, Longitud total: 145 mm		60 min	Vernier
2. Desbastar cilindro	Fresado del cilindro para aplanar una de sus caras hasta alcanzar la longitud especificada	Centro de maquinado	±1	Alto del medio cilindro de 30mm		120 min	Vernier
3. Perforado Lateral	Realizar perforación en el extremo semicilíndrico	Centro de maquinado	±0,5	Perforación con broca de 7 mm a lo largo del semicilindro 145 mm		30 min	Vernier
3. Perforado Superior	Perforar los cuatro agujeros de la cara plana	Centro de maquinado	±0,25	Perforación con broca de 15 mm; 4 orificios en la parte superior separados cada uno 30 mm a excepción de los que se entran en los costados que estan separados de 25 mm con respecto a los extremos		120 min	Vernier
5. Acabado y Desbarbado	Eliminar rebabas y suavizar bordes de los agujeros	NA	NA	Eliminar rebabas y realizar el pulido final		10 min	Inspección visual
6. Inspección Final	Realizar inspección para confirmar la calidad y dimensiones	Inspección	NA	Uso de planos y instrumentos de medición para verificar posición y medidas		5 min	Vernier, control con planos



 <b>UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO</b>		Conjunto	Secador de punto critico		Material	ACERO INOXIDABLE 316	
		Plano	TAPA		Dimensiones en bruto	Ø101,60 mm x 70 mm	
		Realizado	Nicolás Villacís		Comprobado	Mateo Obando	
		Fecha	5/8/2025		Fecha	5/8/2025	
Etapa	Tarea	Mecanizado	Tolerancias (mm)	Parámetros	Esquema	Tiempo de máquina	Herramienta de control
1. Corte del Material	Refrentar el material en bruto utilizando el torno para una mayor facilidad del manejo de la pieza	Torneado	±1	Definir el largo final de la pieza de 70mm y corregir imperfecciones ocasionadas por cortes imprecisos del material en bruto		25 min	Vernier
2. Torneado de Superficie	Tornear el diámetro original por ambos lados hasta alcanzar las dimensiones requeridas en la pieza	Torneado	±0,25	Diámetro mayor 105 mm, diámetro menor 25 mm		90 min	Vernier
3. Corte de Ranuras Circulares	Realizar el mecanizado de las ranuras circulares sobre la cara de mayor diámetro de la pieza	Centro de maquinado	±0,25	Profundidad de ranura: 4,40 mm; Diámetro externo 81 mm; Diámetro interno 71 mm		120 min	Calibrador de profundidad
4. Taladrado del Eje	Taladrar el orificio del eje central y realizar el avellanado en la cara de menor diámetro	Taladrado, avellanado	±1	Diámetro de broca: 5 mm con centro en la mitad del diámetro menor y avenallado de R5		10 min	Calibrador de profundidad
5. Roscado Interno	Crear la rosca interna en el extremo correspondiente que se acoplará a la tapa	Torneado	±0,005	Mecanizar rosca 4 - 14 UNS SE2A		60 min	Galga de rosca, vernier
6. Acabado y Desbarbado	Eliminar rebabas y suavizar bordes en la superficie y orificios	Desbastado	NA	Lijado con dremel para eliminar rebabas e imperfecciones		7 min	Inspección visual
7. Inspección Dimensional	Verificar las dimensiones y acople con los elementos	Inspección	NA	Verificación con Galga de rosca y calibrador		5 min	Galga de rosca, vernier



**ANEXO D: MANUAL DE MANTENIMIENTO****Universidad San Francisco de Quito****Fecha**

04 de mayo de 2025

**Tabla de Contenido**

Tabla de Contenido .....	2
PARTES Y COMPONENTES DE LA MÁQUINA:.....	3
HERRAMIENTAS REQUERIDAS:.....	6
MANTENIMIENTO PREVENTIVO:.....	6
TAREAS DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y SUS FRECUENCIAS .....	6
MANTENIMIENTO CORRECTIVO.....	7
PROBLEMAS COMUNES.....	9
REGISTRO DE MANTENIMIENTO:.....	11
SOPORTE TÉCNICO:.....	11

## PARTES Y COMPONENTES DE LA MÁQUINA:

Algunos de los subsistemas más importantes son:

A. Cámara de Presión Principal

Cilindro de acero inoxidable 316 con paredes de 17,5 mm de espesor.

B. Tapa Superior Roscada con Sello O-ring

Tapa con sistema de cierre roscado y sello tórico de nitrilo (O-ring tipo 212),.

C. Ventana de Visualización

Elemento tipo NPT con vidrio fusionado a carcasa de acero inoxidable, con capacidad de hasta 4000 psi.

D. Sistema de Calentamiento

Chaqueta térmica con banda calefactora de acero inoxidable, alimentada por corriente alterna de 110 V – 60 Hz.

E. Instrumentación Analógica

Conjunto de manómetro (hasta 1500 psi) y termómetro bimetálico (de -20 °C a 120 °C).

F. Base de Soporte

Estructura impresa en 3D en PLA.

G. Portamuestras Modular

Estructura interna removible que permite alojar y estabilizar las muestras de acero inoxidable 316.

H. Manguera de Conexión para CO<sub>2</sub>

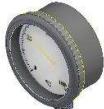
Tubería de 2.5 metros con tuerca GGA 320 y niple CGA 320.

I. Válvulas de Control

Válvulas tipo aguja de acero (modelo VN6 ½").

## J. Tapón de Seguridad Sustitutivo

Elemento NPT de  $\frac{1}{2}$ " utilizado temporalmente en lugar de válvula de alivio.

Item	Pieza	Imagen
A	Cámara de Presión Principal	 <i>Figura 1. Cuerpo</i>
B	Tapa Superior Roscada con Sello O-ring	 <i>Figura 2. Tapa con O-ring</i>
C	Ventana de Visualización	 <i>Figura 3. Ventana</i>
D	Sistema de Calentamiento	 <i>Figura 4. Chaqueta térmica</i>
E	Manómetro	 <i>Figura 5. Manómetro</i>

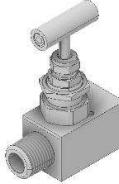
F	Termómetro	
G	Base de Soporte	
H	Portamuestras Modular	
I	Manguera de Conexión para CO <sub>2</sub>	
J	Válvulas de Control	
K	Tapón de Seguridad Sustitutivo	

Tabla 1. Diagrama de partes

**HERRAMIENTAS REQUERIDAS:**

1. Llave ajustable
2. Cinta de teflón (para sellado de roscas)
3. Destornillador plano
4. Cutter o bisturí técnico (para corte de sellos o empaques)
5. Pinzas de presión
6. Cepillo pequeño de cerdas suaves (limpieza de roscas)
7. Frasco con alcohol isopropílico (aplicación manual)
8. Guantes de protección térmica y química
9. Gafas de seguridad

**MANTENIMIENTO PREVENTIVO:**

El mantenimiento preventivo consiste en un conjunto de acciones programadas que permiten garantizar el correcto funcionamiento del Secador en Punto Crítico (SPC) y prolongar su vida útil. Estas actividades incluyen inspección, limpieza, ajuste y verificación periódica de los componentes críticos del sistema, con el fin de prevenir fallas operativas antes de que ocurran.

Aplicado al SPC, el mantenimiento preventivo se enfoca en preservar en óptimas condiciones elementos como la cámara de presión, válvulas, conexiones roscadas, mangueras, sistemas de calentamiento e instrumentación, asegurando la seguridad del operador y la eficiencia del proceso de secado.

**TAREAS DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y SUS FRECUENCIAS**

<b>Tarea de Mantenimiento</b>	<b>Frecuencia Recomendada</b>
Inspección de la cámara de presión y verificación de sellos	Antes de cada operación
Revisión de válvulas, niples y conexiones roscadas	Antes de cada operación
Limpieza interna con alcohol isopropílico	Cada ciclo operativo
Verificación de estado del O-ring y reemplazo si está dañado	Cada 3 usos o si presenta desgaste
Limpieza externa de la carcasa y base	Cada 3 a 5 meses
Revisión del sistema de calentamiento (banda térmica)	Cada 3 meses o si hay fallas en el calentamiento
Verificación de integridad del cableado eléctrico	Cada 3 meses o ante fallas
Prueba funcional de manómetro y termómetro	Cada 3 meses
Revisión de manguera y accesorios de conexión CGA/CGA	Cada 6 meses o ante señales de fuga

*Tabla 2. Tareas y frecuencias de mantenimiento*

## **MANTENIMIENTO CORRECTIVO**

### **1. Corrección de Fallas de Operación**

#### **Falla en el aumento de presión**

- Revisar que todas las válvulas estén correctamente cerradas y que no existan fugas visibles.
- Comprobar el estado del tapón de seguridad y su sellado.
- Verificar nivel de CO<sub>2</sub> en el tanque y que el ingreso esté libre de obstrucciones.

### **Falla en el calentamiento del sistema**

- Comprobar la conexión eléctrica de la banda calefactora.
- Si no calienta, reemplazar la banda térmica.

## **2. Mantenimiento de Componentes Móviles**

### **Pasos recomendados:**

- Asegurarse que el área de trabajo esté limpia, bien iluminada y nivelada.
- Usar herramientas adecuadas según lo descrito en la sección de herramientas. No forzar el apriete de roscas.

## **3. Mantenimiento de Componentes Fijos**

### **Revisión estructural:**

- Verificar alineación de la carcasa y base que estén en sus respectivas posiciones.
- Si se requiere ajuste, utilizar llave ajustable y verificar no sobreajustar las uninones.

### **En caso de golpes o deformaciones en componentes estructurales:**

- Si no comprometen el funcionamiento, se puede continuar operando.
- Si compromete la seguridad o eficiencia, revisar la sección de problemas comunes o contactar con soporte técnico.

## PROBLEMAS COMUNES

### **1. Ajuste del O-Ring de Sellado**

1. Retirar la tapa superior desenroscándola cuidadosamente.
2. Verificar el estado del O-ring de nitrilo.
3. Si está dañado, reemplazarlo por uno nuevo del mismo tipo y diámetro.
4. Insertar el O-ring en la ranura asegurando su correcta posición.
5. Volver a colocar la tapa sin aplicar fuerza excesiva.
6. Verificar que no haya fugas durante una prueba de presión.

### **2. Reposición del Portamuestras Modular**

1. Retirar todos los componentes de la cámara.
2. Extraer el portamuestras y los gaskets utilizados.
3. Verificar limpieza y estado del mismo.
4. Insertar el nuevo módulo alineado correctamente en el centro de la base.
5. Asegurarse de que no haya movimiento lateral ni inclinación.

### **3. Ajuste de Válvulas de Ingreso y Salida**

1. Verificar si las válvulas tipo aguja presentan fugas o dificultad para girar.
2. Si es necesario, desmontar con la llave fija.
3. Lubricar ligeramente las roscas con grasa compatible.
4. Volver a instalar asegurando suavidad en el giro y cierre hermético.

### **4. Identificación y Corrección de Posibles Fugas**

1. Aplicar solución jabonosa en todas las uniones y válvulas con el sistema presurizado.
2. Observar si se generan burbujas que indiquen escape de gas.
3. Si se detectan fugas:
  - Despresurizar el sistema completamente.
  - Desmontar la conexión afectada.
  - Limpiar las roscas y volver a sellar con cinta de teflón (5 vueltas).
  - Reinstalar y repetir la prueba.
4. En casos persistentes, reemplazar los componentes defectuosos (válvulas, niples, tapones, etc.).

## **5. Lecturas Incorrectas en el Manómetro o Termómetro**

1. Confirmar que ambos instrumentos estén correctamente instalados y calibrados.
2. Comparar lecturas con instrumentos externos si hay duda.
3. Si las lecturas persisten fuera de rango, reemplazar los instrumentos defectuosos.
4. Asegurar que no haya obstrucciones o condensación en el sensor.

## **6. Obstrucción en la Manguera de CO<sub>2</sub>**

1. Verificar si hay flujo desde el tanque al sistema.
2. Desconectar ambos extremos y soplar con aire comprimido.
3. Revisar que el niple y tuerca CGA 320 no estén obstruidos.
4. Reemplazar la manguera si no se restablece el flujo adecuado.

## **7. Congelamiento de Válvulas por Expansión del CO<sub>2</sub>**

1. Verificar si las válvulas presentan rigidez o bloqueo al operar durante el ingreso de CO<sub>2</sub>.
2. Detener el flujo y permitir que las válvulas regresen a temperatura ambiente.
3. No forzar el giro de las válvulas cuando estén congeladas.
4. Para evitar futuros congelamientos, realizar el ingreso de CO<sub>2</sub> de manera más controlada y gradual.

#### **REGISTRO DE MANTENIMIENTO:**

Este es un ejemplo de una plantilla para registrar las tareas de mantenimiento realizadas sobre el Secador en Punto Crítico (SPC), especificando la fecha, el componente intervenido, el tipo de acción y, en caso de avería, la causa raíz. Se recomienda utilizar este registro de forma sistemática para asegurar que las actividades de mantenimiento preventivo se ejecuten conforme a los plazos establecidos, asegurando así el funcionamiento óptimo y seguro del equipo.

Pieza / Componente	Descripción	Fecha	Remplazo total o parcial	Tipo de tarea	¿Qué lo provoco?
Válvula de tipo aguja	Daño en la cantidad de fluido que ingresa	5/5/2025	Remplazo total	Remplazo	Mal uso

*Tabla 3. Ejemplo de registro de mantenimiento*

#### **SOPORTE TÉCNICO:**

Nicolás Villacís (Diseño del sistema de hermeticidad)

- Nicolasvillacis1@outlook.com

Mateo Obando (Diseño de la cámara a presión)

- Mateoobando2002@hotmail.com

Sebastián Reyes (Diseño del sistema de entrada y salida del fluido)

- sebasreyes2003@gmail.com

Kevin Fierro (Diseño del portamuestras)

- Kevinfierro31@hotmail.com

**ANEXO E: MANUAL DE OPERACIÓN****Manual de uso****Secador de punto crítico****Revisión: 0**

**Tabla de Contenido**

Tabla de Contenido .....	2
Introducción:.....	4
Especificaciones técnicas: .....	6
Componentes del equipo: .....	9
Instalación: .....	11
Operación.....	18
Seguridad .....	20
Solución de problemas: .....	22

## Índice de Figuras

Figura 1. Plano de conjunto SPC.....	9
Figura 2. Limpieza de SPC.....	11
Figura 3. Conexiones eléctricas.....	11
Figura 4. Acople del calentador.....	12
Figura 5. Colocación de la carcasa .....	12
Figura 6. Acople de instrumentos .....	13
Figura 7. Instalación de tapón de seguridad .....	12
Figura 8. Acople de la ventana .....	13
Figura 9. Inserción del portamuestras.....	14
Figura 10. Acople de O-ring.....	15
Figura 11. Colocación de la tapa .....	15
Figura 12. Armado del SPC .....	15
Figura 13. Conexión con tanque de CO2 .....	15
Figura 14. Cápsulas de Petri .....	16
Figura 15. Deshidratación de muestras.....	16
Figura 16. Concentraciones de alcohol.....	17
Figura 17. Concentraciones de alcohol.....	17
Figura 18. Finalización de la preparación de muestras .....	17
Figura 19. Posicionamiento en los gaskets.....	17

## Índice de Tablas

Tabla 1. Instrumentos y sensores.....	8
Tabla 2. Lista de partes SPC .....	10
Tabla 3. Medidas de seguridad al operar la maquina .....	21
Tabla 4. Precauciones ante posibles riesgos .....	22
Tabla 5. Tabla de contactos.....	24

## **Introducción:**

El presente manual de operación ha sido desarrollado con el objetivo de proporcionar una guía detallada y accesible para el uso seguro, eficiente y adecuado del Secador en Punto Crítico (SPC), un equipo diseñado para preservar la integridad estructural de muestras orgánicas y materiales porosos mediante el uso de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en estado supercrítico. Este dispositivo, concebido como una solución técnica y económica para laboratorios con recursos limitados, representa una alternativa funcional frente a los altos costos de los equipos comerciales actualmente disponibles en el mercado. El SPC eliminar líquidos de las muestras sin generar tensiones superficiales, evitando así el colapso o deterioro de sus estructuras. El equipo cuenta con una cámara de presión fabricada en acero inoxidable 316, válvulas de tipo aguja para el ingreso y salida controlada del CO<sub>2</sub>, manómetros y termómetros manuales para la supervisión de parámetros operativos, y un sistema de calentamiento mediante banda calefactora. Está diseñado para operar manualmente a presiones de hasta 1070 psi y temperaturas cercanas a los 31 °C. Para la construcción se definió normas internacionales como la ASME VIII División 1, ISO 3601 y ASME B1.1, que ayudan a definir dimensiones de componentes críticos del sistema, ayudan también a mantener un alto estándar de seguridad y calidad del sistema. Este manual ofrece una referencia estructurada tanto para usuarios con experiencia como para operadores en formación, abordando aspectos clave como las especificaciones técnicas del equipo, la instalación, los procedimientos operativos paso a paso, el mantenimiento preventivo y correctivo, así como los protocolos de seguridad. También se incluyen instrucciones claras para el manejo de muestras delicadas, asegurando su preservación durante el proceso de secado, y se detallan medidas correctivas para la resolución de problemas comunes. Además de su función práctica, este documento pretende fomentar el uso responsable y estandarizado del SPC, apoyando el

desarrollo de habilidades técnicas y científicas entre sus operadores. Su implementación en entornos académicos, de investigación y tecnológicos no solo mejora la calidad de los análisis realizados en microscopía electrónica de barrido (SEM), sino que también promueve la formación en tecnologías de manufactura, diseño mecánico y control de procesos. En conjunto, este manual constituye una herramienta esencial para asegurar un desempeño confiable, eficiente y seguro del equipo durante todo su ciclo de vida.

### Especificaciones técnicas:

El Secador en Punto Crítico (SPC) ha sido diseñado para ofrecer un desempeño seguro, funcional y accesible, orientado a la preservación estructural de muestras biológicas y porosas. A continuación, se detallan sus especificaciones técnicas principales.

#### Generalidades

- **Costo de fabricación:** El desarrollo del equipo, tanto su diseño como la fabricación costo \$1773.24 dólares americanos, considerablemente inferior al de los equipos comerciales disponibles en el mercado.
- **Dimensiones aproximadas:** El equipo tiene un tamaño aproximado de 300mm x 280mm x 400mm.
- **Peso estimado:** 20 kg, permitiendo su instalación en laboratorios con espacio y carga limitada.
- **Vida útil estimada:** 1000000 ciclos de operación
- **Presión máxima de operación:** 1070 psi.
- **Temperatura de operación:** 31 °C
- **Modo de operación:** Manual.
- **Aplicación principal:** Procesos de secado de muestras en preparación para microscopía electrónica de barrido (SEM).

#### Materiales y Componentes Estructurales

- **Cámara de presión:** Acero inoxidable 316, espesor de pared de 17,5 mm.
- **Tapas y sellos:** Tapa superior roscada con sello tórico (O-ring) de nitrilo tipo 212.

- **Soporte:** Material PLA, fabricada mediante impresión 3D.
- **Ventana de visualización:** Tipo NPT, vidrio fusionado en carcasa de acero inoxidable 316, capacidad máxima de 4000 psi.
- **Junta de sellado:** O-ring de nitrilo, 81 mm exterior, 70 mm interior y 4.40 mm de espesor conforme a norma ISO 3601.
- **Tapón de seguridad:** Tapón roscado NPT de  $\frac{1}{2}$ ".
- **Manguera de conexión:** Longitud de 2.5 metros, con tuerca CGA 320 y niple CGA 320.
- **Portamuestras modular:** Estructura interna adaptable, fabricada en acero inoxidable.
- **Gaskets metálicos de alta resistencia:** camaras cilíndricas de acero inoxidable, con perforaciones distribuidas uniformemente alrededor de la superficie.
- **Niples:** Conectores roscados NPT de  $\frac{1}{2}$ ", acero inoxidable.
- **Tanque de CO<sub>2</sub>:** Cilindro presurizado con válvula de salida CGA 320.
- **Carcasa protectora:** Acero inoxidable 316, envolvente exterior.

### Sensores e Instrumentación

Componente	Especificación
Sensor de presión	Manómetro analógico de lectura directa hasta 3000 psi
Sensor de temperatura	Termómetro bimetálico con escala de -20 °C a 120 °C

Válvulas de control	Válvulas tipo aguja de alta presión, modelo <i>High Pressure Bar Stock Needle Valve VN6 ½"</i> , fabricadas con cuerpo de acero, diseñadas para un control preciso del flujo de CO <sub>2</sub> .
---------------------	---

Tabla 1. Instrumentos y sensores

### Sistema de Calentamiento

- Tipo de calentador: Banda calefactora eléctrica de acero inoxidable.
- Rango de temperatura: Hasta 120 °C (controlado manualmente).
- Fuente de alimentación: 110V – 60Hz.

### Seguridad y Normativas

#### Normas aplicadas:

- **ASME VIII División 1:** Criterios de diseño para recipientes a presión.
- **ISO 3601:** Estándares de sellado para O-rings.
- **ASME B1.1:** Roscas unificadas.

#### Medidas de seguridad pasiva:

- Válvula de purga para despresurización segura.
- Válvula de alivio de presión calibrada según presión máxima admisible.

### Componentes del equipo:

#### Plano de conjunto

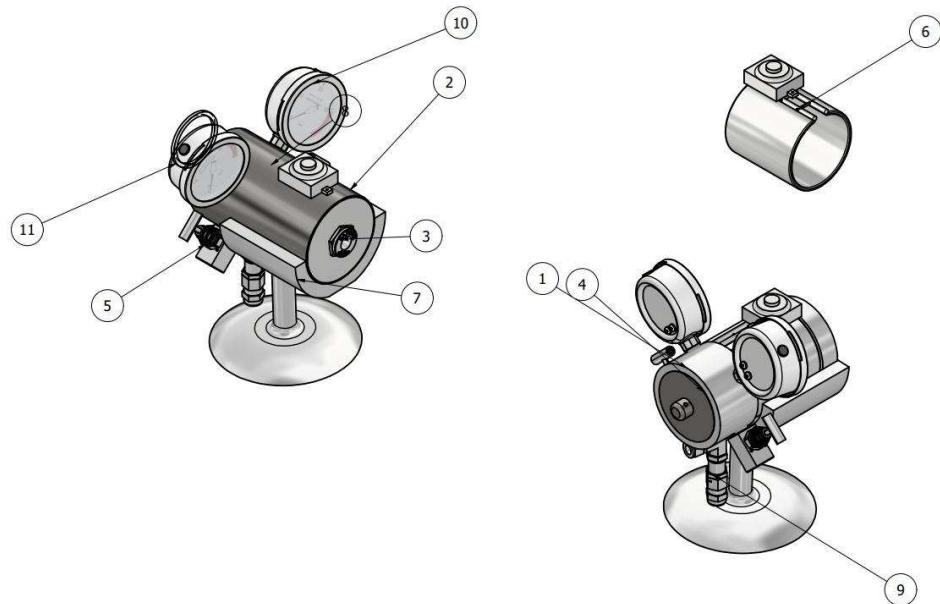


Figura 1. Plano de conjunto SPC

#### Lista de partes

Item	Cantidad	Nombre de parte
1	1	Cámara de presión
2	1	Carcasa protectora
3	1	Ventana de visualización
4	1	Portamuestras
5	2	Válvulas tipo aguja
6	1	Banda calefactora eléctrica
7	1	Base

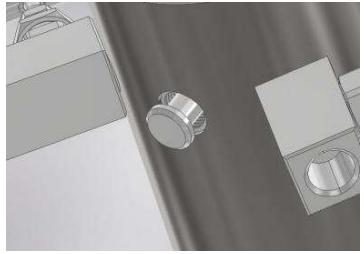
8	1	Tapa
9	1	Tapón de seguridad
10	2	Manómetro y termómetro
11	1	O-ring

Tabla 2. Lista de partes SPC

## Instalación:

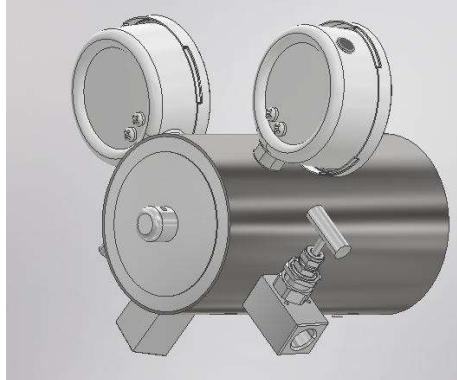
### Proceso de Ensamble

1	2
<p>Limpiar con alcohol isopropílico toda la cámara de presión, asegurándose de que no existan residuos ni impurezas que puedan afectar las muestras.</p> 	<p>La conexión consiste en llevar la fase (L) de la red al terminal de entrada (L-IN) del termostato, que actúa como relé cerrando internamente el contacto hacia L-OUT cuando la temperatura baja, de modo que la fase comutada alimenta el elemento calefactor de la chaqueta; el neutro (N) se conecta directamente al otro polo de la chaqueta y el conductor de protección (PE) se une a las masas metálicas para puesta a tierra. Se recomienda usar cables de sección adecuada, instalar un fusible o disyuntor en serie antes del termostato y verificar continuidad y apriete de bornes antes de energizar.</p> 
3	4

<p>Colocar la chaqueta térmica en el cambio de sección de la cámara y asegurarla firmemente.</p> 	<p>Instalar la carcasa externa en el cilindro, procurando que los cables queden correctamente posicionados para su posterior conexión.</p> 
<p><i>Figura 4. Acople del calentador</i></p>	<p><i>Figura 5. Colocación de la carcasa</i></p>
<p>5</p> <p>Acoplar la instrumentación: termómetros, manómetros y válvulas de ingreso y salida. Antes de roscarlos, aplicar cinta de teflón estándar (5 vueltas) en la rosca para garantizar la hermeticidad. Una vez sellados, proceder con la conexión de cada componente.</p>	<p>6</p> <p>Instalar el tapón de seguridad. Aplicar cinta de teflón (5 vueltas) en la rosca antes de fijarlo.</p> 
	<p><i>Figura 7. Instalación de tapón de seguridad</i></p>

	
<p><i>Figura 6. Acople de instrumentos</i></p>	
<p>7</p>	<p>8</p>
<p>Acoplar la ventana de visualización. Previamente aplicar cinta de teflón (5 vueltas) en su rosca para asegurar el sellado.</p> 	<p>Colocar el portamuestras modular dentro de la cámara, junto con los gaskets requeridos según la prueba a realizar.</p>
<p><i>Figura 8. Acople de la ventana</i></p>	

	 
	<p><i>Figura 9. Inserción del portamuestras</i></p>
9	10
Preparar la tapa superior para su instalación. Insertar el O-ring en la ranura correspondiente antes de colocarla. Este componente es indispensable para lograr un cierre hermético.	Una vez insertado el O-ring, instalar la tapa en la cámara de presión. Esta debe ajustarse al ras del cilindro sin dejar holguras.

 <p><i>Figura 10. Acople de O-ring</i></p>	 <p><i>Figura 11. Colocación de la tapa</i></p>
<p>11</p> <p>Colocar la maquina en la base y verificar que todos los accesorios e instrumentación estén correctamente acoplados para evitar fugas. Cerrar completamente las válvulas de ingreso y salida.</p>  <p><i>Figura 12. Armado del SPC</i></p>	<p>12</p> <p>Preparar el tanque de CO<sub>2</sub>. Colocar extremo de manguera en válvula CGA-320 en la salida del tanque. En el otro extremo, conectar la tuerca a la válvula de ingreso del sistema.</p>  <p><i>Figura 13. Conexión con tanque de CO<sub>2</sub></i></p>

Herramientas necesarias para el ensamblaje del Secador en Punto Crítico:

1. Llave ajustable (perico) 10 pulgadas

2. Cinta de teflón
3. Guantes de nitrilo
4. Pinza alicate

### Preparación de muestras

1	2
Colocar las muestras biológicas frescas y limpias en un recipiente adecuado para inmersión (por ejemplo, tubos Falcon o cápsulas de Petri).	Iniciar el proceso de deshidratación sumergiendo las muestras en una solución de etanol al 10% durante 15 minutos.
 Figura 14. Cápsulas de Petri	 Figura 15. Deshidratación de muestras
3	4
Transferir las muestras, de forma secuencial, a soluciones de etanol al 20 %, 30 % y 40 %, dejando actuar durante 15 minutos en cada concentración.	Pasar las muestras, de forma progresiva, a soluciones de etanol al 50 %, 60 %, 70 %, 80 % y 90 %, manteniéndolas 15 minutos en cada concentración.

	
<i>Figura 16. Concentraciones de alcohol</i>	<i>Figura 17. Concentraciones de alcohol</i>
5	6
<p>Finalizar el proceso de deshidratación con inmersión en etanol al 100% durante 15 minutos. Repetir esta última inmersión (etanol 100%) una vez más para asegurar la completa eliminación del agua.</p> 	<p>Colocar las muestras preparadas en los <i>gaskets</i>, insertarlas en el portamuestras y posicionarlas en el SPC durante el tiempo requerido, según el tipo de muestra</p> 
<i>Figura 18. Finalización de la preparación de muestras</i>	<i>Figura 19. Posicionamiento en los gaskets</i>

Las herramientas necesarias para preparar la muestrar se enlistan a continuación,

1. Recipientes de vidrio o plástico (tubos Falcon, cápsulas de Petri, frascos)
2. Guantes de nitrilo o látex
3. Soluciones de etanol (10 % a 100 %)
4. Pinzas de punta fina (acero inoxidable)

5. Pipeta o micropipeta
6. Toallas absorbentes o papel de laboratorio
7. Reloj o temporizador
8. Bata de laboratorio
9. Gafas de seguridad

## **Operación**

### **Preparación Inicial**

1. Verificar todos los componentes con la lista de componentes previa al encendido.
2. Asegurar que no existan fugas visibles ni elementos sueltos.
3. Confirmar que la manguera esté correctamente conectada al tanque de CO<sub>2</sub> y a la entrada del sistema.
4. Comprobar que las válvulas estén cerradas y que los sensores (manómetro, termómetro) estén bien instalados.

### **Reemplazo de Etanol por CO<sub>2</sub> Líquido**

1. Colocar el portamuestras con los especímenes a realizar adentro del SPC
2. Introducir CO<sub>2</sub> líquido lentamente hasta cubrir por completo las muestras.

3. Realizar de 3 a 5 ciclos de purga: vaciar parcialmente el CO<sub>2</sub> y volver a llenarlo para asegurar la eliminación del etanol.
4. Asegurar que la presión y temperatura sean cercanas a 800 psi y 20 °C.

### **Cruce del Punto Crítico y Secado**

1. Encender la chaqueta térmica y esperar a que la temperatura llegue a 31 °C.
2. Monitorear el manómetro hasta alcanzar 1070 psi.
3. Mantener el sistema en esas condiciones durante el tiempo necesario para cada muestra.
4. Abrir la válvula de salida lentamente para liberar el CO<sub>2</sub> de forma controlada.
5. Esperar que la presión descienda de una manera paulatina hasta cero en un lapso de 10 a 15 min.

### **Apagado Seguro y Limpieza**

1. Desconectar la alimentación eléctrica de la chaqueta térmica.
2. Desconectar la manguera del tanque de CO<sub>2</sub>.
3. Retirar cuidadosamente la tapa superior.
4. Extraer las muestras.
5. Limpiar la cámara y sus componentes con alcohol.
6. Guardar el equipo en un lugar seco y limpio.

### **Almacenamiento y Seguridad**

1. Almacenar el equipo sobre una mesa estable.

2. Mantenerlo alejado de ambientes húmedos o polvorientos.
3. Asegurar correctamente los sellos y empaques para evitar su extravío.

## **Seguridad**

### **Medidas de Protección Personal**

<b>Medida</b>	<b>Descripción</b>	<b>Propósito</b>
Guantes de protección	Guantes de nitrilo o látex resistentes a sustancias químicas	Evitar contacto directo con etanol o CO <sub>2</sub> líquido y evitar daño de muestras.
Gafas de seguridad	Lentes con protección transparente	Prevenir daños oculares por salpicaduras o vapores
Bata de laboratorio	Prenda de manga larga resistente a líquidos	Proteger el cuerpo de salpicaduras o contacto accidental

Mascarilla o respirador	Equipo facial con filtro de vapores	Reducir la inhalación de vapores de etanol en espacios cerrados
Calzado cerrado	Zapatos de seguridad o deportivos de suela antideslizante	Proteger los pies ante derrames o caídas de piezas

Tabla 3. *Medidas de seguridad al operar la maquina*

### Precauciones ante Posibles Riesgos

Riesgo Potencial	Precaución Recomendada	Propósito
Fuga de CO <sub>2</sub>	Verificar sellos, válvulas y conexiones antes del encendido	Evitar asfixia o sobrepresión del sistema
Presión excesiva en la cámara	No superar 1070 psi y monitorear manómetro constantemente	Prevenir explosiones o fallo estructural
Contacto con superficies calientes	No tocar la chaqueta térmica durante la operación	Evitar quemaduras

Inhalación de vapores de etanol	Trabajar en lugares ventilados y usar mascarilla si es necesario	Prevenir efectos tóxicos respiratorios
Descarga eléctrica	Verificar cableado antes de conectar a la red	Prevenir cortocircuitos o descargas
Manejo de componentes frágiles	Utilizar herramientas adecuadas para el manejo de las muestras	Evitar daño en las muestras

Tabla 4. Precauciones ante posibles riesgos

### Solución de problemas:

Fallos comunes y soluciones recomendadas

#### 1. La presión no aumenta durante el proceso

##### Possibles causas:

- Fugas en las conexiones.
- Válvula de ingreso mal cerrada.
- CO<sub>2</sub> insuficiente en el tanque.

##### Solución:

- Verificar todas las uniones con agua jabonosa.
- Asegurar el cierre correcto de la válvula de ingreso.

- Reemplazar o llenar el tanque de CO<sub>2</sub>.

## 2. La temperatura no alcanza la temperatura esperada (31 °C)

### Posibles causas:

- Falla en la chaqueta térmica.
- Conexión eléctrica incorrecta.

### Solución:

- Verificar continuidad eléctrica.
- Confirmar que la chaqueta esté encendida y sus componentes estén conectados correctamente

## 3. No se logra el reemplazo completo del etanol

### Posibles causas:

- No se cubre la muestra con CO<sub>2</sub>
- Ciclos de purga mal ejecutados.

### Solución:

- Verificar que el CO<sub>2</sub> cubra el Gasquet visualmente en la ventana
- Usar un vaso de precipitación en la salida del CO<sub>2</sub> en el cual debe realizarse ciclos de purga hasta que en el vaso no se llene nada de etanol

## 4. El CO<sub>2</sub> se libera de forma violenta al finalizar

### Posibles causas:

- Válvula de salida abierta demasiado rápido.

**Solución:**

- Abrir la válvula de salida lentamente y de forma progresiva para despresurización lenta.

**5. Ausencia de válvula de alivio****Posibles causas:**

- Por limitaciones presupuestarias, se instaló un tapón en lugar de una válvula de alivio.

**Solución:**

- Evitar sobrepresiones.
- Considerar la incorporación de una válvula de alivio si se mejora el presupuesto.

Para consultas, inconvenientes técnicos o requerimientos de información adicional sobre el equipo, puede comunicarse con el fabricante a través de los siguientes datos de contacto:

Tipo de consulta	Nombre	Número de Teléfono	Correo
Hermeticidad	Nicolás Villacís	+593 978657739	Nicolasvillacis1@outlook.com
Eléctrica	Mateo Obando	+593 98 000 0959	Mateoobando2002@hotmail.com
Preparación de muestras	Sebastián Reyes	+593 98 308 0224	sebasreyes2003@gmail.com
Instrumentos	Kevin Fierro	+593 98 024 4711	Kevingfierro31@hotmail.com

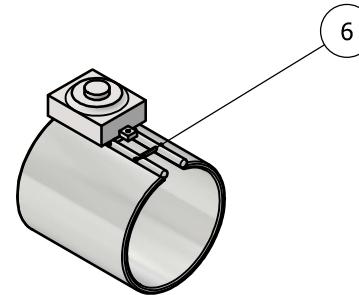
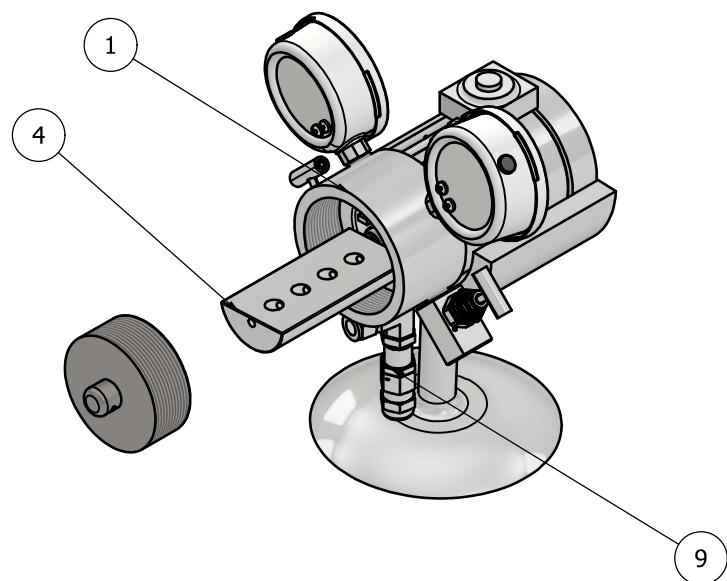
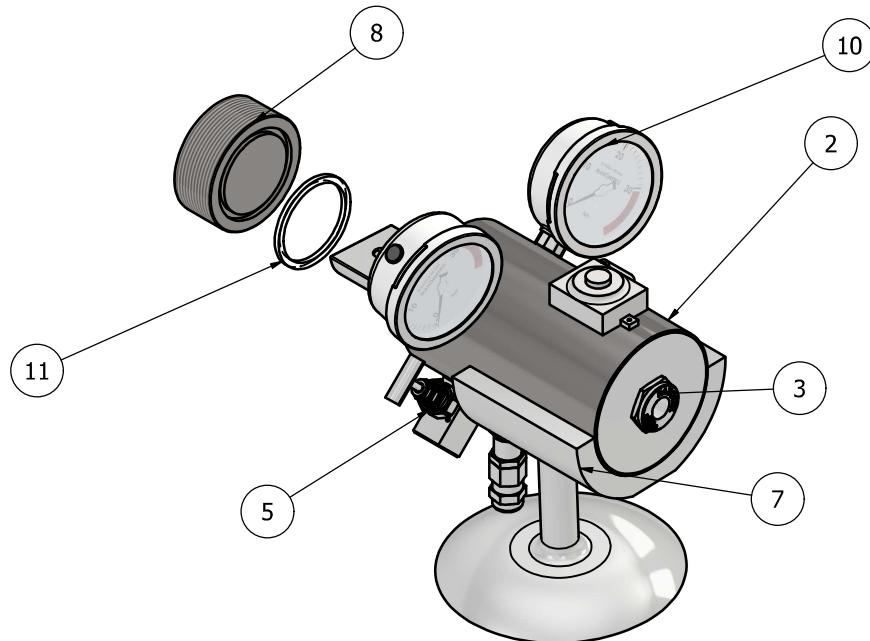
*Tabla 5. Tabla de contactos*

**ANEXO F: PLANOS**

**Universidad San Francisco de Quito**

**Fecha**

04 de mayo de 2025



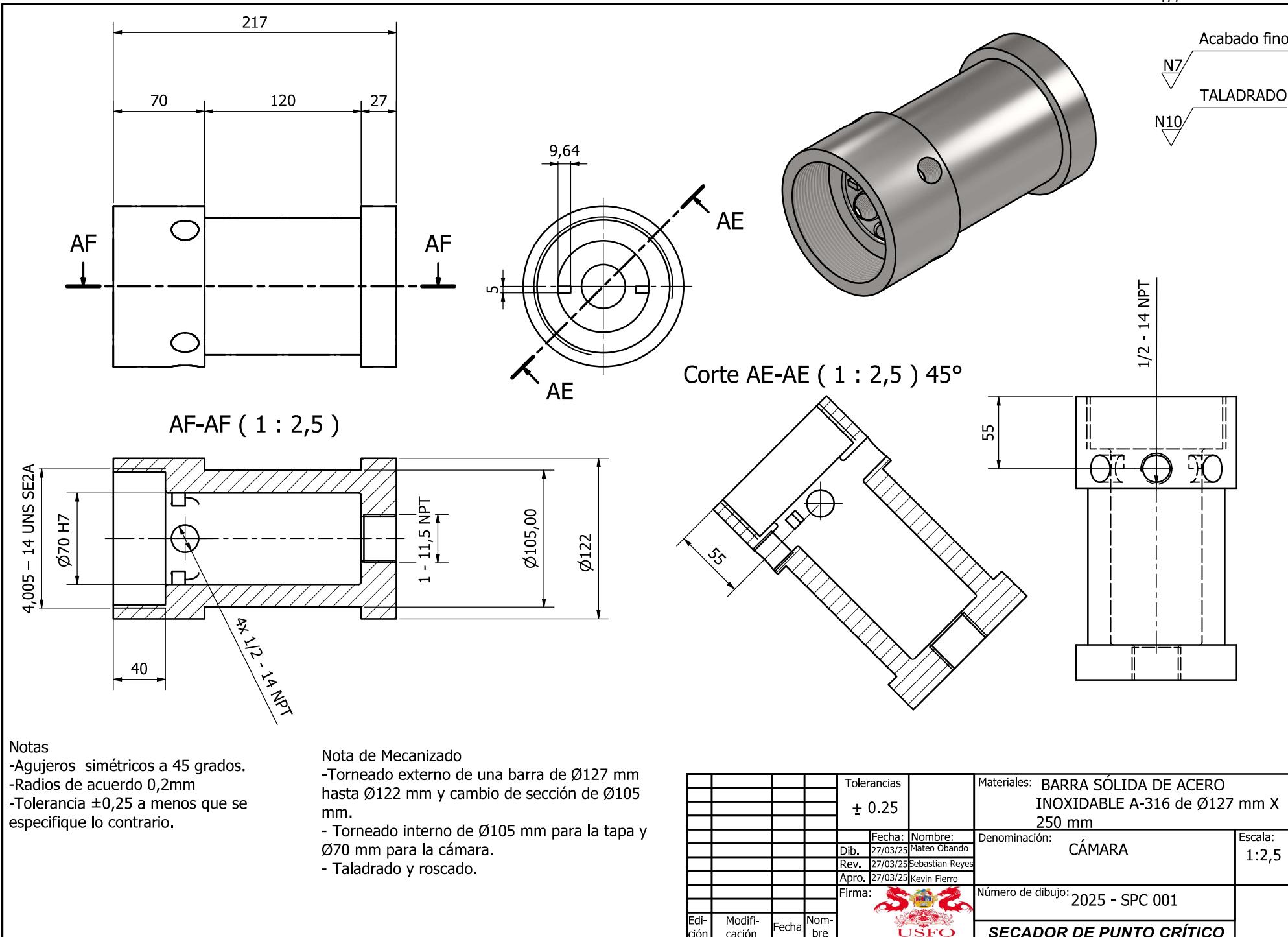
#### PARTS LIST

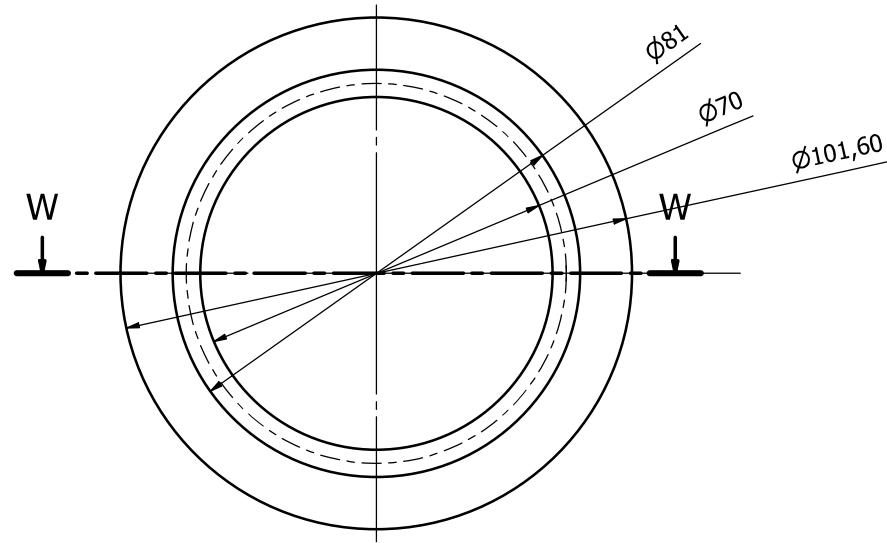
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	2025 - SPC 001	Cilindro cuerpo
2	1	2025 - SPC 002	Carcasa
3	1	2025 - SPC 003	Ventana Rayotek
4	1	2025 - SPC 004	Barco
5	2	2025 - SPC 005	Valvulas de aguja 1/2 NPT
6	1	2025 - SPC 006	Calentador de banda
7	1	2025 - SPC 007	Base
8	1	2025 - SPC 008	Tapa
9	1	2025 - SPC 009	Valvula de seguridad 1/2 NPT
10	2	2025 - SPC 010	Manómetro y termómetro
11	1	2025 - SPC 011	O-ring

Materiales: Varios materiales

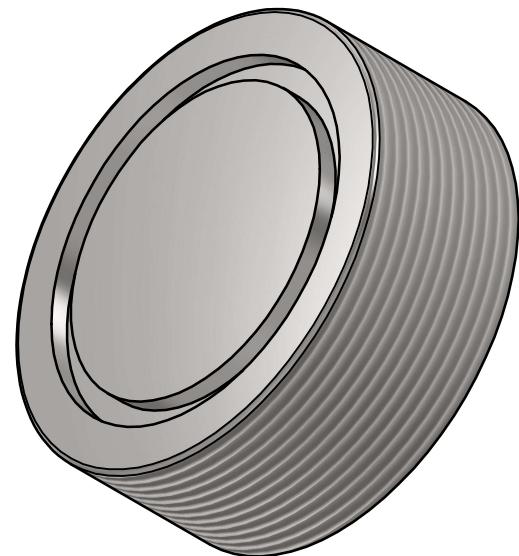
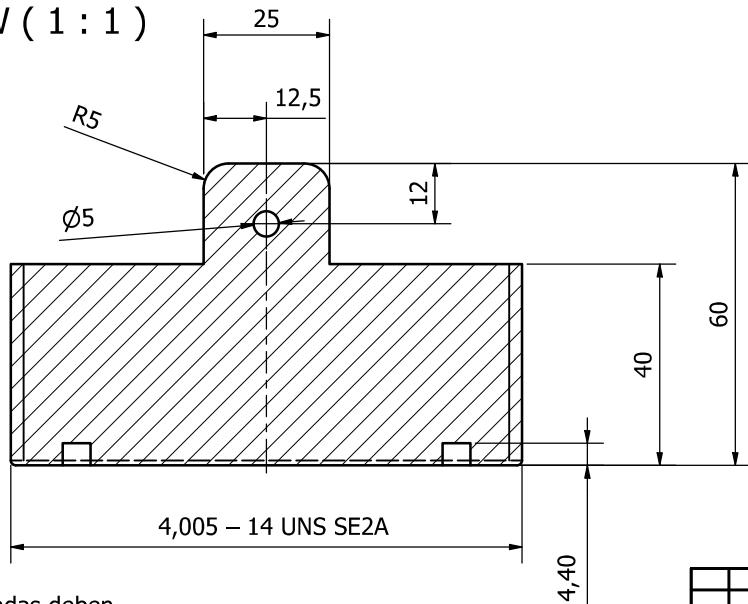
Fecha:	Nombre:	Denominación:	Escala:
Dib.	27/03/25	Mateo Obando	1:4
Rev.	27/03/25	Sebastian Reyes	
Apro.	27/03/25	Kevin Fierro	
Firma:		Número de dibujo:	2025 - SPC 011
<b>SECADOR DE PUNTO CRÍTICO</b>			





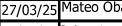


Corte W-W ( 1 : 1 )



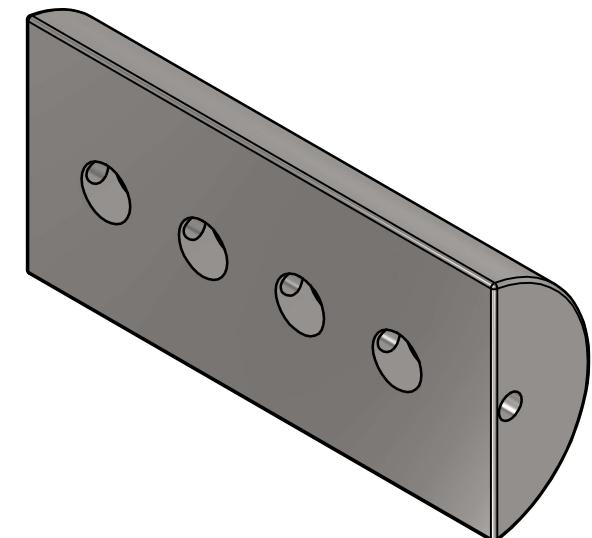
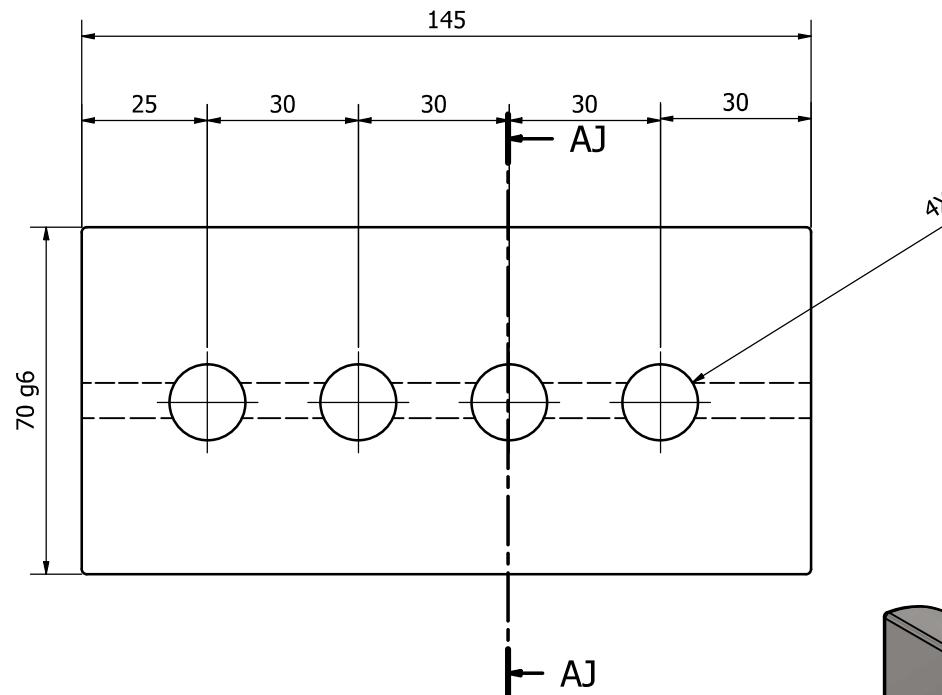
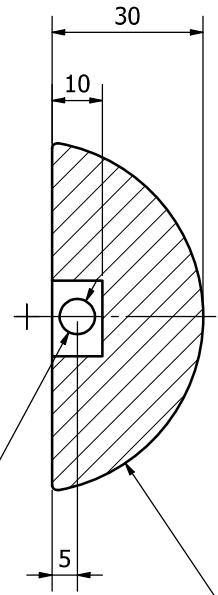
## Nota de mecanizado.

- Todas las superficies mecanizadas deben cumplir con N8.
  - Torneado externo e interno hasta dimensiones finales
  - Roscado externo.
  - Fresado del canal circular con fresa de punta esférica Ø3 mm. y perforación del orificio Ø5 mm.

				Tolerancias ± 0.25	Materiales: BARRA SÓLIDA DE ACERO INOXIDABLE A-316 DE Ø101.60 mm x 70 mm.
				Fecha: Nombre: Dib. 27/03/25 Mateo Obando	Denominación: TAPA
				Rev. 27/03/25 Sebastian Reyes	Escala: 1:1
				Apro. 27/03/25 Kevin Fierro	
			Firma: 	Número de dibujo: 2025 -SPC - 002	
Edición	Modifi-cación	Fecha	Nombre		<b>SECADOR DE PUNTO CRÍTICO</b>

179

Corte AJ-AJ ( 1 : 1 )

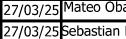


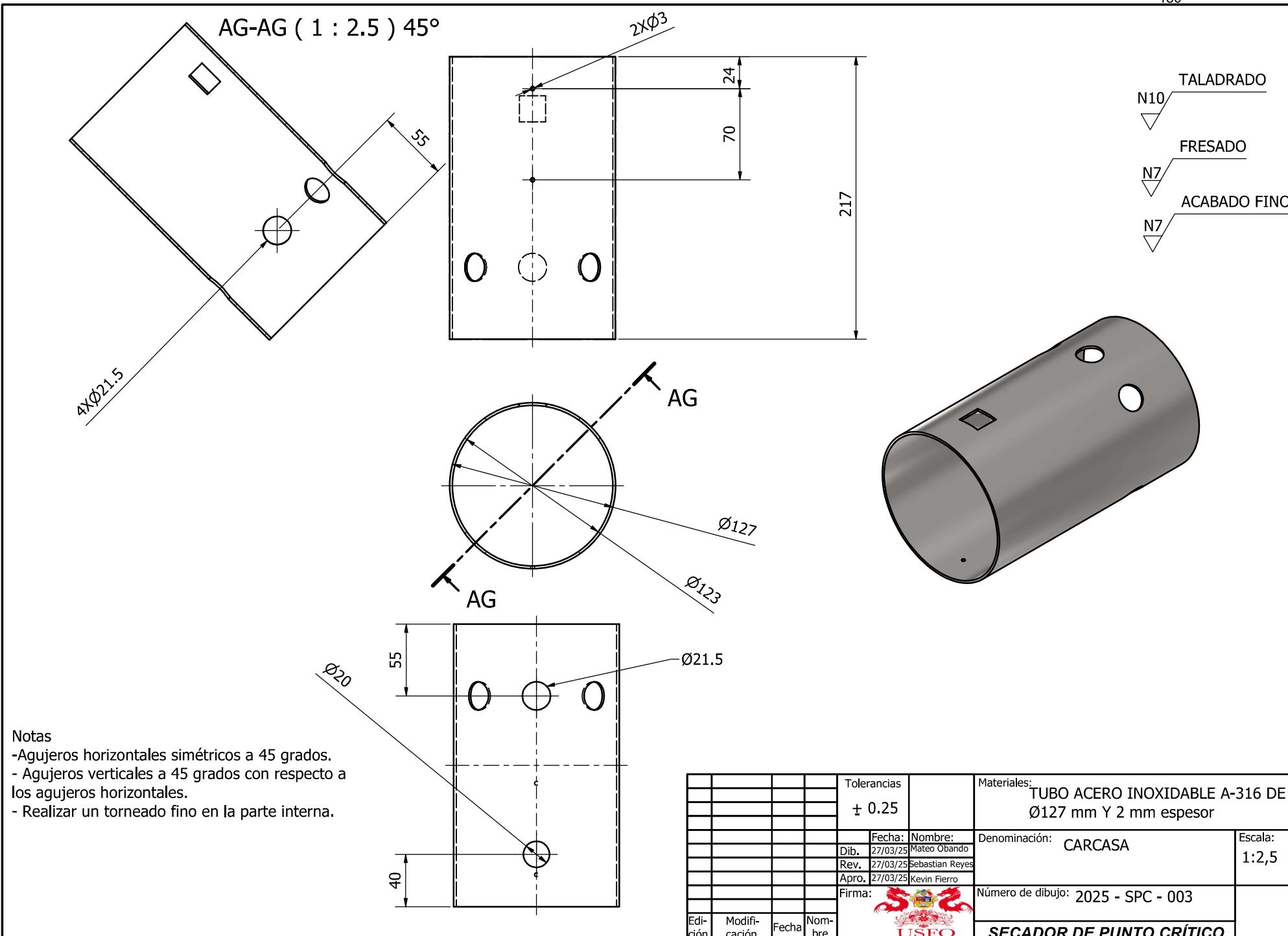
## NOTA

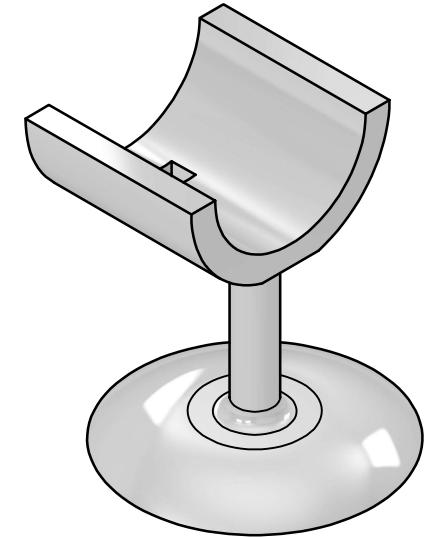
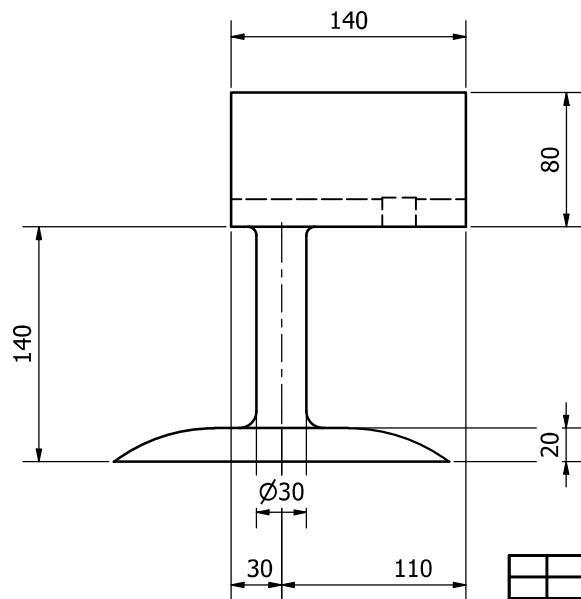
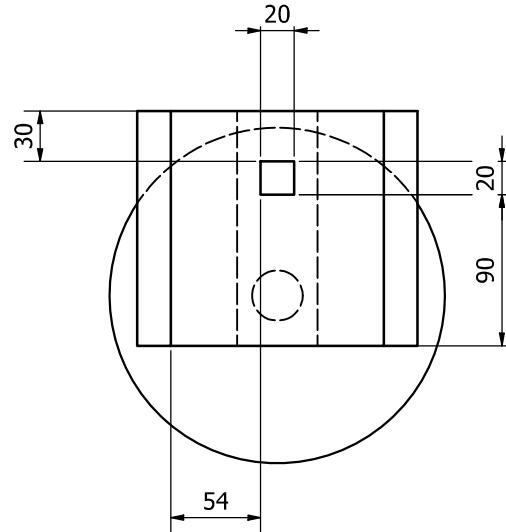
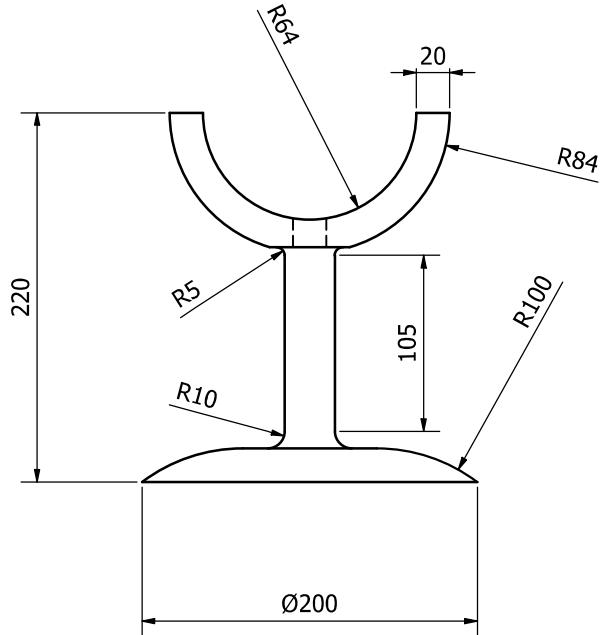
- Radios de acuerdo 0,2mm
  - Tolerancia  $\pm 0,25$  a menos que se especifique lo contrario.
  - Todas las superficies mecanizadas deben cumplir con N8

## Nota de Mecanizado

- Tornear la barra de 76.5 mm a 70 mm.
  - Fresado de superficies planas según N7.
  - Taladrado de agujeros Ø15 y Ø7 mm.

			Tolerancias ± 0.25		Materiales: BARRA SÓLIDA ACERO INOXIDABLE A-316 DE Ø76.2 mm X 190 mm
			Fecha:	Nombre:	Denominación: PORTAMUESTRAS Escala: 1:1
		Dib.	27/03/25	Mateo Obando	
		Rev.	27/03/25	Sebastian Reyes	
		Apro.	27/03/25	Kevin Fierro	
			Firma:		Número de dibujo: 2025 - SPC - 004
Edición	Modificación	Fecha	Nombre		<b>SECADOR DE PUNTO CRÍTICO</b>





#### Notas

- Pieza fabricada por impresión 3D FDM
- Material: PLA
- Relleno: 100%
- Tolerancia general:  $\pm 0,3$  mm
- Orientación de impresión: eje vertical

			Tolerancias $\pm 0,3$		Materiales: PLA
					Denominación: Soporte
					Escala: 1:1
					Número de dibujo: 2025 -SPC - 005
Firma:					
Edición	Modifi-cación	Fecha	Nombre		SECADOR DE PUNTO CRÍTICO