

Diseño de un medidor de espejo enfriado para la verificación de calidad en el gas natural con base en el límite sobre el punto de rocío establecido por el rut

Edgar Mauricio Morantes Rodríguez

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

Msc. Gabriel Fernando García Sánchez

Codirector

PhD. Carlos Eduardo García Sánchez

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE FISICOMECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2022

Agradecimientos

Inicialmente destacar el apoyo incondicional de mi padre Rafel Morantes y mi madre Marina Rodríguez en cada momento importante de mi formación académica y personal.

A mis hermanas Claudia Morantes y Shirley Morantes por brindarme el cariño necesario para continuar cada día.

Agradecimiento especial a mi hermano Edwin Morantes por cada palabra de motivación que me permitió soñar con grandes cosas y su apoyo incondicional en los peores momentos de mi formación profesional.

A Juan Diego Jiménez por su compañía, apoyo, enseñanzas a lo largo de la carrera y soporte para dar mi mejor versión.

A Nicolás Camargo Alvarado por ser la inspiración de perseverancia en los momentos de querer desistir.

A Jaime Andrés González por su incondicionalidad y motivación en los momentos más complicados.

Finalmente, a las personas que aportaron enseñanzas a lo largo de la carrera, de las cuales aprendí cosas muy importantes para toda mi vida. Ellos son: Stephanía Fajardo, Felipe Castellanos y Eder Herrera.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción.....	10
1. Objetivo.....	26
1.1 Objetivo general.....	26
1.2 Objetivos específicos.....	26
2. Diseño metodológico.....	27
2.1 Tipo de investigación.....	27
2.2 Técnicas.....	28
2.2.1 Identificar los parámetros de operación del medidor de espejo enfriado de acuerdo a los requerimientos establecidos por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) planteados en el RUT.....	28
2.2.2 Seleccionar el método para la detección de condensación en el gas.....	31
2.2.3 Representar y dimensionar el medidor de espejo enfriado constante mediante un software CAD.....	34
2.2.4 Simular el proceso de medición del punto de rocío en el gas natural sometido al medidor de espejo enfriado constante por medio de software CFD para comprobar su desempeño.....	34
3. Resultados.....	38
3.1 Identificación de los parámetros de operación.....	38
3.2 Selección del método de condensación.....	41
3.3 Dimensión del medidor de espejo enfriado.....	57
3.4 Simulación del proceso de medición.....	62
3.4.1 Análisis de resultado para la temperatura y velocidad.....	70
3.4.1.1 Temperatura.....	72
3.4.1.2 Velocidad.....	75
3.4.1.3 Valores de Temperatura [T] y Velocidad [U].....	77
4. Conclusiones.....	80
4.1 Trabajos futuros.....	81
Referencias.....	82
Apéndices.....	84

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones de calidad para la intercambiabilidad de gases	11
Tabla 2. Composición del gas natural	25
Tabla 3. Matriz de selección para geometría del espejo	54
Tabla 4. Matriz de selección para detección de la condensación.....	54
Tabla 5. Selección Tubing	58
Tabla 6. Análisis de convergencia.....	69
Tabla 7. Coordenadas para análisis de convergencia	77
Tabla 8. Valores de T y U.....	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Medidor de espejo enfriado	12
Figura 2. Diagrama de fases para hidrocarburos	22
Figura 3. Esquema medidor de espejo enfriado	24
Figura 4. Hygrovision – BL	28
Figura 5. Interfaz Hygrovision – BL	29
Figura 6. Opción 1 para enfriar el espejo	30
Figura 7. Condensación de Hidrocarburos	31
Figura 8. Curva de relación líquido a gas (LGR)	41
Figura 9. Función seno	42
Figura 10. Herramienta Ident	42
Figura 11. Variables en “ident”	43
Figura 12. Revisión de variables	43
Figura 13. Función de transferencia	44
Figura 14. Número de polos en función de transferencia	45
Figura 15. Revisión de función	46
Figura 16. Porcentaje de semejanza.....	46
Figura 17. Valores de la función de transferencia	47
Figura 18. Sistema de lazo cerrado.....	48
Figura 19. Transfer Function.....	49
Figura 20. PID controller	49
Figura 21. Herramienta “tune”	50
Figura 22. Constantes del PID.....	51
Figura 23. Valores del Step	52
Figura 24. Sistema lazo cerrado final	52
Figura 25. Simulación del controlador.....	53
Figura 26. Principio de punto oscuro.....	55
Figura 27. Espejo en forma cónica en condiciones secas	56
Figura 28. Espejo en forma cónica en condiciones de condensado.....	57
Figura 29. Controlador PID WATLOW	58
Figura 30. Dimensiones Tubing	59
Figura 31. Sensor fotoeléctrico de barrera	60

Figura 32. Celda Peltier	61
Figura 33. Funcionamiento celda Peltier	61
Figura 34. Explode.....	62
Figura 35. Tamaño de malla.....	63
Figura 36. Representación de la malla.....	64
Figura 37. Malla en OpenFoam.....	65
Figura 38. Tiempo Fuente de energía	66
Figura 39. Configuración Fuente de energía	67
Figura 40. topoSet.....	67
Figura 41. Configuración de la simulación	68
Figura 42. coalChemistryFoam	68
Figura 43. U vs N°mallamáx	70
Figura 44. Temperatura general.....	71
Figura 45. Velocidad general	71
Figura 46. Resultados de temperatura.....	72
Figura 47. Resultados de velocidad	75
Figura 48. Valores T y U.....	78

LISTA DE APÉNDICES

<i>Apéndice 1.</i> Medidor de espejo enfriado isométrica	85
<i>Apéndice 2.</i> Medidor de espejo enfriado vista de sección	86
<i>Apéndice 3.</i> Subsistemas del medidor de espejo enfriado	87
<i>Apéndice 4.</i> Subsistema de control.....	88
<i>Apéndice 5.</i> Subsistema de enfriamiento	92
<i>Apéndice 6.</i> Subsistema de detección	96
<i>Apéndice 7.</i> Subsistemas de transporte.....	100
<i>Apéndice 8.</i> Subsistema de manejo	102

Resumen

La Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) mediante el Reglamento Único de Transporte de gas natural (RUT) estipuló especificaciones de calidad del gas natural entregado al transportador por el agente en la entrada del sistema de transporte y por el transportador en el punto de salida, con el propósito de facilitar el intercambio de gases sin cambiar la seguridad operativa, eficiencia y desempeño. Por parte de las entidades encargadas de transportar el gas deben asegurar que el punto de rocío de hidrocarburos para cualquier presión no supere el valor de 45°F (7.2°C). Para ello se utiliza un instrumento llamado medidor de espejo enfriado, el cual se identifica como un equipo sujeto a errores de inspección visual por parte del operario, ya que el encargado genera una disminución manual de temperatura en el espejo hasta identificar de manera objetiva el inicio de condensación en el gas natural. Por tanto, se diseñó un prototipo de medidor de espejo enfriado con detección automática basado en el principio Dark Spot, el cual cuenta con un par de sensores barrera encargados de identificar la condensación en el gas natural, además de un controlador PID ajustado para mantener la temperatura del espejo constante a 7.2°C con el fin de cumplir el requisito establecido en el RUT. Para verificar su funcionamiento se realizó una simulación en OpenFoam con los parámetros reales seleccionados, donde permite concluir que existe una mejora en el manejo e interpretación de datos frente a los equipos manuales existentes actualmente.

Abstract

The Energy and Gas Regulatory Commission (CREG) through the Single Regulation for the Transportation of Natural Gas (RUT) stipulated quality specifications for natural gas delivered to the transporter by the agent at the entrance of the transportation system and by the transporter at the exit point, with the purpose of facilitating the exchange of gases without changing the operational safety, efficiency and performance. On the part of the entities in charge of transporting the gas, they must ensure that the hydrocarbon dew point for any pressure does not exceed a value of 45°F (7.2°C). For this purpose, an instrument called a chilled mirror meter is used, which is identified as an equipment subject to visual inspection errors by the operator, since the person in charge generates a manual decrease of temperature in the mirror until objectively identifying the beginning of condensation in the natural gas. Therefore, a prototype of a cooled mirror meter with automatic detection based on the Dark Spot principle was designed, which has a pair of barrier sensors in charge of identifying condensation in the natural gas, in addition to a PID controller adjusted to maintain the mirror temperature constant at 7.2°C in order to meet the requirement established in the RUT. To verify its operation, a simulation was carried out in OpenFoam with the real parameters selected, where it was concluded that there is an improvement in data handling and interpretation compared to the currently existing manual equipment.

Introducción

Descripción del problema

El gas natural cumple un papel importante en aplicaciones como generación de energía eléctrica, sector residencial (cocinas, calentadores) y en el funcionamiento de sus ciclos, generalmente, de potencia. Sin embargo, una situación que ha enfrentado recientemente la industria tiene que ver con el transporte y verificación de calidad del gas natural que se utiliza en las plantas térmicas y demás, ya que un procedimiento inadecuado puede generar alteraciones en el gas, las cuales serán reflejadas al momento de su aplicación, llegando al punto de incluso dañar equipos. Por lo tanto, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) decide mediante la resolución CREG 071 de 1999 establecer el Reglamento Único de Transporte de Gas Natural (RUT) en el cual se estipulan especificaciones de calidad del gas natural entregado al transportador por el agente en la entrada del sistema de transporte y por el transportador en el punto de salida (Energía, Resolución No. 050 de 2018, 2018). Dichas especificaciones se hacen con el propósito de facilitar el intercambio de gases sin cambiar la seguridad operativa, eficiencia y desempeño, así como preservar la integridad de la infraestructura del sistema nacional de transporte y de los consumidores de gas, por lo cual se clasifican según cada propósito. En la tabla uno se presentan las especificaciones de calidad.

Tabla 1. Especificaciones de calidad para la intercambiabilidad de gases

ESPECIFICACIONES	SISTEMA INTERNACIONAL	SISTEMA INGLÉS
Contenido de oxígeno máximo en % volumen	0.1%	0.1%
Contenido máximo de vapor de agua	97 mg/m ³	6.0 Lb/MPCS
Temperatura de entrega máximo	49 °C	120°F
Temperatura de entrega mínimo	7.2 °C	45°F
Contenido máximo de polvos y material en suspensión	1.6 mg/m ³	0.7 grano/ 1000 pc
Número de Wobbe	Entre 46.6 MJ/m ³ y 52.7 MJ/m ³	Entre 1250.0 BTU/ft ³ y 1414.7 BTU/ft ³

Tomado de: Resolución No. 050 de 2018 pg 7

Entre varias especificaciones que se estipulan en el RUT se tiene una referente al punto de rocío de Hidrocarburos la cual se cita textualmente

El punto de rocío de Hidrocarburos para cualquier presión no deberá superar el valor de 45°F (7.2°C) (Sección 6.3.1) (Energía, Resolución No. 050 de 2018, 2018)

Por tal motivo, las entidades encargadas de transportar el gas hacia los lugares de aplicación son, generalmente, las encargadas de verificar la calidad de los gases naturales con base a lo estipulado en el RUT, entre eso asegurar que la temperatura mínima de rocío cumpla con lo requerido para la CREG.

Actualmente, existen equipos que permiten la medición de la temperatura de rocío de los gases, tales como medidores de espejo enfriado, sin embargo, estos equipos poseen porcentajes de error considerables debido a la manipulación de operarios que se ven obligados a ejercer un criterio con base en inspecciones visuales; ya que estos equipos consisten en pasar el gas a través de ellos y de forma manual bajar la temperatura hasta observar la condensación del fluido mediante un espejo que posee el medidor. En la Figura 1 se presenta un medidor de espejo enfriado.

Figura 1. Medidor de espejo enfriado



Tomado de: Determination of Hydrocarbon Dew Point Measurement in Natural Gas (pg. 2)

Un ejemplo a seguir en la implementación de equipos para la medición del punto de rocío se encuentra en Alemania, donde cuentan con instrumentos adaptados para ofrecer resultados con mayor confiabilidad. Trabajan con equipos de medición que poseen sensores en la toma de datos, permitiendo así reducir el error de inspección visual relacionado al operario.

En Colombia se trabaja con la metodología de espejo enfriado automáticamente con analizador en línea, tal como se especifica en la sección 6.3.1 de la Resolución CREG 050 de 2018, cumpliendo con los procesos estipulados en dicha sección. Sin embargo, entidades sin ánimo de lucro como el Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT) ubicado en Bucaramanga, Santander, trabajan para probar equipos que permitan evaluar el cumplimiento del requisito de punto de rocío sin los inconvenientes mencionados, siendo esto una aproximación diferente a la de los equipos comerciales, sin dejar de lado los requisitos estipulados, lo cual es justamente lo que se busca por medio de este proyecto.

Justificación

Actualmente las empresas productoras y transportadoras cuentan con medidores automáticos en línea y medidores de espejo enfriados accionados manualmente para ocasiones puntuales, donde en estos últimos existen operarios encargados de manipular el instrumento de medición cuyo fin es determinar que los gases cumplan con los requisitos de punto de rocío para el transporte y uso industrial con base en límites establecidos en el RUT (7.2 °C).

El principal problema de esta actividad está sujeto al elevado costo de los equipos, junto al error en la exactitud por parte de los operarios, debido a que su criterio está basado únicamente en la inspección visual, generando así inconsistencias al momento de tomar decisiones sobre qué tipos de gases cumplen con los requisitos de calidad, tales como el punto de rocío.

Por medio del diseño del medidor de espejo se tendrán impactos económicos, ambientales, a nivel de Ingeniería Mecánica e incluso se observa un análisis de viabilidad favorable. El impacto en Ingeniería Mecánica está relacionado a la facilidad de inspección y análisis de los gases, permitiendo investigación con base en datos más exactos de lo que se dispone actualmente. Además, facilita el reconocimiento de diversas áreas de aplicación que se puede brindar, permitiendo cambiar el estigma de única aplicación en el campo automotriz.

Por otra parte, después de un proceso de aprobación por parte de la CREG, se tendría un impacto económico favorable a nivel de empresa transportadora, ya que no será necesario tener un operario encargado de manipular manualmente el equipo e inspeccionar visualmente el proceso para reconocer cuando un gas cumple con los criterios, permitiendo a su vez tener una iniciativa de pensamiento Lean. Además, a diferencia de los demás medidores de espejo enfriado, este generaría menor gasto de obtención.

El impacto ambiental que se genera es totalmente positivo, el cual está relacionado con la mezcla de gases local e importado que se presenta actualmente, control que brinda la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), donde se encarga que las variaciones en las mezclas de gases permanezcan en rangos que no afecten la seguridad, confiabilidad y desempeño ambiental de las plantas térmicas.

Con respecto al análisis de viabilidad se encuentra un aspecto positivo al reducir el nivel de error en el proceso de selección, ya que el factor de error humano no estará involucrado en la inspección. Por lo cual, el equipo de medición brinda un criterio exacto en el cumplimiento del requisito de calidad para los gases con base en su punto de rocío.

Marco teórico

A continuación, se presenta el historial de investigación que permite contextualizar, en el campo académico e industrial, la propuesta planteada para el diseño de un medidor de espejo enfriado para la verificación de calidad en el gas natural con base en el límite sobre el punto de rocío establecido por el RUT. Se ubicarán estudios realizados de manera internacional, nacional y local. Seguido, se abordarán los referentes teóricos partiendo de los ítems generados en los objetivos específicos.

Antecedentes de investigación

El correcto transporte y tratamiento del gas natural permite una aplicación óptima en la industria, por lo cual los equipos de medición del punto de rocío tienen gran importancia para entidades como la CREG y los consumidores propios del gas natural. Parte de los proyectos relacionados a las mejoras y usos de los medidores del punto de rocío en el gas serán citados al transcurso del presente ítem.

A nivel internacional

Ampliación y mejora de la capacidad de medida y calibración de higrómetros de punto de rocío con el patrón nacional de humedad en el margen de -10°C a 95°C
(Mussons, 2017)

El objetivo general de este proyecto fue la mejora de higrómetros de punto de rocío en el margen de temperatura de punto de rocío de -10°C a 95°C .

Esto surgió debido a la creciente demanda de trazabilidad de higrómetros de punto de rocío con menor incertidumbre y a temperaturas más altas, lo cual estuvo fomentado por las mejoras de especificaciones declaradas por los fabricantes de instrumentación, por lo que impulsó la puesta en marcha de un nuevo generador patrón de humedad alta, ampliando el rango que se tenía en ese momento hasta 95°C .

Siguiendo con la metodología se denota que aplicaron el método científico en el campo de metrología: la realización primaria de temperatura de rocío y diseminación de la unidad derivada de la humedad. Además, se señaló un artículo guía que utilizó el autor de la tesis, donde inicialmente caracterizaron los higrómetros de punto de rocío, para posteriormente recalcar que la condensación en el espejo a medida que la temperatura se reducía de un valor por encima de la temperatura de rocío producía una reducción en la señal de reflectancia detectada por un sensor óptico, en comparación con la señal superior correspondiente a un espejo limpio. Esa señal actuaba sobre un bucle de control que ajustaba la corriente que pasaba a través de los enfriadores termoeléctricos para obtener un espesor constante de condensado.

Finalmente, como resultado se obtuvo que se amplió y mejoró la capacidad de medida y calibración, lo cual se logró mediante la comparación y cálculos de temperaturas de punto de rocío, así como el estudio de magnitudes de influencia (repetibilidad, reproducibilidad y cociente de temperatura).

Como aporte al proyecto de diseño de un medidor de espejo enfriado se encuentra que aún es posible optimizar las mediciones de los gases con el fin de obtener resultados más precisos al momento de la lectura en la condensación. Además, se entiende que es posible ampliar el rango de aplicación del equipo de medición con el fin de abarcar mayor tipo de gases.

Predicción de propiedades termodinámicas de mezclas de gas natural usando 10 ecuaciones de estado incluyendo una nueva constante cúbica de dos ecuaciones de estado (Nasrifar, 2006).

En el artículo se recalcó lo importante que son las mezclas de gases en las industrias de gas, refiriéndose a producción, procesamiento, almacenamiento y transporte. Se hizo mención de los coeficientes de Joule – Thomson que se usan en los procesos de estrangulamiento y los puntos de rocío que son usados en el diseño de tuberías, cumpliendo la función de parámetro de diseño.

Para la metodología o desarrollo empleado se inicia aclarando que las mezclas de gas natural comprenden muchos hidrocarburos y constituyentes no hidrocarburos con metano como componente principal. El nitrógeno, dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno suelen ser los componentes no hidrocarburos. Posteriormente, se introdujeron dos constantes importantes, Michelsen y Mollerup, teniendo esto en

cuenta se procedieron a hacer los cálculos respectivos para poder generar la predicción de propiedades termodinámicas de mezclas de gas natural.

Finalmente, como resultados se pudo obtener que una mezcla de gas natural es un sistema diferente al de componentes puros. Por lo cual, las propiedades del gas natural y de sus mezclas dependen en gran medida de su composición.

Como aporte al proyecto de diseño de un medidor de espejo enfriado se puede identificar que las mezclas generadas con gas natural comprenden muchos hidrocarburos y algunos no hidrocarburos como metano, nitrógeno, etc... y estos elementos determinan la composición del gas de las cuales definirán la composición de la mezcla.

Determinación de la medición del punto de rocío de hidrocarburos en gas natural (Herring, 2018).

El artículo inicia mencionando la importancia que tiene el punto de rocío en los hidrocarburos, ya que se convirtió en un parámetro crítico, sin embargo, siempre ha sido vital para la industria de oleoductos, por lo que recalca la importancia de obtener mediciones correctas para evitar graves errores que pongan en riesgo plantas, el cumplimiento de requisitos e incluso dañar equipos como compresores, válvulas y otros dispositivos dentro de la tubería. Por lo cual, el objetivo de este trabajo fue identificar los principales factores que contribuyen a las mejores prácticas para medir el punto de rocío de hidrocarburos en gas natural, señalando los tres métodos más populares

- **Método de punto de rocío visual manual**

Este método lo clasificaron como el más simple y más utilizado para medir el punto de rocío en el gas natural. Permite que un operador capacitado detecte el rocío y señale visualmente e interprete esa imagen como un punto de rocío.

Se menciona que posee dos cámaras dentro del instrumento, una cámara de muestra es adecuada para presiones de tubería a 5000 psi, contiene un espejo que es visible a través de un ocular y una segunda cámara que permite que el refrigerante sea conducido a la parte posterior del espejo. Este método presenta ventajas como bajos costo de inversión y modelos seguros. Pero presenta desventajas como porcentajes de error debido a la inspección visual de los operarios.

- **Método de ecuaciones de estado (EOS) usando gas y análisis por cromatografía (GC)**

El gas se vende en función de su poder calorífico y el análisis de GC es utilizado para determinar ese valor. Por otro lado, las ecuaciones de estado predicen el punto de rocío de la muestra de gas, pero este es influenciado por otros tipos de hidrocarburos, lo cual genera cierta incertidumbre.

Este método presenta ventajas como que es potencial para combinar una serie de medidas de calidad del gas con parámetros en un analizador y posibilidad de proporcionar una curva envolvente de fase teórica. Pero posee desventajas en la precisión del análisis ampliado, dependiendo del correcto uso regular de gases de referencia especiales.

- **Método de condensación óptica automática**

Se han presentado buenos resultados mediante este método comparado con el método de rocío manual ya que no están influenciados por operadores e incluyen todos los componentes del gas en su análisis. Posee ventajas de proporcionar un enfoque directo, fundamental, sensible y medición repetible que es objetiva, pero presenta desventajas importantes en su precio, ya que resulta muy costoso utilizar este método de condensación óptica.

Como resultado obtenido en este artículo se encuentra la importancia de conocer los métodos de medición del punto de rocío de acuerdo a la necesidad que se presente.

Como aporte al proyecto de diseño de un medidor de espejo enfriado se encuentra que es el método estándar para medir el punto de rocío de un gas natural, considerándose como el más simple y apto para la industria en general, lo cual permite tener una visión de la importancia que tiene el objetivo del proyecto en la industria.

A nivel nacional

Resolución No. 050 de 2018 (Energía, Comisión de regulación de energía y gas, 2018)

El objetivo principal de esta resolución fue estipular los parámetros de calidad que deben presentar los gases al momento de transportarlos para su respectiva aplicación, esto con el fin de asegurar el buen funcionamiento de los hidrocarburos en la industria térmica y demás aplicaciones.

Por otro lado, se presentan los requisitos para verificar la calidad del gas, entre ellos el punto de rocío de hidrocarburos, donde se establece el valor mínimo (7.2°C) junto a la metodología que se debe usar, la cual es de espejo enfriado.

Como aporte al proyecto de diseño de un medidor de espejo enfriado se encuentra que se cumple con las especificaciones establecidas con respecto a la metodología.

A nivel local

Estado del arte sobre la instrumentación ofrecida por Ametek Process Instruments para aplicaciones con gas natural en plantas petroquímicas (Pereira, 2010).

En este trabajo se mencionó la importancia del punto de rocío de los hidrocarburos y el impacto que tienen en los consumidores y el transporte para llegar hacia ellos. Se recalcó que los hidrocarburos líquidos afectan la energía suministrada por las turbinas de gas, resultando en variaciones en las emisiones, la salida y la estabilidad de las cámaras de combustión de las mismas. Donde se identificó un problema común que se presenta y es cuando existe una exposición a pequeñas cantidades de hidrocarburos líquidos la cámara de compresión presenta descarga de aire.

Posteriormente presentó la importancia de realizar la medición del punto de rocío utilizando tecnología de espejos refrigerados, el cual opera reduciendo la temperatura de una región, mientras que el punto de rocío del hidrocarburo se forma. Por definición la temperatura a la cual el punto de rocío del hidrocarburo se forma es el punto de rocío del hidrocarburo. Seguido, menciona la ineficiencia de los cromatógrafos para medir un punto de rocío de hidrocarburos, ya que están basados

en un método de cálculo, resultando erróneo en algunas ocasiones debido a que el punto de rocío del hidrocarburo es conducido principalmente desde los componentes más pesados presentes en la corriente de gas.

Como aporte al proyecto de diseño de un medidor de espejo enfriado es que permite recalcar la eficacia al momento de utilizar este método de medición.

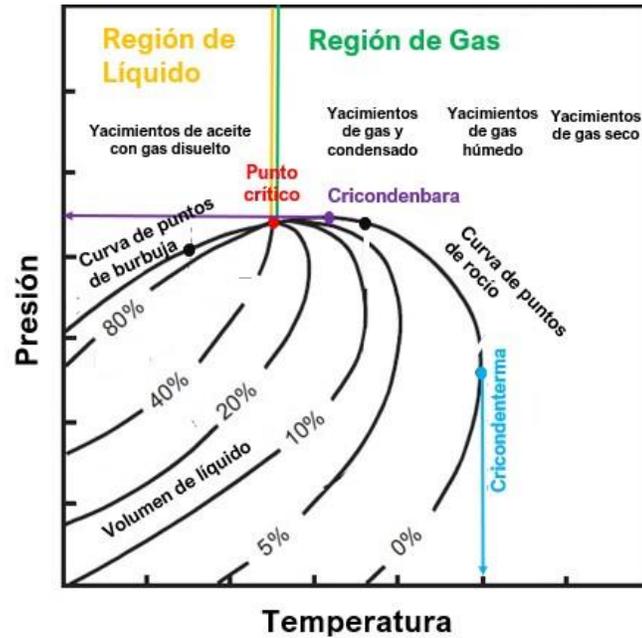
Referentes teóricos

Se realiza un análisis profundo de los conceptos claves presentados en el proyecto, seleccionados con base en el objetivo general.

Punto de rocío

De acuerdo a Cengel y M. Boles, la temperatura de rocío se define como la temperatura a la que se inicia la condensación si el gas se enfría a presión constante (Boles Y. C., 2012). Para el caso del gas natural, mediante la Figura 2, se muestran las envolventes de fase donde el punto de rocío indica la temperatura en la que inicia la condensación de sus hidrocarburos a una presión constante.

Figura 2. Diagrama de fases para hidrocarburos



Tomado de: Epmex Diagrama P-T de mezclas de hidrocarburos

La temperatura del punto de rocío de hidrocarburos se identifica como un parámetro útil en diversas aplicaciones a nivel industrial. Donde generalmente se busca la condensación de los hidrocarburos más pesados para su respectiva remoción, con el fin de evitar atascamientos aguas abajo o incluso cumplir con requisitos para transportar el gas natural.

Medidor de espejo enfriado

Un equipo de medición reconocido para obtener datos del punto de rocío de los gases es conocido como medidor de espejo enfriado.

Estos instrumentos ofrecen diversas mediciones mediante la detección de espejo enfriado, clasificándose como una técnica de medición primaria de buena precisión, obteniendo características como:

- Medir y visualizar simultáneamente el punto de rocío, la temperatura y la presión.
- Correcto registro de la toma de datos.

Sin embargo, actualmente existen equipos manuales y automáticos, donde los manuales están sujetos a más variaciones en la medida que los automáticos.

En Colombia se usan varios métodos de medición del punto de rocío, donde el método visual es uno de los más utilizados en la industria, por lo que se profundiza a continuación.

Método de punto de rocío visual manual

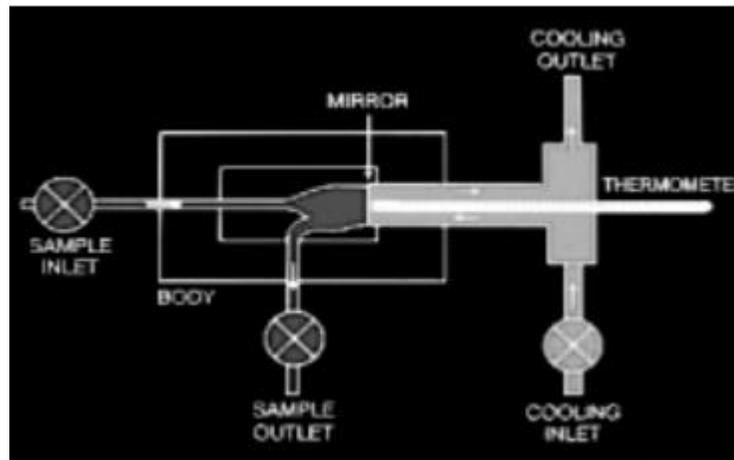
Es el método más simple que hay en la industria y cumple con los requisitos mínimos de medición, llegando a considerarse como el estándar.

Su equipo consta de dos cámaras dentro de él, una es la cámara de muestra que es adecuada para presiones de tubería a 5000 psi, contiene un espejo que es visible a través de un ocular. La segunda cámara permite que el refrigerante sea conducido a la parte posterior del espejo, además existe un método para medir la temperatura del espejo.

El procedimiento para la medición inicia con el operador conectando la muestra al puerto de entrada para posteriormente inicial con la purga de la cámara con un flujo de muestra. El operador estrangula el refrigerante a través de una válvula que enfría el espejo que se encuentra en contacto con el gas de muestra hasta que alcance el punto de rocío. Una vez se llega a este punto de rocío aparecen gotas muy pequeñas que se pueden observar en el espejo, lo cual conlleva a la inspección visual del operario para registrar los datos

hallados. Esta inspección visual está sujeta a algunos errores de medición por falla humana, por lo cual se deben realizar capacitaciones para reducir al máximo posible los errores de lectura.

Figura 3. Esquema medidor de espejo enfriado



Tomado de: Determination of Hydrocarbon Dew Point Measurement in Natural Gas (pg 2)

El equipo presentado en la Figura 3 tiene puntos positivos como que sus modelos son intrínsecamente seguros y necesitan de baja inversión para obtenerlos. Por otro lado, los aspectos negativos están relacionados a la medida subjetiva del operario y altos costos de personal.

Gas natural

El gas natural se considera como una de las Fuentes de energía más limpias entre las convencionales, debido a características como su menor cantidad de dióxido de

carbono y sus menores emisiones a la atmósfera, lo cual la convierte en una energía económica y eficaz.

Una alternativa segura y versátil capaz de satisfacer la demanda energética en los sectores domésticos, comercial e industrial. (Enagas, 2014).

Por otra parte, con respecto a su composición, se trata de un hidrocarburo formado principalmente por metano, aunque también suele contener algunas proporciones variables de nitrógeno, etano, CO₂, H₂O, butano, propano, mercaptanos y trazas de hidrocarburos más pesados. Esta composición cambia de acuerdo al yacimiento.

De acuerdo a Vanti, empresa de distribución y comercialización de gas natural, los hidrocarburos que componen el gas natural de manera típica son:

Tabla 2. Composición del gas natural

Metano	CH ₄	81.86
Etano	C ₂ H ₆	11.61
Propano	C ₃ H ₈	1.92
I-Butano	C ₄ H ₁₀	0.23
N-Butano	C ₄ H ₁₀	0.22
Nitrógeno	N ₂	0.90
Dióxido de carbono	CO ₂	3.18

Tomado de: Grupo Vanti - ¿Qué es el gas natural?

Pregunta de investigación

¿Qué características debe tener el diseño de un medidor de espejo enfriado con temperatura constante para aprobación del requisito de punto de rocío estipulado en el Reglamento Único de Transporte de Gas Natural?

1. Objetivo

1.1 Objetivo general

Diseñar un medidor de espejo enfriado con temperatura constante para aprobación del requisito de punto de rocío estipulado en el Reglamento Único de Transporte de Gas Natural (RUT).

1.2 Objetivos específicos

- Identificar los parámetros de operación del medidor de espejo enfriado de acuerdo a los requerimientos establecidos por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) planteados en el RUT.
- Seleccionar el método para la detección de condensación en el gas.
- Representar y dimensionar el medidor de espejo enfriado constante mediante un software CAD.
- Simular el proceso de medición del punto de rocío en el gas natural sometido al medidor de espejo enfriado constante por medio de software CFD para comprobar su desempeño.

2. Diseño metodológico

En esta sección se identifica el tipo de investigación enmarcado para el proyecto de investigación, junto a la identificación del área que va dirigido el proyecto. Finalmente, se analizarán las estrategias necesarias para cumplir con los objetivos específicos, junto a los instrumentos respectivos, los cuales llevarán al correcto desarrollo del planteamiento.

2.1 Tipo de investigación

Se reconocen los métodos mixtos como la combinación de la perspectiva cuantitativa y cualitativa en un mismo análisis, con el objetivo de darle profundidad al estudio cuando las preguntas de investigación son complejas (Hamui-Sutton, 2013). Por otro lado, se entiende un enfoque descriptivo como el diseño de investigación, creación de preguntas y análisis de datos que se llevarán a cabo sobre el tema (Questionpro, 2022), es decir, se identifica como el análisis de las características primordiales en un fenómeno y especifica sus propiedades, junto con la descripción de las tendencias en los grupos que se estudian. De acuerdo a la información suministrada, se infiere que el proyecto de investigación está enmarcado en el método mixto, ya que reúne características de la perspectiva cuantitativa (cálculos, análisis de datos) y cualitativa (impacto en la sociedad), en el cual se realizan cálculos necesarios para conocer el punto de rocío, junto a los parámetros que presentan el diseño (material, método de detección). Además, el proyecto se identifica con un enfoque descriptivo debido al análisis del comportamiento de la temperatura de punto de rocío y las propiedades que poseen los gases, donde se muestran sus aplicaciones en el proyecto, junto a sus beneficios. El proyecto de investigación presentado busca aplicar conocimientos de estudios previos en una problemática específica, como lo es la necesidad de aumentar la exactitud en la medida

de punto de rocío con el fin de cumplir con los requisitos establecidos por el RUT para el comportamiento de los hidrocarburos.

2.2 Técnicas

2.2.1 Identificar los parámetros de operación del medidor de espejo enfriado de acuerdo a los requerimientos establecidos por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) planteados en el RUT.

Para identificar los parámetros de operación se analizó un equipo de medición existente para comprender su funcionamiento, composición y con base en él proponer el diseño de espejo enfriado a temperatura constante.

Para ello, CDT del Gas cuenta con un medidor de punto de rocío automático Hygrovision-BL marca Vympel, el cual posee medición manual, presentado en la Figura 4.

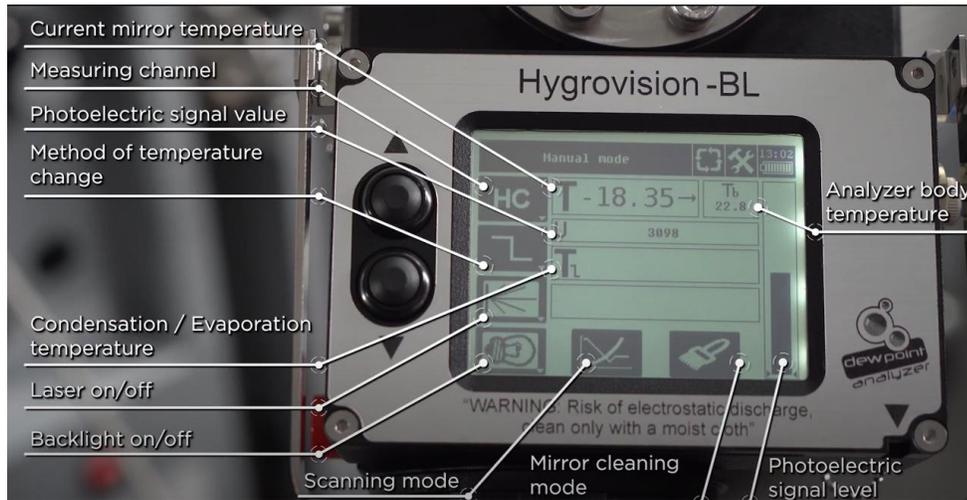
Figura 4. Hygrovision – BL



Tomado de: Vympel the Hygrovision – BL dew point analyzer

El equipo de medición cuenta con una interfaz que permite configurar el analizador y tener lecturas exactas del fluido en cuestión, el cual se presenta a continuación.

Figura 5. Interfaz Hygrovision – BL



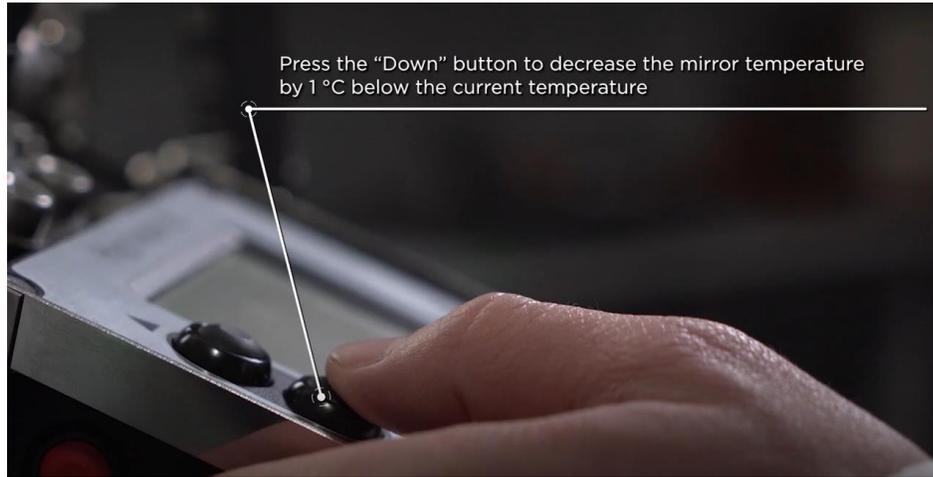
Tomado de: Vympel the Hygrovision – BL dew point analyzer

En el proceso de configuración se identifica un paso importante denominado escaneo, el cual debe realizarse antes del respectivo análisis del gas natural. En este paso, el espejo, encargado de reflejar la condensación, se enfría a la temperatura que se forma una película de hidrocarburo, enfriándose a razón de 0,5 °C/min, donde posteriormente el espejo se calienta y se estabiliza a una temperatura 10 °C por encima de la temperatura a la que se formó la condensación.

Además, cuenta con dos opciones para conseguir un correcto análisis del punto de rocío en los hidrocarburos, las cuales están relacionadas con el decrecimiento del espejo encargado de revelar la película de condensación del gas natural.

Se puede realizar un decrecimiento de 1°C de manera manual cada vez que se presione el botón inferior de la interfaz, como se plantea en la figura 6.

Figura 6. Opción 1 para enfriar el espejo



Tomado de: Vympel the Hygrovision – BL dew point analyzer

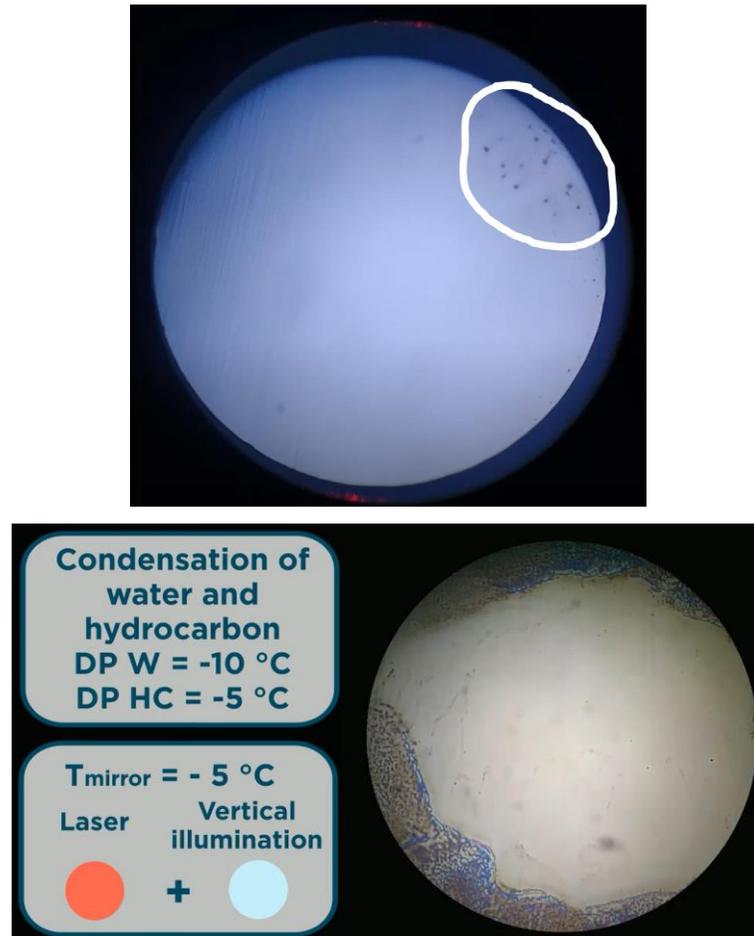
O se puede programar una tasa de decrecimiento por 1°C/min presionando solamente una vez el botón inferior de la interfaz.

Dicho esto, se recalca la diferencia en el funcionamiento del equipo propuesto.

A diferencia de un equipo como Hygrovisión – BL, se plantea un medidor de espejo enfriado cuyo funcionamiento sea de temperatura constante. Donde su método de medición no sea un enfriamiento descendente a partir de una temperatura estipulada, sino un enfriamiento donde permita mantener una temperatura estable de 7.2°C.

Finalmente, al realizar un correcto procedimiento de medición, se procede a identificar la condensación en el gas natural tal como se muestra en la Figura 7.

Figura 7. Condensación de Hidrocarburos



Tomado de: Vympel the Hygrovision – BL dew point analyzer

2.2.2 Seleccionar el método para la detección de condensación en el gas.

Inicialmente, mediante Matlab se diseñó el controlador para permitir una medición a temperatura constante del gas natural.

Para ello, fue necesario obtener la función de transferencia que representa el modelo del medidor de espejo enfriado, lo cual se obtuvo mediante la función “ident”. Se generó una función seno, con sus respectivas variables, para luego ejecutar dicha herramienta.

Una vez se ejecutó el comando “ident” se utilizó la herramienta transfer function con el fin de obtener una función de transferencia estimada con su respectiva cantidad de polos que solicitaba el comando. Seguido, se comparó la función generada con la función seno original, permitiendo establecer un porcentaje de similitud.

Finalmente se trasladó al workspace la función de transferencia generada, con el fin de poder utilizarla en los siguientes pasos correspondientes al sistema de lazo cerrado.

Para generar el sistema de lazo cerrado se utilizó Simulink, donde el sistema estuvo compuesto de los siguientes elementos:

- Step
- Sumador
- PID controller
- Transfer FCN
- Scope

La configuración de cada elemento se presenta a continuación:

- Step: Valor inicial de 17, para lo cual se tuvo en cuenta el paso de scaneo que presenta el equigo Hygrovisión – BL.
- Sumador: En función suma y resta.
- PID controller: Se utilizó la herramienta tune para encontrar las constantes que describen el comportamiento del medidor de espejo enfriado.
- Transfer FCN: Se añadió la función de transferencia generada en pasos anteriores.
- Scope: Elemento estándar cuya función es mostrar de manera gráfica el comportamiento del sistema de lazo cerrado.

Finalmente se simuló el sistema para analizar el funcionamiento del controlador de manera gráfica.

Posteriormente, se analizó el comportamiento del medidor de espejo enfriado para encontrar la película de condensación formada en el gas al momento de someterlo a su respectiva inspección.

Dicha inspección se basa en el efecto de refracción total, el cual se logra mediante el ángulo de Brewster, donde el rayo reflejado y transmitido forman un ángulo de 90° . Para ello, generalmente el equipo cuenta como un láser polarizado verticalmente y el material del espejo es dieléctrico.

Al formarse una película de hidrocarburo con un índice de refracción diferente al de la superficie del espejo, no se cumplen las condiciones de refracción total, formando una nueva onda reflejada en el límite del medio de la película de gas. Por otro lado, consecuencia de la transparencia óptica de la película de condensado, se forma otra onda reflejada. Por lo cual, el fotodetector capta dos haces reflejados que componen un patrón de interferencia.

De acuerdo a Vympel, la medición del punto de rocío de hidrocarburos se produce cuando el espesor de la película es de unos 5-10 nm, lo cual, para el caso de inspección visual, sólo puede observarse a través del microscopio cuando la iluminación vertical de la superficie del espejo está encendida (Vympel, 2022).

Teniendo en cuenta el efecto responsable de identificar la condensación del gas en el medidor de espejo enfriado, se procedió a seleccionar las mejores alternativas, para inferir el punto de rocío mediante matrices de selección.

Posteriormente, se llevaron a cabo cada una de las selecciones planteadas.

2.2.3 Representar y dimensionar el medidor de espejo enfriado constante mediante un software CAD.

Inicialmente, se procedió a seleccionar un controlador PID para mantener la temperatura del espejo constante, de acuerdo al valor planteado en el RUT.

Seguido, se identificó un tipo de tubería utilizado para transportar el gas a la cámara de muestra, conocido como Tubing. Por tanto, se realizó una selección de acuerdo a algunos parámetros de operación identificados en objetivos anteriores tales como la presión operacional.

Posteriormente, teniendo en cuenta la matriz de selección, se procedió a elegir el equipo relacionado a la alternativa óptima.

Seguido, el equipo encargado de generar la transferencia de calor para mantener el espejo enfriado se conoce como celda Peltier, la cual presenta una diferencia de temperatura entre sus caras de acuerdo a la energía eléctrica que transite a través de él. Por lo cual, se hizo la respectiva selección de la celda Peltier y sus complementos.

Finalmente, se realizó la representación y dimensionamiento mediante Solidworks.

2.2.4 Simular el proceso de medición del punto de rocío en el gas natural sometido al medidor de espejo enfriado constante por medio de software CFD para comprobar su desempeño.

Inicialmente se hizo la selección del software CFD para simular el proceso de medición, donde OpenFoam fue el programa que mejor se adaptó a nuestra necesidad.

OpenFoam es un software gratuito de código abierto para la dinámica de fluidos computacionales, el cual está disponible únicamente en Linux, por lo cual se procedió a trabajar con un subsistema de Windows para Linux, permitiendo trabajar únicamente desde un terminal por medio de Ubuntu.

Todos los solver de OpenFoam cuentan con tres carpetas que se describen a continuación:

1. Zero: Se ubican los ajustes de valores iniciales del solver, contiene aquellas variables que componen el sistema.
2. Constant: Contiene las propiedades del sistema y además contiene la carpeta de la geometría (polymesh).
3. System: Contiene los archivos de configuración para correr el solver de cada programa.

Posteriormente, se planteó ¿Qué situación queremos representar mediante OpenFoam?, donde se decidió simular el comportamiento de la temperatura a través del proceso de enfriamiento al que es sometido el medidor de espejo real. Para ello, se procedió a ubicar un solver que permitiera representar nuestras condiciones y variables de una correcta manera, acercándonos a la realidad lo máximo posible.

Por esto, el solver seleccionado fue coalChemistryFoam, el cual es un solucionador de transitorios para flujo comprimible y turbulento, con nubes de partículas de carbón y piedra caliza, aplicado a procesos de combustión. Este solver cuenta con una Fuente de energía y un ingreso de gases con cantidades especificadas por el usuario. En nuestro caso, la Fuente de energía representa la celda Peltier encargada de enfriar el

gas natural en cuestión, y por parte de los hidrocarburos que ingresan se añadieron los que conforman el gas natural, tales como:

- CH₄ [Metano], con una cantidad de 0.81
- N₂ [Nitrógeno], con una cantidad de 0.09
- CO₂ [Dióxido de carbono], con una cantidad de 0.1

Por otro lado, se hicieron los respectivos cambios para que no aparecieran los procesos de combustión y lograr adaptar el solver a nuestro objetivo, por lo cual fueron eliminadas las partículas de carbón y piedra caliza, se añadieron los valores reales de temperatura del gas natural al ingreso del equipo, la velocidad de ingreso y la presión real de operación.

El paso a seguir tuvo que ver con la geometría o dominio computacional, para ello se utilizó una plataforma de código abierto para simulación numérica que permite crear mallados para su respectivo análisis. Su nombre es Salomé, la cual, en sus múltiples opciones, permite importar piezas CAD en formato STEP para generar su mallado de una manera exacta con el prototipo del equipo planteado. Por lo tanto, se importó la pieza principal desde SolidWorks a Salomé, para posteriormente nombrar sus límites y crear el mallado que se utilizaría en OpenFoam.

Finalmente se exportó el mallado en formato Unv para transformarlo a un formato compatible con OpenFoam por medio de Ubuntu.

Una vez se importó el mallado de Salomé a OpenFoam, se creó una carpeta denominada Polymesh, en la carpeta 'constant', al ejecutar el comando

‘ideasUnvToFoam <nombre del archivo.unv>’. Con esto ya se tenía incorporado el dominio computacional con el cual se trabajaría.

Seguido, se tuvieron que añadir los límites de la geometría en cada carpeta que contiene las variables a calcular, ubicadas en la carpeta ‘0’. Además, en la carpeta Polymesh se tuvo que cambiar el tipo de límite en cada cara, donde los muros debían llevar el comando ‘wall’ y las entradas ‘patch’, permitiendo así el correcto funcionamiento de la simulación.

Posteriormente, se ajustó la Fuente de energía que en nuestro caso representa la celda Peltier, encargada de enfriar el gas natural en cuestión, cambios realizados en la carpeta ‘system/topoSetDict’. Para ello, se añadieron las dimensiones reales de la celda y se asignó el valor correspondiente de su temperatura ($7.2^{\circ}\text{C} = 280.35\text{ K}$), donde se tuvo que adecuar la geometría real de la celda mediante el siguiente comando:

```
box      (0.000 0.040 0.040) (0.040 0.080 0.044)
```

Donde ‘box’ señala que será una caja como Fuente de energía, seguido de las coordenadas que representan los puntos mínimos y máximos en cada eje coordenado.

```
box (Xmín Ymín Zmín) (Xmáx Ymáx Zmáx)
```

Las unidades están dadas por metros.

Por otro lado, en la carpeta ‘constant/FvOptions’ se estableció el tiempo en que la Fuente permanece activa para lograr una correcta simulación.

Una vez se establecieron los parámetros de la Fuente de energía, se ejecutó el comando 'topoSet' en OpenFoam para poder activar la Fuente .

Teniendo listo el mallado, la Fuente , los límites y las variables ajustadas a los valores reales, se procedió a ejecutar el solver 'coalChemistryFoam' en OpenFoam.

Seguido, para visualizar los resultados obtenidos de la simulación se utilizó 'ParaView', la cual es una aplicación multiplataforma de código abierto para visualización interactiva y científica. ParaView permitió analizar los resultados y obtener una representación acertada de la simulación hecha en OpenFoam.

Una vez se comprobó el correcto funcionamiento de la simulación, se procedió a realizar un análisis de convergencia, en el cual se varía el tamaño de la malla y se ejecuta el mismo procedimiento descrito anteriormente para iterar hasta obtener un tamaño de malla que sea exacto con los resultados y su tiempo de ejecución sea óptimo. Los valores tomados en cuenta para la iteración fueron la temperatura [T] y velocidad [U], medidos en un punto específico de la geometría establecido en ParaView.

3. Resultados

3.1 Identificación de los parámetros de operación

Teniendo en cuenta el funcionamiento y composición del equipo de medición Hygrovision BL, fue posible identificar los parámetros de operación respectivos, los cuales se listan a continuación.

- **Rango de medición de temperatura de condensación de hidrocarburos y punto de rocío**

Tiene la capacidad de operar de -30°C a temperatura ambiente para la condensación de hidrocarburos y de -50°C a temperatura ambiente para el punto de rocío.

- **Temperatura de funcionamiento**

Tiene como rango: -10°C a 50°C .

- **Caudal de gas de la cámara de medición**

Corresponde al rango: 0.5 – 5 [L/min].

- **Presión operacional**

Depende del kit que venga predeterminado en el equipo de medición, se establecen unos rangos de presión. En kit KRAU2.844.007 - de 0,1 a 30 [MPa] y en kit KRAU2.844.007-01 - de 0,1 a 16 [MPa].

Por otro lado, fue importante caracterizar el gas natural para así conocer algunas condiciones que se presentan al momento de exponerlo al medidor de espejo enfriado.

El gas natural es un energético que se extrae del subsuelo y puede encontrarse en dos estados:

- Asociado: Se encuentra mezclado con el crudo en el yacimiento
- Libre o no asociado: Se encuentra en un yacimiento único de gas natural.

Teniendo en cuenta la composición del gas natural, se identificaron los siguientes parámetros de operación para el gas natural al momento de analizarlo en el medidor de espejo enfriado:

- **Presión**

Es importante conocer la presión a la que se encuentra el gas, para así poder determinar si coincide con los parámetros de operación presentados por parte del medidor de espejo enfriado. Además, teniendo en cuenta la definición de punto de rocío que indica la temperatura donde inicia la condensación de un fluido a una presión constante, se infiere que la presión es un parámetro para tener en cuenta.

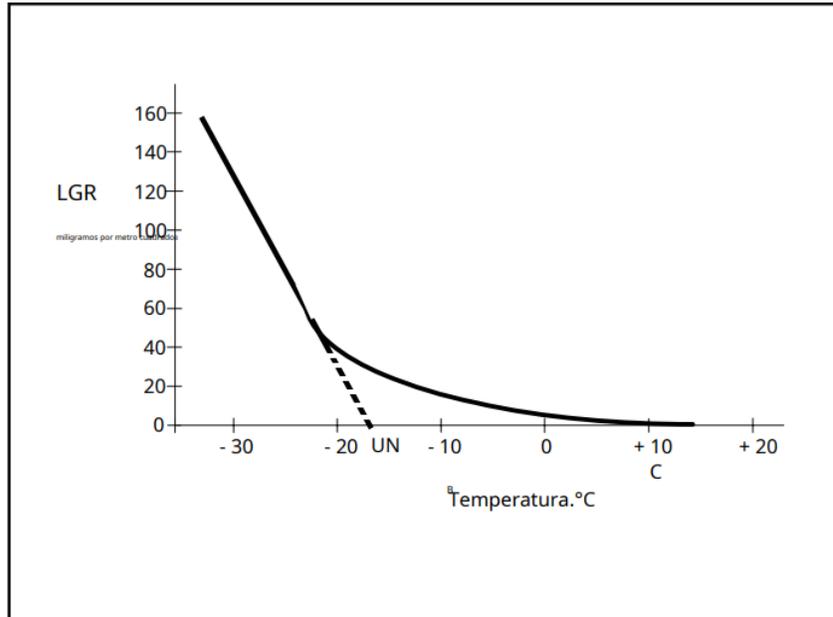
- **Velocidad de enfriamiento**

La velocidad de enfriamiento es un parámetro importante para poder identificar de manera correcta la condensación del gas, ya que, a diferencia del agua, el gas natural está compuesto por varios compuestos con diferente peso molecular, presentando así una condensación fraccional.

- **Condensación fraccional**

Como se mencionó anteriormente, el gas natural está compuesto por varios hidrocarburos, los cuales tienen diferente peso molecular, permitiendo así un comportamiento de condensación fraccional, donde los hidrocarburos más pesados inician su condensación aproximadamente 20°C por encima del nivel en que el ojo humano puede percibir las primeras películas de condensación en el gas. Por lo tanto, este efecto fraccional afecta negativamente la repetibilidad y sensibilidad de la medición, se representa mediante la Figura 8.

Figura 8. Curva de relación líquido a gas (LGR)



Tomado de: DETERMINATION OF HYDROCARBON DEW POINT IN NATURAL GAS.

ANDY BENTON (pg.5)

- **Volumen de muestra fijo**

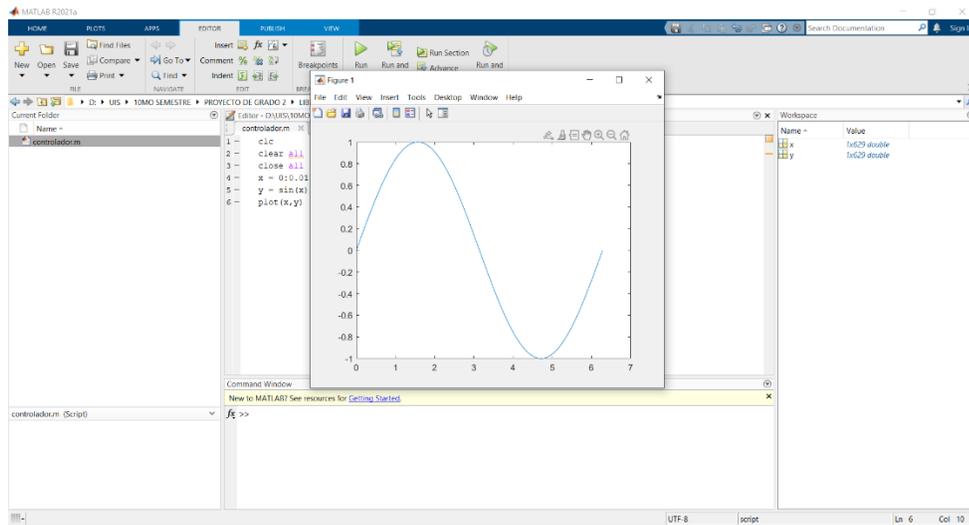
Para lograr un rendimiento óptimo de medición, cualquier técnica automática del tipo medidor de espejo enfriado debe operar con un volumen fijo de muestra dentro de la celda de análisis antes de iniciar cada fase de medición.

3.2 Selección del método de condensación

A continuación, se presenta el resultado de diseñar el controlador de temperatura para el medidor de espejo enfriado.

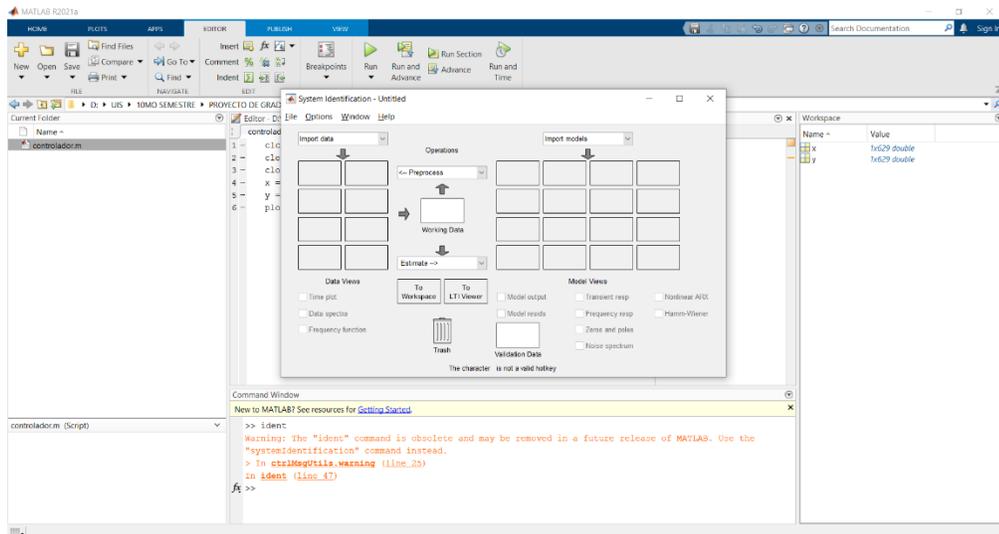
DISEÑO DE UN MEDIDOR DE ESPEJO ENFRIADO

Figura 9. Función seno



Tomado de: Matlab

Figura 10. Herramienta Ident



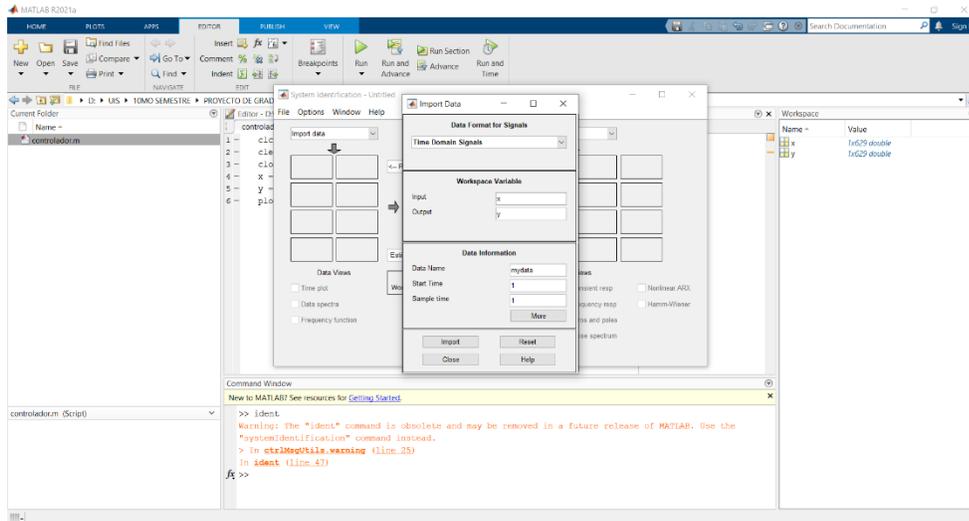
Tomado de: Matlab

En las Figuras 9 y 10 se muestra la creación de la función seno y la herramienta ident que será utilizada para el proceso. Una vez ejecutado el comando “ident”, se

DISEÑO DE UN MEDIDOR DE ESPEJO ENFRIADO

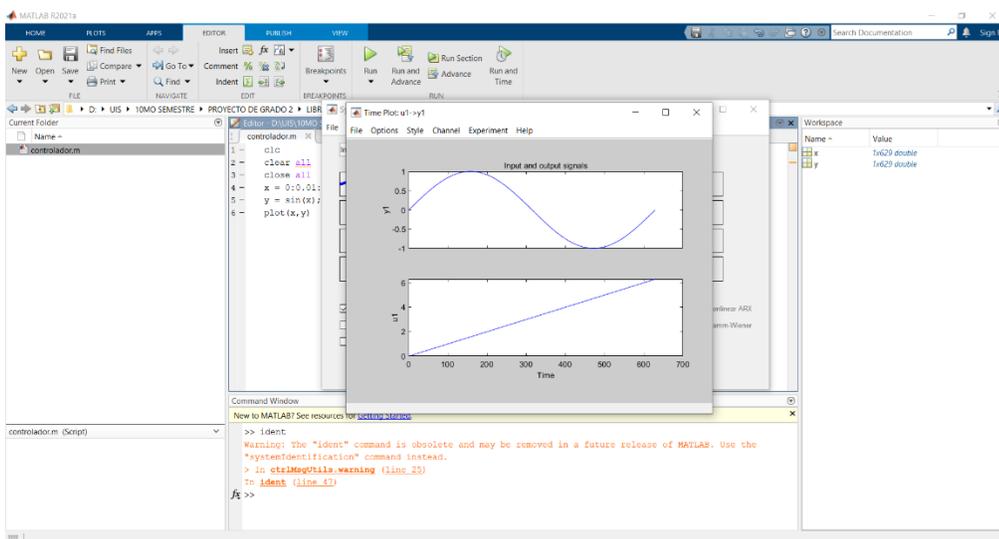
agregaron las variables habilitadas en el workspace para luego verificarlas, tal como se muestra en las ilustraciones 11 y 12 respectivamente.

Figura 11. Variables en “ident”



Tomado de: Matlab

Figura 12. Revisión de variables

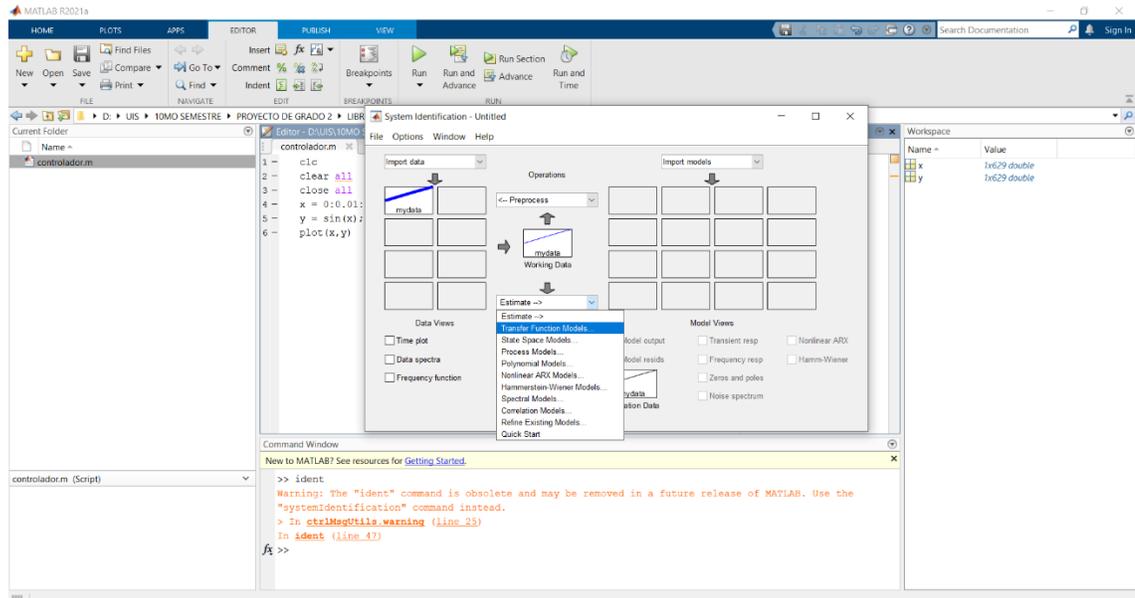


Tomado de: Matlab

DISEÑO DE UN MEDIDOR DE ESPEJO ENFRIADO

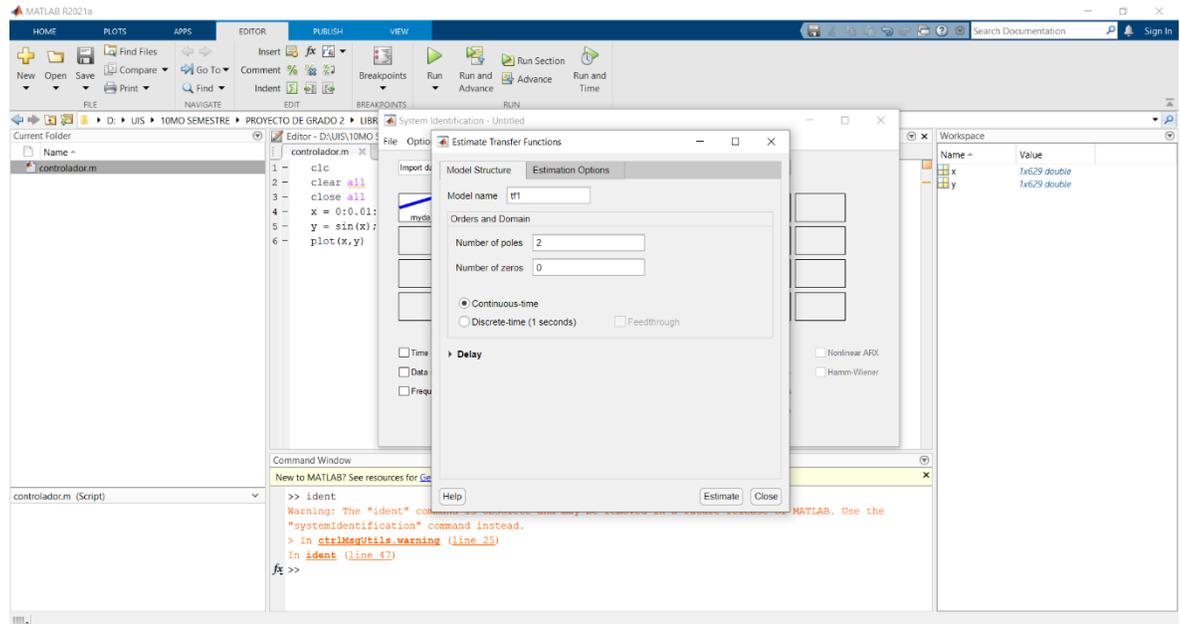
Posteriormente, se escogió la herramienta transfer function para obtener una función estimada, presentado a continuación.

Figura 13. Función de transferencia



Tomado de: Matlab

Figura 14. Número de polos en función de transferencia

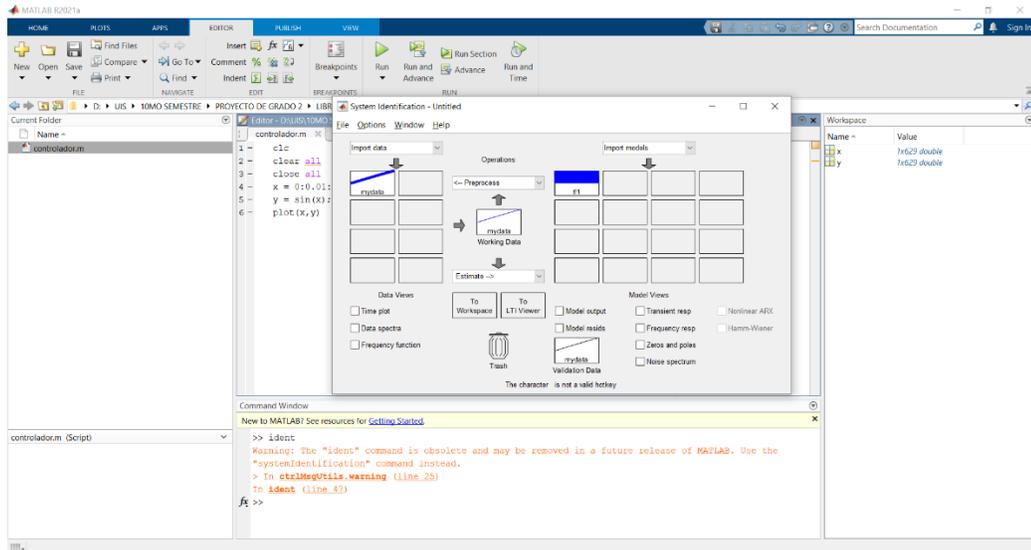


Tomado de: Matlab

Al generar la función de transferencia se comprobó si era similar a la función seno establecida en pasos anteriores mediante la opción model output, lo cual se muestra en la Figura 15 y 16.

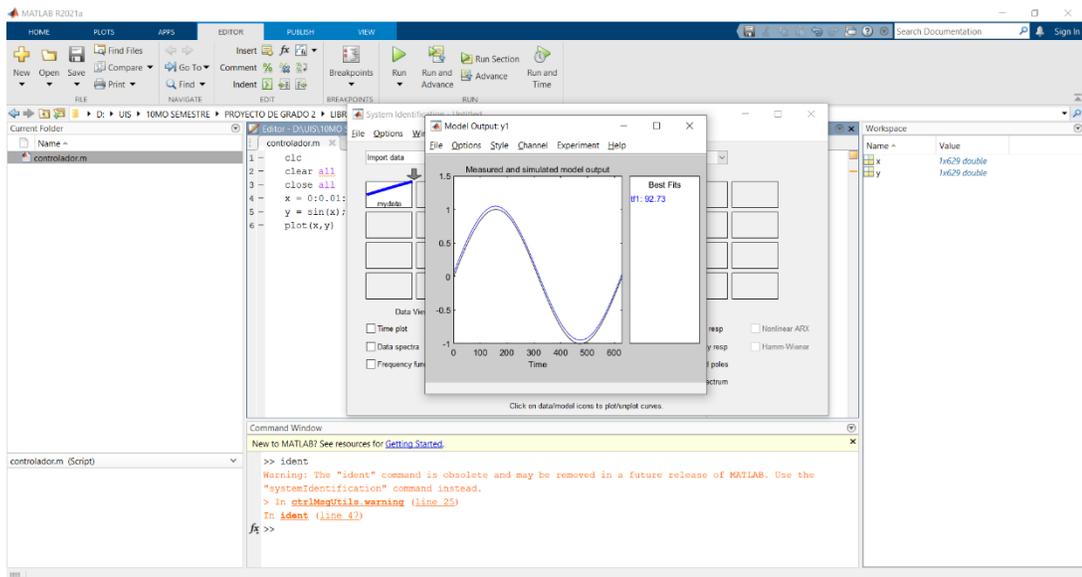
DISEÑO DE UN MEDIDOR DE ESPEJO ENFRIADO

Figura 15. Revisión de función



Tomado de: Matlab

Figura 16. Porcentaje de semejanza



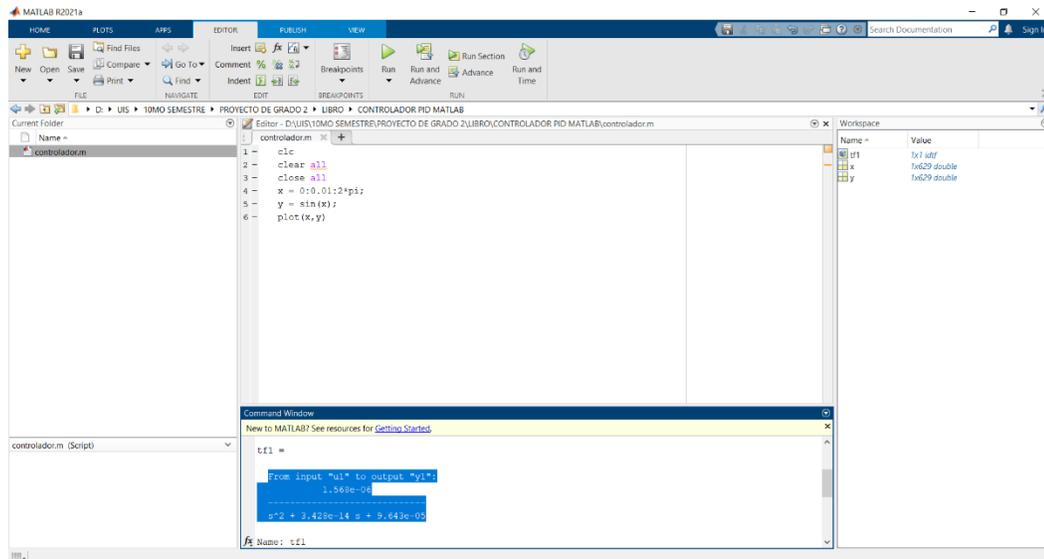
Tomado de: Matlab

Donde se encontró un valor de semejanza correspondiente al 92.73%. Una vez verificado el comportamiento senoidal.

DISEÑO DE UN MEDIDOR DE ESPEJO ENFRIADO

Finalmente, se abrió la función de transferencia para obtener los valores generados por la herramienta “ident” y posteriormente se trasladó al workspace para poder utilizarlo. Tal como se muestra a continuación.

Figura 17. Valores de la función de transferencia



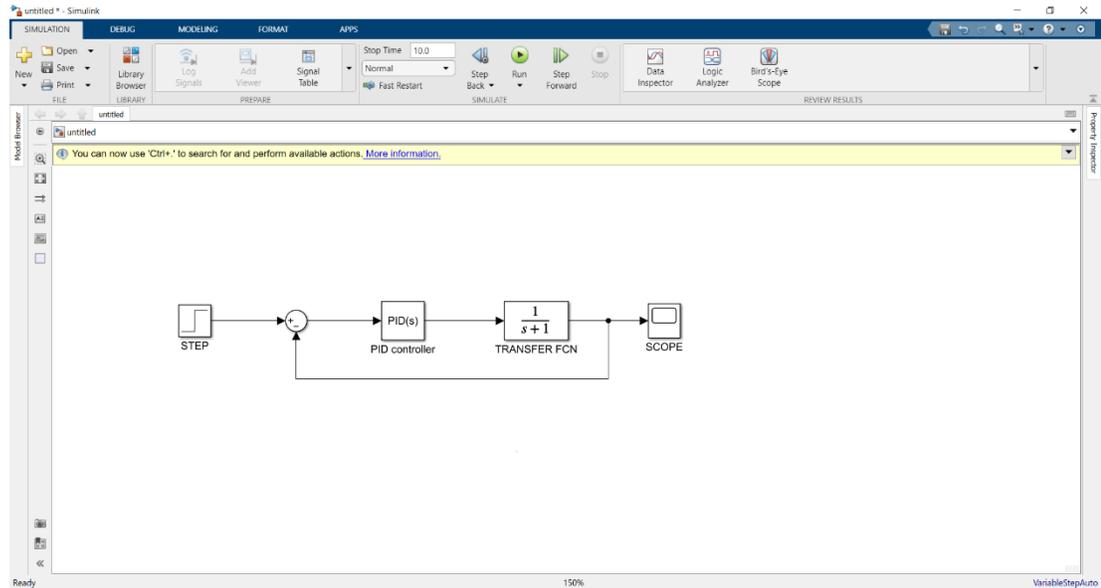
Tomado de: Matlab

Por tanto, la función de transferencia encargada de modelar el funcionamiento del medidor de espejo enfriado corresponde a:

$$G(s) = \frac{1.568e - 06}{s^2 + 3.428e - 14 s + 9.643e - 05}$$

Posteriormente, se utilizó simulink para poder establecer el sistema en lazo cerrado (Figura 18) que se encarga de regular la temperatura del medidor de espejo enfriado por medio de un controlador PID.

Figura 18. Sistema de lazo cerrado

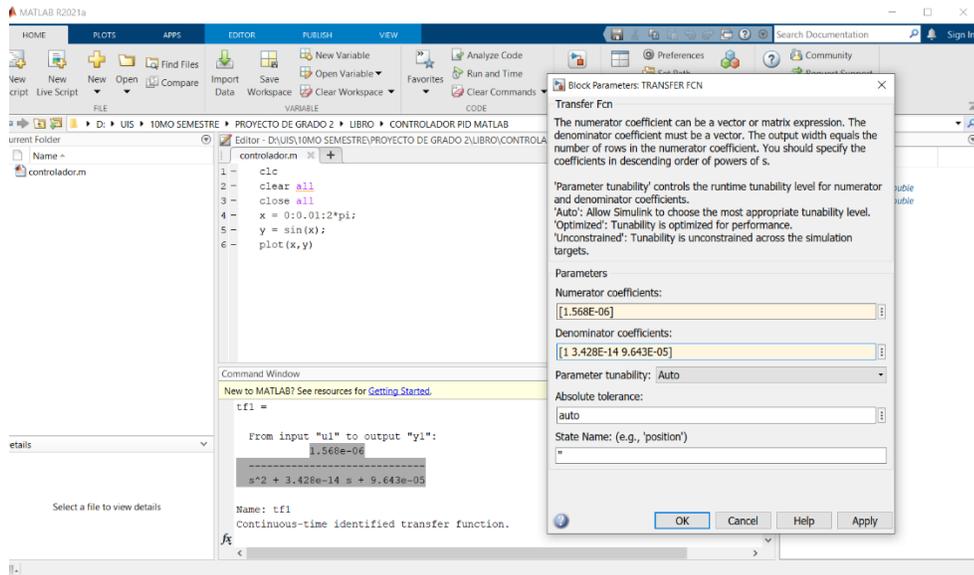


Tomado de: Simulink

Una vez representado el sistema de lazo cerrado, se procedió a modelar el sistema mediante los datos y variables del diseño.

Por parte de la función de transferencia se añadieron los respectivos valores encontrados mediante la función “ident”, tal como se muestra en la Figura 19.

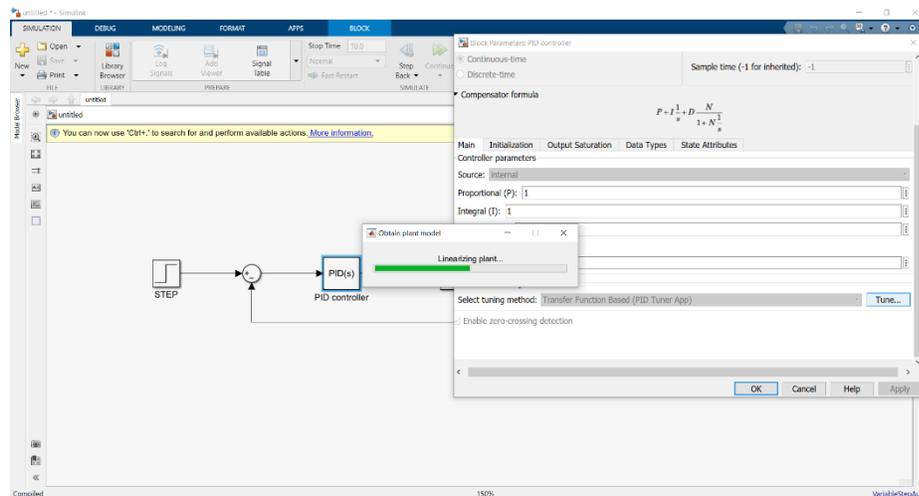
Figura 19. Transfer Function



Tomado de: Simulink

Posteriormente se encontraron las constantes P, I, D y N del controlador PID. Para ello, se utilizó la herramienta “tune” permitiendo estimar el comportamiento del fenómeno físico que se enfrentaría, presentado en la Figura 20.

Figura 20. PID controller

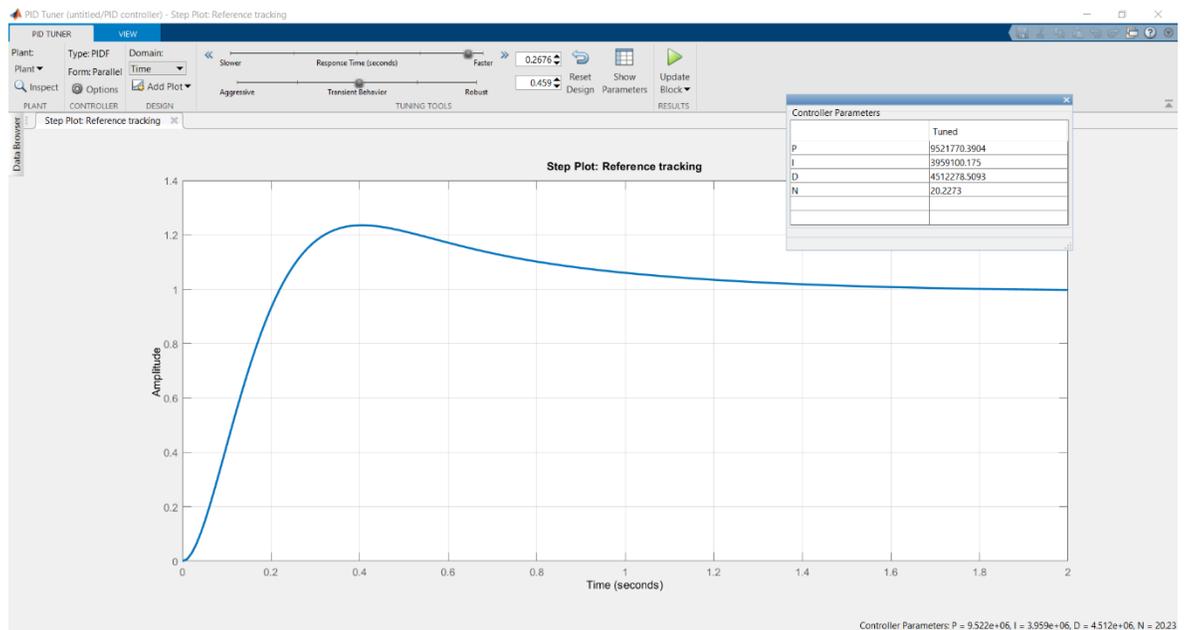


Tomado de: Simulink

DISEÑO DE UN MEDIDOR DE ESPEJO ENFRIADO

Dicha herramienta permitió, de manera manual, variar el tiempo de respuesta y la intensidad de los cambios (Figura 21), donde se infiere que el tiempo de respuesta debe ser corto al momento de controlar la variación de temperatura en el espejo enfriado.

Figura 21. Herramienta “tune”



Tomado de: Simulink

Por tanto, las constantes seleccionadas para el controlador PID fueron las siguientes:

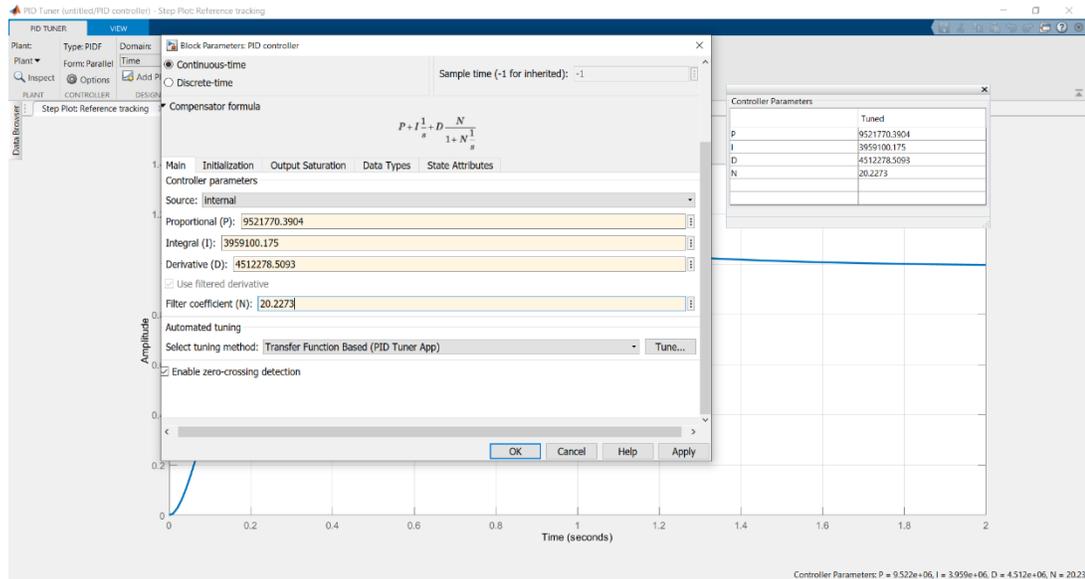
$$P = 9521770.3904$$

$$I = 3959100.175$$

$$D = 4512278.8093$$

$$N = 20.2273$$

Figura 22. Constantes del PID



Tomado de: Simulink

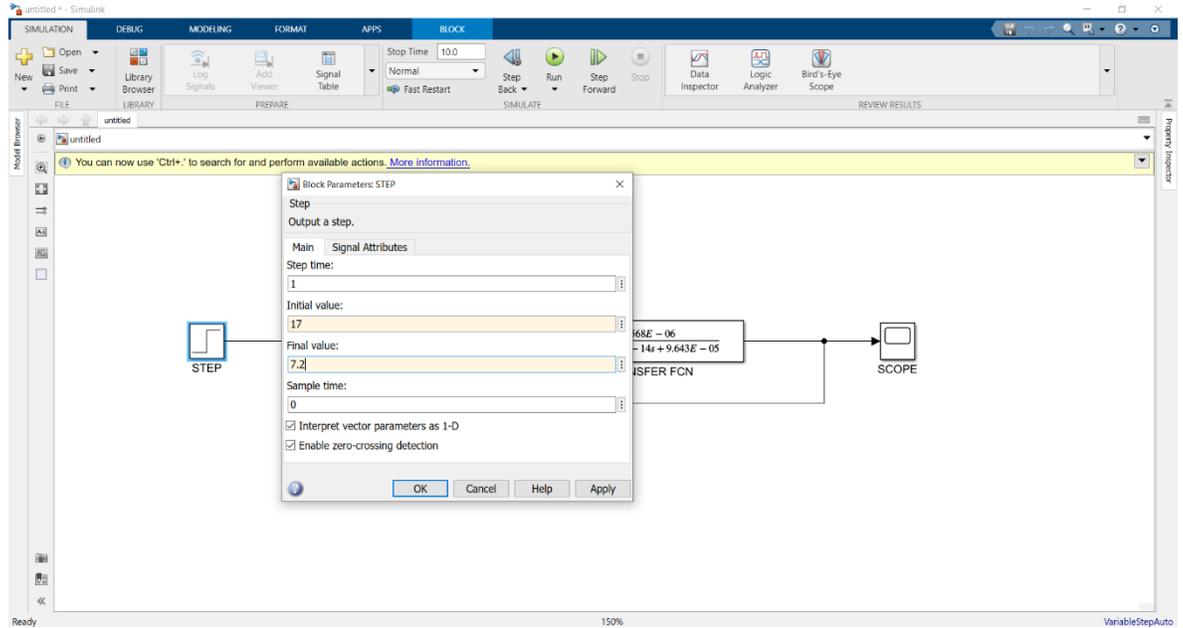
La Figura 22 permite observar la incorporación de las constantes PID al controlador.

En el siguiente paso se establecieron los valores que tomaría el step (Figura 23), donde se tuvo en cuenta el funcionamiento del medidor de espejo enfriado Hygrovision – BL para establecer el inicio de la temperatura del sistema, ya que estos equipos antes de realizar la fase de medición se someten a un escaneo que finaliza en una temperatura estable 10 °C por encima del punto de condensación.

Por lo cual, se decidió dar un valor inicial de 17 °C y el valor final estabilizado de 7.2 °C que corresponde a la temperatura mínima de punto de rocío indicada en el RUT.

DISEÑO DE UN MEDIDOR DE ESPEJO ENFRIADO

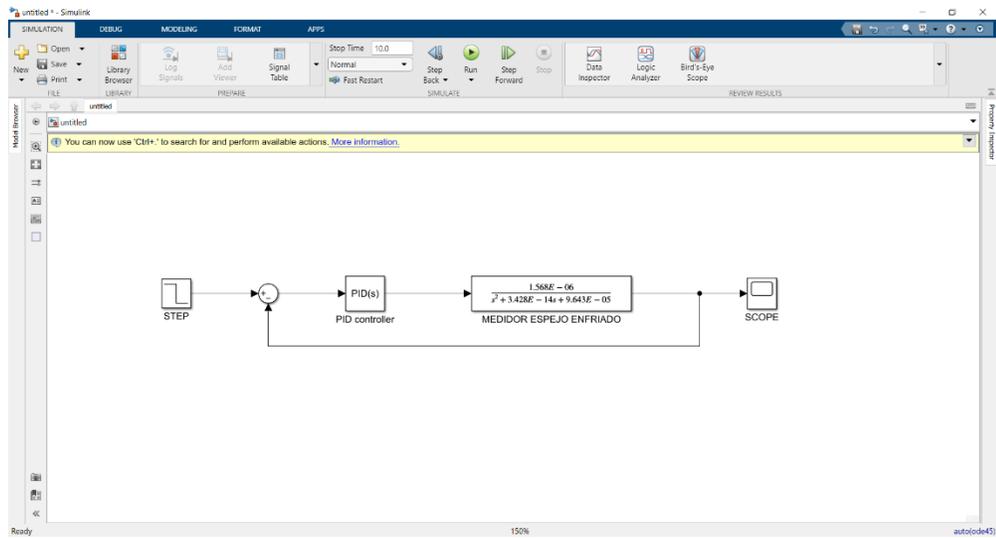
Figura 23. Valores del Step



Tomado de: Simulink

Al añadir todos los valores del diseño al sistema de lazo cerrado, se obtuvo la siguiente representación:

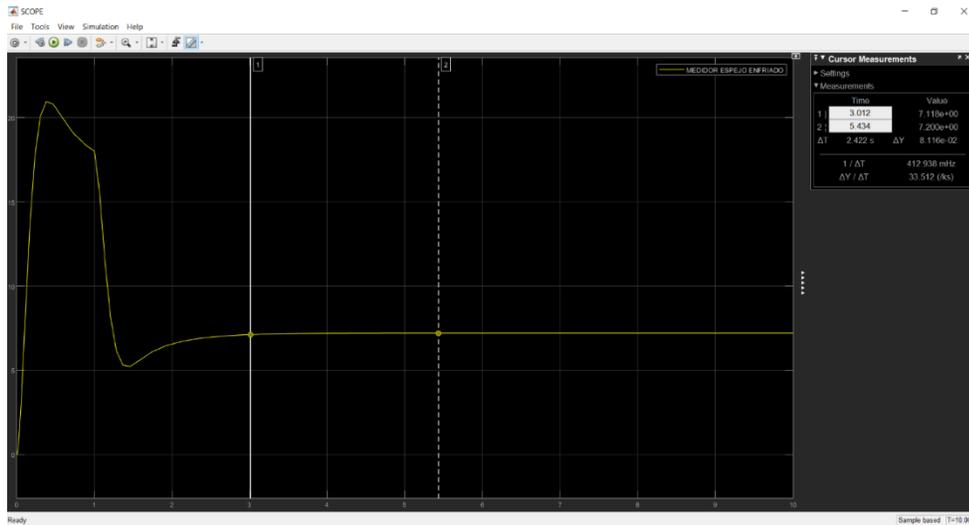
Figura 24. Sistema lazo cerrado final



Tomado de: Simulink

Finalmente se simuló el sistema para observar el funcionamiento del controlador y verificar la manera en que estabiliza la temperatura, obteniendo como resultado la Figura 25.

Figura 25. Simulación del controlador



Tomado de: Simulink

Como resultado se estabiliza en 3.012 [s] a la temperatura deseada.

Posterior al diseño del controlador de temperatura, se presentan las matrices de selección respectivas para el medidor de espejo enfriado.

Tabla 3. Matriz de selección para geometría del espejo

RANGO DE NOTAS	1-5
-----------------------	------------

		ALTERNATIVAS GEOMETRÍA DE ESPEJO			
		FORMA REDONDA		FORMA CÓNICA	
CRITERIOS	PORCENTAJE	NOTA	PONDERADO	NOTA	PONDERADO
COSTO ASEQUIBLE	35%	3	1,05	4	1,4
PRECISIÓN EN LA DETECCIÓN	40%	3	1,2	4,5	1,8
PRACTICIDAD DE IMPLEMENTACIÓN	25%	4	1	3	0,75
TOTAL	100%		3,25		3,95

Tomado de: Excel

Tabla 4. Matriz de selección para detección de la condensación

RANGO DE NOTAS	1-5
-----------------------	------------

		ALTERNATIVAS DETECCIÓN DE CONDENSACIÓN			
		INSPECCIÓN MANUAL		DETECCIÓN AUTOMÁTICA	
CRITERIOS	PORCENTAJE	NOTA	PONDERADO	NOTA	PONDERADO
COSTO ASEQUIBLE	25%	4	1	3	0,75
PRECISIÓN EN LA DETECCIÓN	40%	3	1,2	4,5	1,8
PRACTICIDAD DE IMPLEMENTACIÓN	20%	3	0,6	4	0,8
TIEMPO DE IMPLEMENTACIÓN	15%	3,5	0,525	3,5	0,525
TOTAL	100%		3,325		3,875

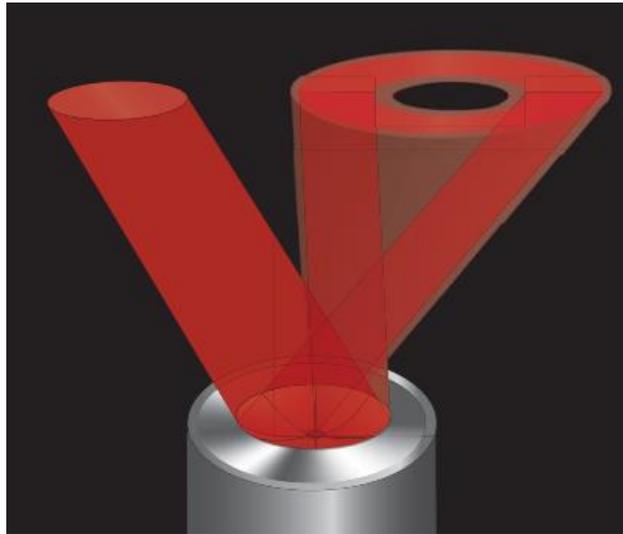
Tomado de: Excel

Con base en las matrices presentadas, con un puntaje ponderado de 3.95 y 3.875, se seleccionó una geometría de espejo cónica y una detección automática respectivamente. Lo cual permite identificar la condensación en el gas para así inferir su punto de rocío.

Para ello, se implementó la geometría de espejo y el tipo de sensor óptico del equipo CONDUMAX II de la línea MICHELL INSTRUMENTS, el cual tiene una técnica de medición automática conocida como “DARK SPOT” (Figura 26).

La geometría de espejo seleccionada posee una depresión central de forma cónica, donde su superficie semi-mate es de acero inoxidable tratada con ácido. Este espejo hace parte del efecto de punto oscuro presentado en el equipo CONDUMAX II, donde un haz de luz roja golpea la parte central, donde a condiciones secas refleja este haz formando un anillo anular, para que la detección óptica se enfoque en la luz dispersada en el centro del anillo.

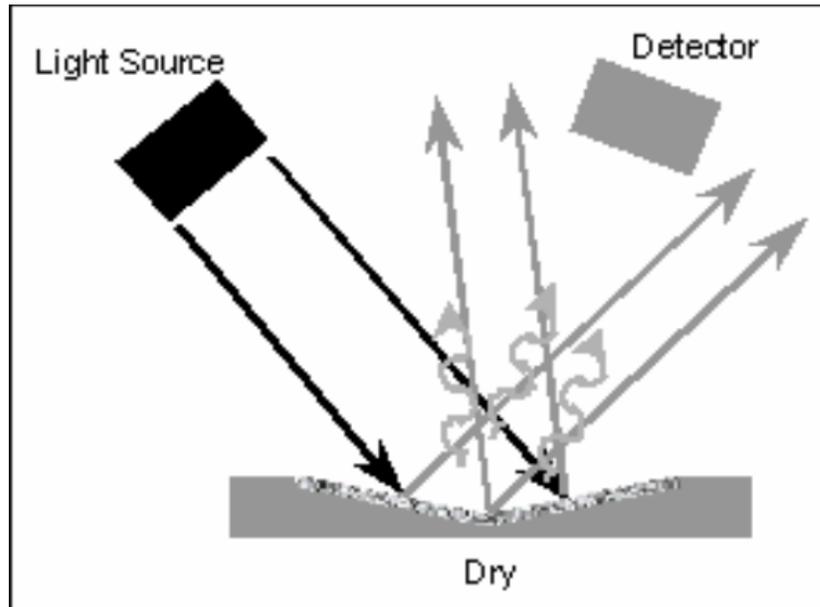
Figura 26. Principio de punto oscuro



Tomado de: CONDUMAX II , MICHELL INSTRUMENTS (pg 2.)

A diferencia del funcionamiento del CONDUMAX II, nuestro diseño no permite configurar la sensibilidad de medición para detectar el cambio de señal al aparecer condensación. Sin embargo, a continuación, se muestra la geometría del espejo seleccionado junto al detector que indicará cuando aparezca la condensación.

Figura 27. Espejo en forma cónica en condiciones secas

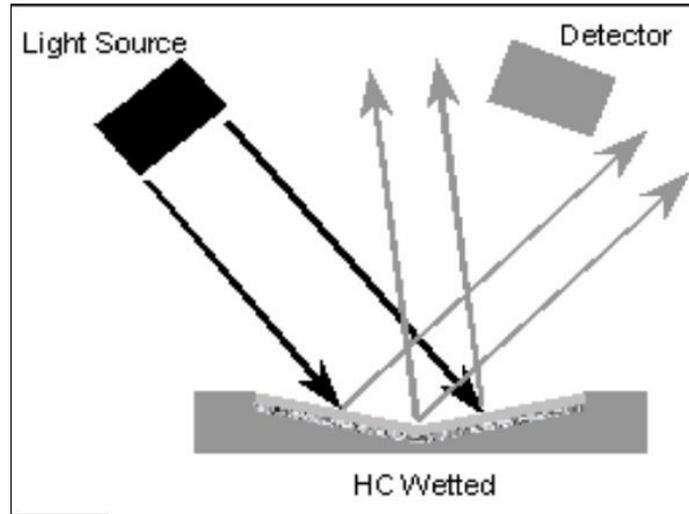


Tomado de: DETERMINATION OF HYDROCARBON DEW POINT IN NATURAL GAS.

ANDY BENTON (pg.6)

A medida que aparece el condensado por parte de los hidrocarburos, se modifican las propiedades ópticas, permitiendo que la intensidad de luz reflejada del anillo anular aumente, mientras se presenta una reducción fuerte en la luz dispersada en la región de punto oscuro (Figura 28).

Figura 28. Espejo en forma cónica en condiciones de condensado.



Tomado de: DETERMINATION OF HYDROCARBON DEW POINT IN NATURAL GAS.

ANDY BENTON (pg.6)

3.3 Dimensión del medidor de espejo enfriado

Inicialmente, para el controlador PID se seleccionó el PM PLUS TM de la marca WATLOW (Figura 29). De acuerdo a WATLOW ofrece conectividad bluetooth con la aplicación móvil EZ-LINK para poder acceder de manera remota (Watlow, 2022).

Figura 29. Controlador PID WATLOW



Tomado de: Watlow powered by possibility temperature and process controllers
 Posteriormente, para la selección de la tubería conocida como Tubing, se utilizó el catálogo de la empresa LamarUSA INSTRUMENTATION & CONTROL, con oficina en Bogotá, Colombia, presentado en la tabla 5.

Tabla 5. Selección Tubing

TABLA DE PRESIÓN DE TRABAJO MÁXIMA PERMITIDA

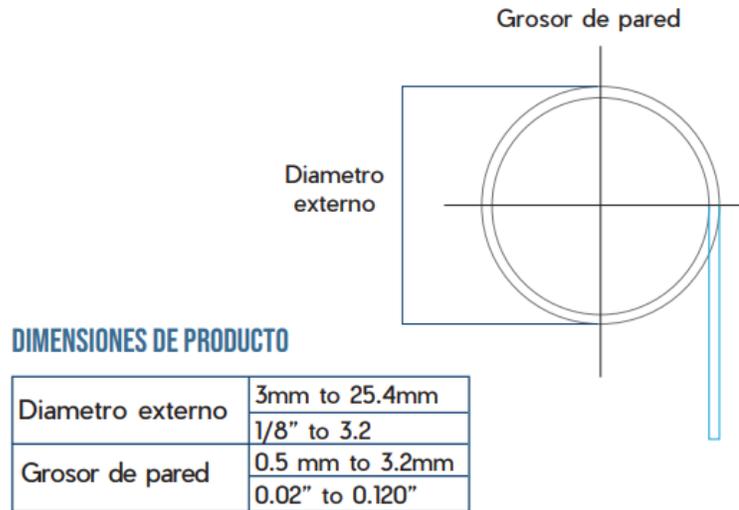
Size (Inch)	316 or 304 ACERO INOXIDABLE (SIN COSTURA)															
	GROSOR DE PARED															
	.010	.012	.014	.016	.020	.028	.035	.049	.065	.083	.095	.109	.120	.134	.158	.188
1/16"	5800	6900	8200	9500	12100	16800										
1/8"						8600	10900									
3/16"						5500	7000	10300								
1/4"						4000	5100	7500	10300							
5/16"							4100	5900	8100							
3/8"							3300	4800	8600							
1/2"							2600	3700	5100	6700						
5/8"								3000	4000	5200	6100					
3/4"								2400	3300	4300	5000	5800				
7/8"								2100	2800	3600	4200	4900				
1"									2400	3200	3700	4200	4700			
1-1/4"										3500	2900	3300	3700	4100	4900	
1-1/2"											2400	2700	3000	3400	4000	4500
2"												2000	2200	2500	2900	3200

Tomado de: Comfit acero inoxidable tubería (pg. 3)

Teniendo en cuenta los parámetros de operación, la presión máxima planteada es de 30 MPA correspondiente a 4300 PSI.

Por lo tanto, se seleccionó una tubería con diámetro de $\frac{3}{4}$ " y grosor de la pared 0.083" con material de acero inoxidable 316 (sin costura), cuya longitud estándar es de 6.1 m (Figura 30).

Figura 30. Dimensiones Tubing



Tomado de: Comfit acero inoxidable tubería (pg. 3)

Seguido, teniendo en cuenta la matriz de selección, se optó por una detección de condensación automática, lo cual implica seleccionar un sensor fotoeléctrico encargado de identificar el condensado en el gas natural. Para ello, se contó con un sensor fotoeléctrico de barrera cuya función es medir el cambio en la cantidad de luz emitida.

El equipo elegido fue un sensor fotoeléctrico de barrera, unidireccional GD18/GV18/73/120 de la marca alemana Pepperl+Fuchs, presentado a continuación.

Figura 31. Sensor fotoeléctrico de barrera

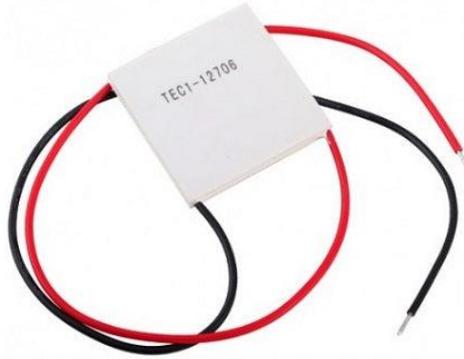


Tomado de: Pepperl+Fuchs sensores fotoeléctricos en barrera

Se encuentran en carcasas separadas y cuenta con un haz de luz alterna, roja, 640 nm (Pepperl+Fuchs, 2022).

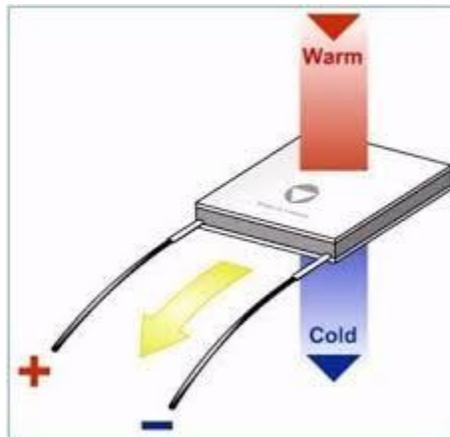
Finalmente, la celda seleccionada para enfriar el espejo de acuerdo al controlador diseñado fue la celda Peltier TEC1-12706 (Figura 32).

Figura 32. Celda Peltier



Tomado de: Ferretrónica

Figura 33. Funcionamiento celda Peltier



Tomado de: Ferretrónica

Sin embargo, la celda peltier debe tener un disipador que permita un funcionamiento óptimo en su enfriamiento, ya que sin él la energía en forma de calor que se disipa puede interferir en la cara que está enfriándose y por tanto evitar una correcta

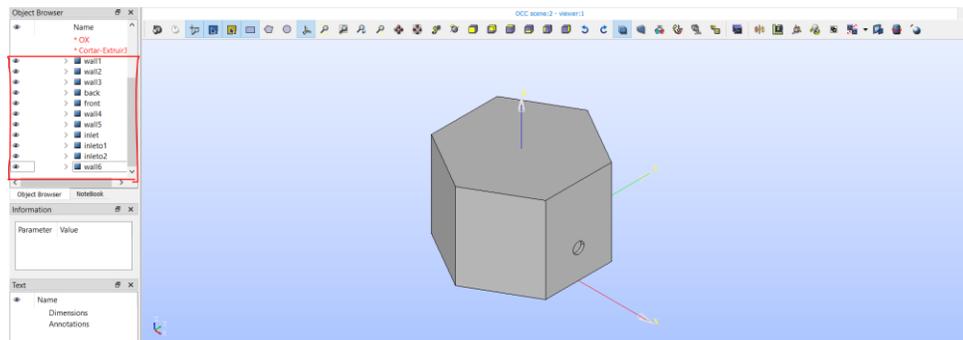
refrigeración (Figura 33). Para este caso, se eligió un disipador de aluminio apto para la capacidad de enfriamiento solicitada en el medidor de espejo enfriado. Los planos respectivos del medidor de espejo enfriado se presentan en los anexos.

3.4 Simulación del proceso de medición

Inicialmente se define el dominio computacional de la siguiente manera. Se importa la geometría, en formato STEP, de la carcasa a Salomé, con el fin de crear el dominio que desarrollaremos en OpenFoam.

Posteriormente, se ejecuta la opción ‘explode’ que permite crear los límites en caras de la geometría y nombrarlos de acuerdo al criterio del usuario (Figura 34).

Figura 34. Explode

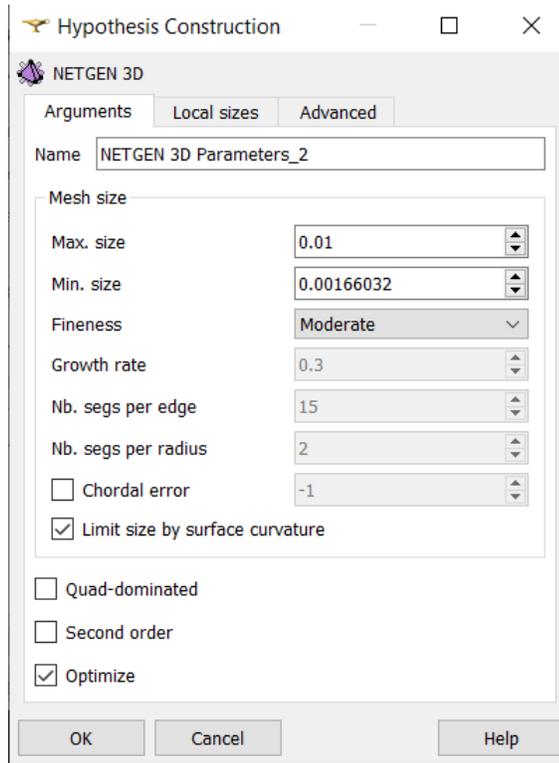


Tomado de: Salomé

Seguido, se creó la malla a partir de la geometría planteada. Donde la hipótesis define el tamaño de la malla, la cual representa de manera discretizada el sistema a estudiar, es decir, se define como el grado de aproximación de nuestro modelo a la realidad de tal forma que entre más densa o más pequeña sea nuestra malla, menor error presentará, pero mayor exigencia computacional se presentará para ejecutar el análisis. Por esa razón, se define un número mínimo y máximo de mallado (Figura

35). Allí escribimos los números seleccionados de acuerdo a un análisis de convergencia presentado en la tabla 6.

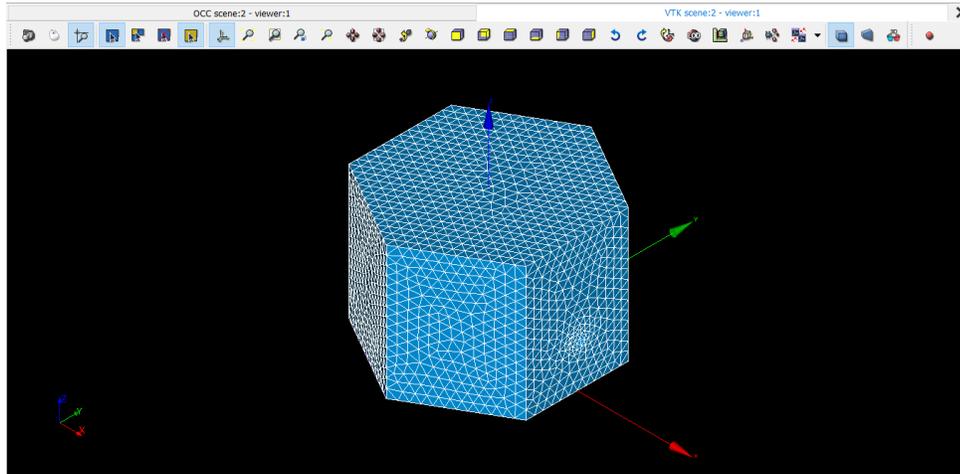
Figura 35. Tamaño de malla



Tomado de: Salomé

Una vez indicado el tamaño de la malla, se procedió a ejecutar el comando compute para generar finalmente nuestra malla o dominio computacional, la cual se presenta en la Figura 36.

Figura 36. Representación de la malla



Tomado de: Salomé

Con la malla generada se procedió a exportar el archivo en formato unv para poder añadirlo en la carpeta de trabajo de OpenFoam y trabajar en ella.

Seguido, desde el terminal de OpenFoam, en Ubuntu, se ejecutó el comando 'ideasUnvToFoam carcasa.unv' para transformar el archivo en un formato compatible con OpenFoam y a su vez crear la malla en el terminal (Figura 37).

Figura 37. Malla en OpenFoam

```

root@DESKTOP-5877QV9: /mnt/c/Users/Usuario/ejopen/final/coalChemistryFoam/simplifiedSiwek
For group 6 named wall4 trying to read 392 patch face indices.
For group 7 named wall5 trying to read 392 patch face indices.
For group 8 named inlet trying to read 24 patch face indices.
For group 9 named inleto1 trying to read 12 patch face indices.
For group 10 named inleto2 trying to read 12 patch face indices.
For group 11 named wall6 trying to read 434 patch face indices.

Sorting boundary faces according to group (patch)
0: wall1 is patch
1: wall2 is patch
2: wall3 is patch
3: back is patch
4: front is patch
5: wall4 is patch
6: wall5 is patch
7: inlet is patch
8: inleto1 is patch
9: inleto2 is patch
10: wall6 is patch

Constructing mesh with non-default patches of size:
wall1      392
wall2      392
wall3      392
back       864
front      842
wall4      392
wall5      392
inlet      24
inleto1    12
inleto2    12
wall6     434

End
root@DESKTOP-5877QV9: /mnt/c/Users/Usuario/ejopen/final/coalChemistryFoam/simplifiedSiwek#

```

Tomado de: OpenFoam

Posteriormente, en la carpeta ‘constant/Polymesh/boundary’ se realizaron los cambios del tipo de límite en las paredes y las entradas de la geometría:

- Paredes – Type :Wall
- Entradas – Type: Patch

Una vez lista la geometría con su respectivo mallado, se realizaron los cambios en las variables de la carpeta ‘0’ para asignar los nuevos límites establecidos por nuestro dominio computacional, junto a los valores reales de temperatura, velocidad, presión y contenido de los hidrocarburos en la muestra.

Seguido, en la carpeta ‘constant/FvOptions’ se asigna el tiempo en que la Fuente de energía [celda Peltier] estará activa durante la simulación, el cual será de 5 segundos, y su valor de temperatura (Figura 38).

Figura 38. Tiempo Fuente de energía

```

fvOptions: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
  \ \ M anipulation |
\*-----*/
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  location     "constant";
  object       fvOptions;
}
// ***** //

source1
{
  type         fixedTemperatureConstraint;

  timeStart    0.1;
  duration     5;
  selectionMode cellSet;
  cellSet      ignitionCells;

  mode         uniform;
  temperature  280.17;
}

// ***** //

```

Tomado de: Bloc de notas

Por otro lado, en la carpeta ‘system/topoSetDict’ se asignó la geometría de la Fuente de energía (Figura 39).

Figura 39. Configuración Fuente de energía

```

topoSetDict: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  object       topoSetDict;
}

// ***** //

actions
(
  {
    name ignitionCells;
    type cellSet;
    action new;

    source boxToCell;
    sourceInfo
    {
      box      (0.000 0.040 0.040) (0.040 0.080 0.044);
    }
  }
);

// ***** //

```

Tomado de: Bloc de notas

Una vez lista la configuración de la Fuente de energía, se ejecutó el comando ‘topoSet’ en el terminal de OpenFoam para su respectiva activación (Figura 40).

Figura 40. topoSet

```

root@DESKTOP-5877QV9: /mnt/c/Users/Usuario/ejopen/final/coalChemistryFoam/simplifiedSiwek# topoSet
=====
\  /  F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
 /  \  O p e r a t i o n | Website: https://openfoam.org
  \  /  A n d          | Version: 7
   \  /  M a n i p u l a t i o n
=====
/*-----*/
Build : 7-3bcbaf946ae9
Exec   : topoSet
Date   : Sep 20 2022
Time   : 12:24:42
Host   : "DESKTOP-5877QV9"
PID    : 834
I/O    : uncollated
Case   : /mnt/c/Users/Usuario/ejopen/final/coalChemistryFoam/simplifiedSiwek
nProcs : 1
sigFpe : Enabling floating point exception trapping (FOAM_SIGFPE).
fileModificationChecking : Monitoring run-time modified files using timeStampMaster (fileModificationSkew 10)
allowSystemOperations : Allowing user-supplied system call operations

// ***** //
Create time

Create polyMesh for time = 0

Reading topoSetDict

Time = 0
  mesh not changed.
Created cellSet ignitionCells
  Applying source boxToCell
  Adding cells with center within boxes 1((0 0.04 0.04) (0.04 0.08 0.044))
  cellSet ignitionCells now size 11
End

root@DESKTOP-5877QV9: /mnt/c/Users/Usuario/ejopen/final/coalChemistryFoam/simplifiedSiwek#

```

Tomado de: OpenFoam

Seguido, en la carpeta ‘system/controlDict’ se estableció el tiempo de simulación [5 s] y los intervalos de tiempo que se analizaron (Figura 41).

Figura 41. Configuración de la simulación

```
// ***** //  
application    coalChemistryFoam;  
startFrom      latestTime;  
startTime      0;  
stopAt         endTime;  
endTime        5;  
deltaT         0.0001;  
writeControl   adjustableRuntime;  
writeInterval  0.025;  
purgeWrite     0;  
writeFormat    ascii;  
writePrecision 10;  
writeCompression off;  
timeFormat     general;  
timePrecision  6;  
runtimeModifiable true;  
adjustTimeStep yes;  
maxCo          1.0;  
maxDeltaT      1;  
  
// ***** //
```

Tomado de: Bloc de notas

Una vez completado la configuración del sistema, se realizó la ejecución del solver ‘coalChemistryFoam’(Figura 42).

Figura 42. coalChemistryFoam

```
ExecutionTime = 5014 s  ClockTime = 5210 s  
End  
root@DESKTOP-5877QV9:/mnt/c/Users/Usuario/ejopen/final/coalChemistryFoam/simplifiedSiwek#
```

Tomado de: OpenFoam

Para interpretar y analizar el resultado obtenido de la simulación, creamos un archivo de 'controlDict.foam' para abrirlo desde ParaView y lograr observar el comportamiento de la temperatura en el equipo planteado.

Teniendo en cuenta el procedimiento mencionado anteriormente, se presenta en la tabla 6 el análisis de convergencia para determinar el tamaño de la malla adecuado para la simulación, donde se estableció el tiempo en que se compararon los resultados y las coordenadas del punto que se analizó.

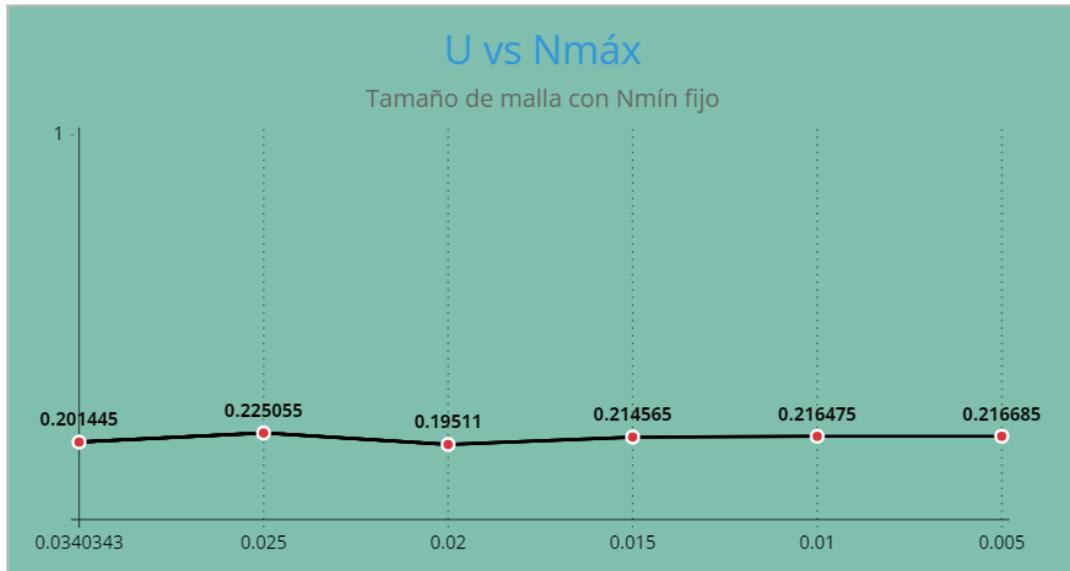
Tabla 6. Análisis de convergencia

		ANÁLISIS DE CONVERGENCIA				
		COORDENADAS DE MEDICIÓN [PARAVIEW]				
		t [s]	CENTRO		RADIO	
		1,2	0,065811311	0,001936403	0,051058546	8,66025E-05
		N°malla		VALORES		
		mín	máx	T [K]	U [m/s]	
TIEMPO [s]	302	0,00166032	0,0340343	306,615	0,201445	
TIEMPO [s]	652	0,00166032	0,025	309,186	0,225055	
TIEMPO [s]	961	0,00166032	0,02	308,26	0,19511	
TIEMPO [s]	2203	0,00166032	0,015	308,034	0,214565	
TIEMPO [s]	4331	0,00166032	0,01	308,763	0,216475	
TIEMPO [s]	15330	0,00166032	0,005	308,782	0,216685	

Tomado de: Excel

A continuación, se presenta el gráfico de U vs N°malla máxima para observar cuando deja de variar su resultado.

Figura 43. U vs N°malla máx



Tomado de: Livegap Charts

Teniendo en cuenta el análisis de convergencia, se busca tener una aproximación real acorde a la capacidad computacional disponible, donde se decidió utilizar el siguiente tamaño de malla:

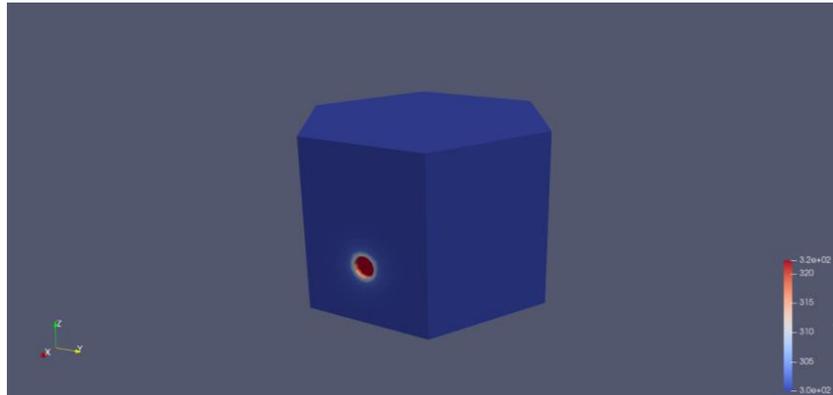
- N° malla mínimo: 0.00166032
- N° malla máximo: 0.01

Posteriormente se realizó la simulación final con los parámetros establecidos.

3.4.1 Análisis de resultado para la temperatura y velocidad

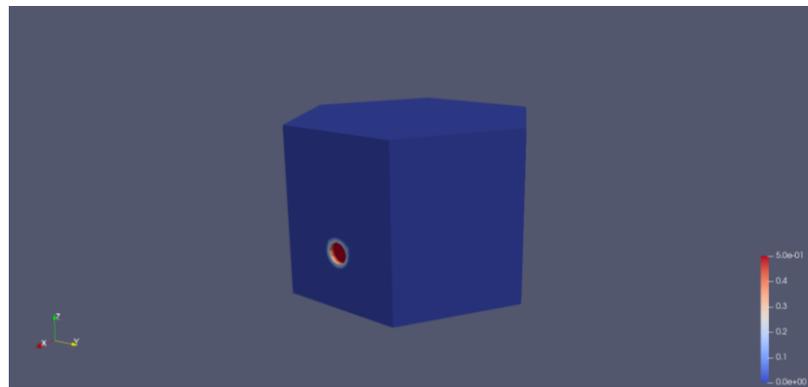
Inicialmente se muestra la geometría ejecutada con el solver (Figura 44 y 45).

Figura 44. Temperatura general



Tomado de: ParaView

Figura 45. Velocidad general



Tomado de: ParaView

Se presentarán un conjunto de imágenes correspondientes a la temperatura [T], velocidad [U] y valores exactos, en los siguientes tiempos de simulación:

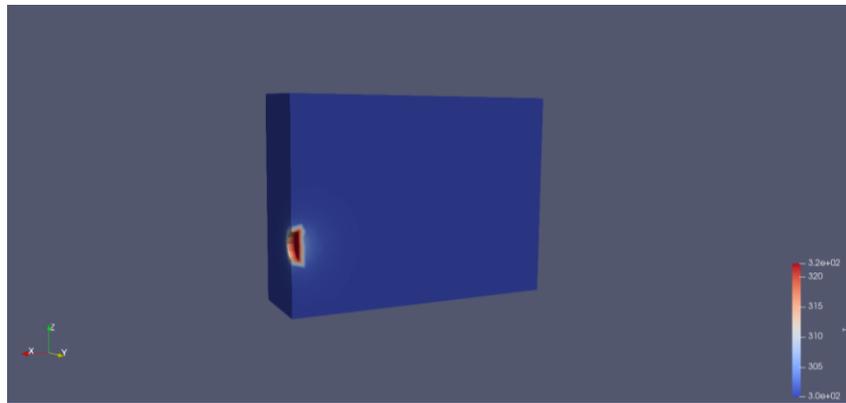
- 0.025 [s]
- 1.2 [s]
- 2 [s]
- 4 [s]

- 5 [s]

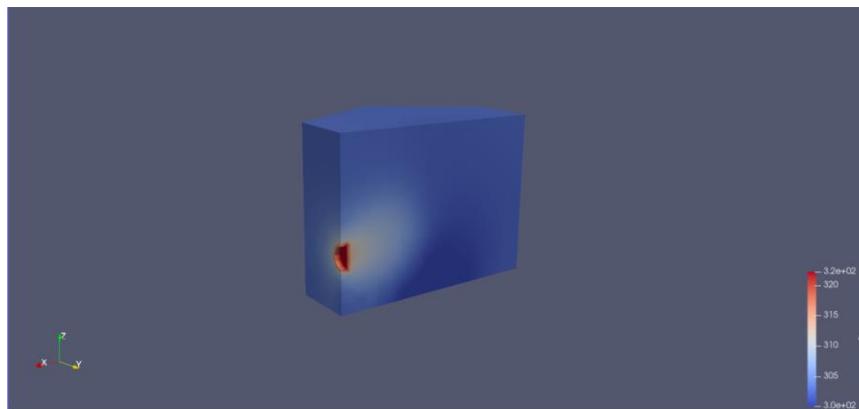
Para cada tiempo serán vistas seccionadas.

3.4.1.1 Temperatura

Figura 46. Resultados de temperatura

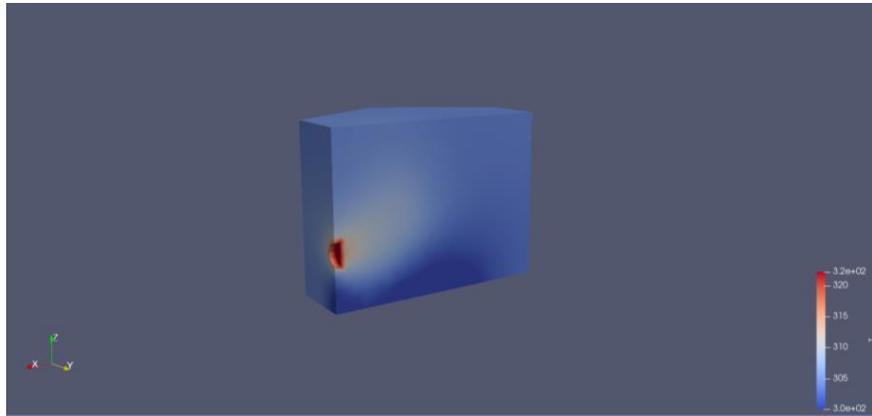


[a]

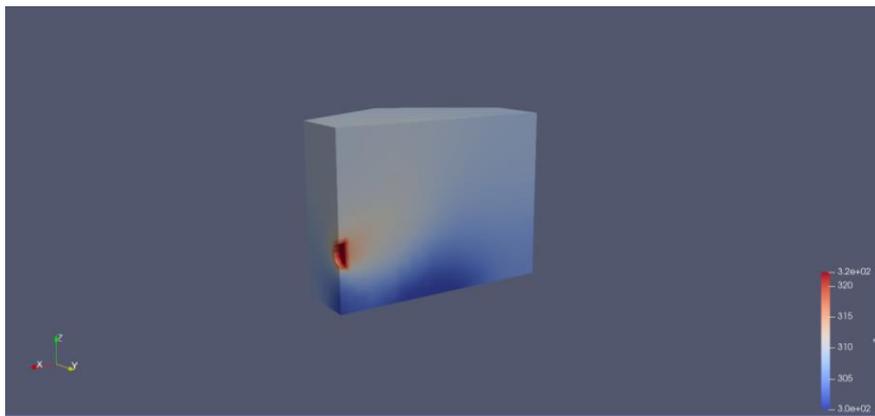


[b]

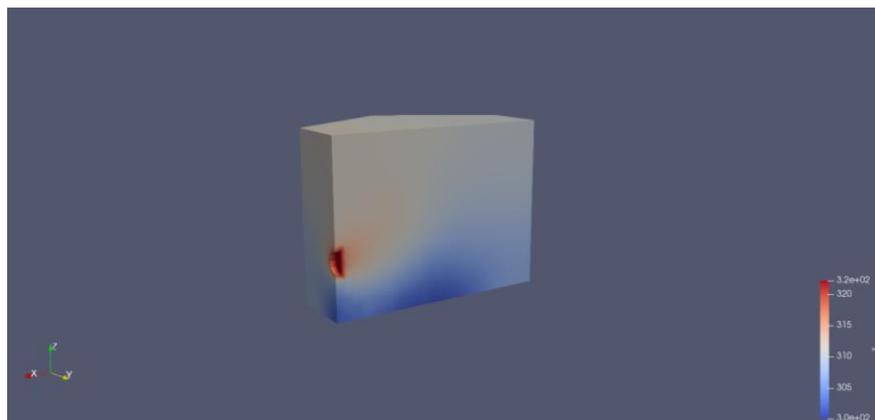
DISEÑO DE UN MEDIDOR DE ESPEJO ENFRIADO



[c]



[d]



[e]

Tomado de: ParaView

En la Figura 46. a, correspondiente al tiempo 0.025 [s], se logra observar el ingreso del gas natural a la temperatura máxima de 49°C [322.15 K] y la temperatura del resto de la geometría a un valor constante.

En la Figura 46. b, correspondiente al tiempo 1.2 [s], se identifica el cambio que tiene la temperatura del gas natural inmediatamente entra al medidor, disminuyendo su temperatura considerablemente a medida que avanza a través de la geometría.

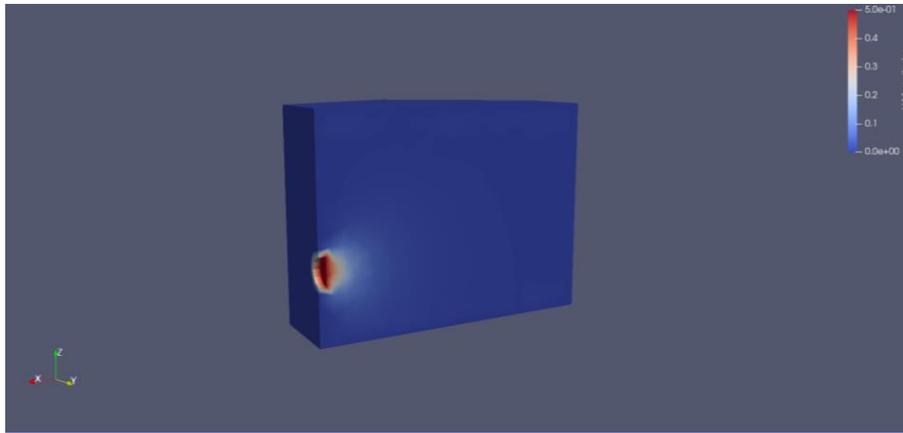
En la Figura 46. c, correspondiente al tiempo 2 [s], se observa como la temperatura sigue disminuyendo a medida que entra el gas natural a razón constante con su temperatura máxima de 49°C [322.15 K]. Sin embargo, se identifica que el gas natural enfriado está comenzando a tener un aumento en su temperatura, debido al ingreso constante de gas natural.

En la Figura 46. d, correspondiente al tiempo 4[s], la temperatura ha tenido un aumento considerable en toda su geometría del medidor de espejo. Sin embargo, se logra observar que el gas natural que ingresa por el orificio sigue sometándose a un enfriamiento significativo.

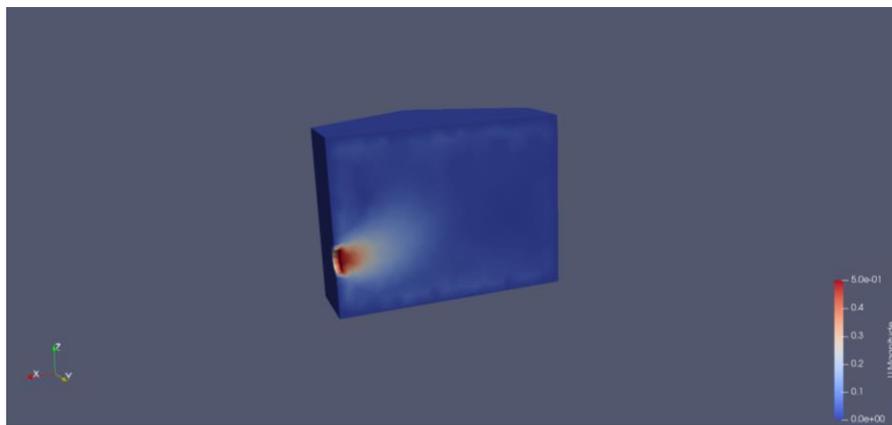
En la Figura 46. e, correspondiente al tiempo 5[s], se observa finalmente como la geometría en general se ha sometido a un aumento de temperatura en sus paredes a comparación del primer instante de tiempo. Pero, aun así, la Fuente de energía sigue cumpliendo su función de enfriamiento para el gas natural que ingresa a temperatura máxima.

3.4.1.2 Velocidad

Figura 47. Resultados de velocidad

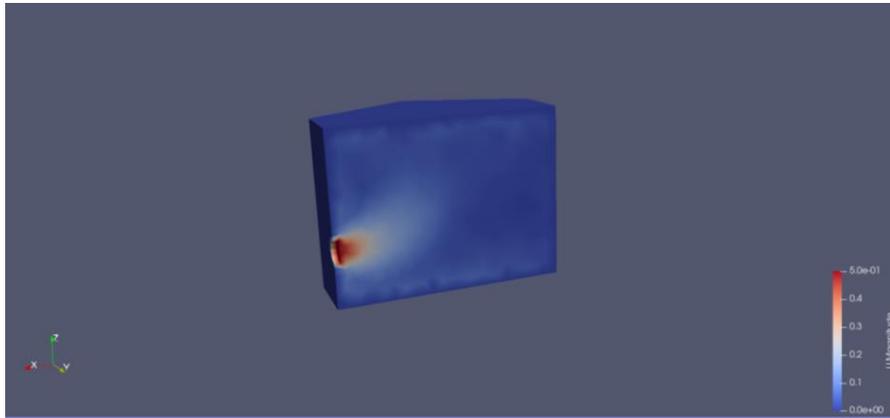


[a]

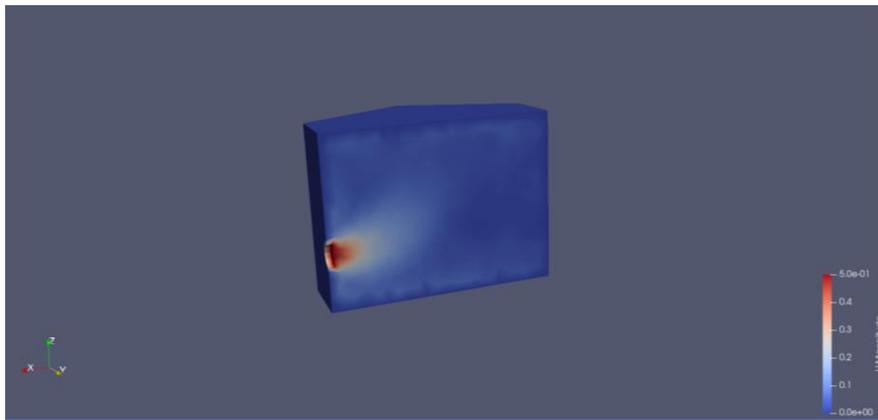


[b]

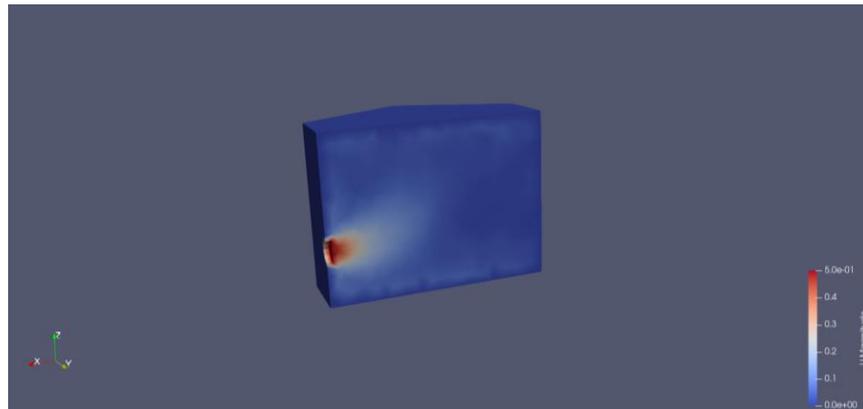
DISEÑO DE UN MEDIDOR DE ESPEJO ENFRIADO



[c]



[d]



[e]

Tomado de: ParaView

En la Figura 47. a, correspondiente al tiempo 0.025 [s], la magnitud de la velocidad se presenta estable, aún no ha iniciado el ingreso del gas natural en la geometría.

En la Figura 47. b, correspondiente al tiempo 1.2 [s], permite observar que ya inició el movimiento del gas natural en la geometría y avanza dirigiéndose hacia arriba debido al cambio de la densidad provocado por la temperatura.

En la Figura 47. c, correspondiente al tiempo 2 [s], se observa un leve aumento de velocidad del gas natural al ingresar en la geometría del espejo enfriado.

En la Figura 47. d, correspondiente al tiempo 4 [s], no se identifica una variación considerable con respecto al tiempo anterior. Sigue ingresando gas natural y su velocidad aumenta en pequeña medida.

En la Figura 47. e, correspondiente al tiempo 5 [s], la velocidad no presenta cambios significativos para esta toma de datos.

3.4.1.3 Valores de Temperatura [T] y Velocidad [U]

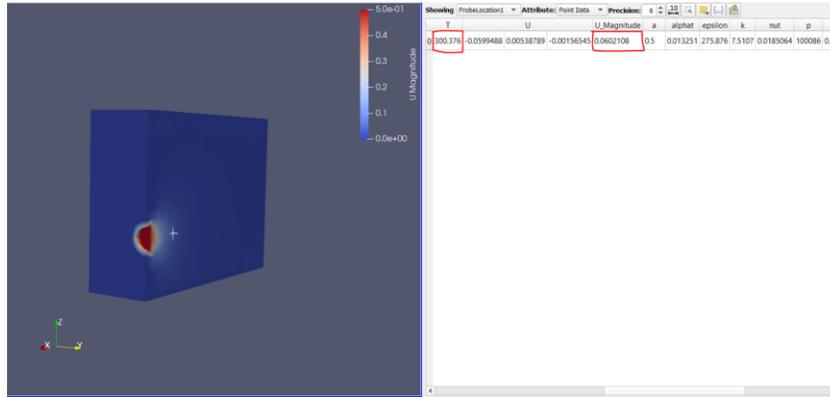
Para el los valores obtenidos en la temperatura [T] y velocidad [U] se eligió un punto, con el fin de evaluar el comportamiento del sistema, dado por las siguientes coordenadas:

Tabla 7. Coordenadas para análisis de convergencia

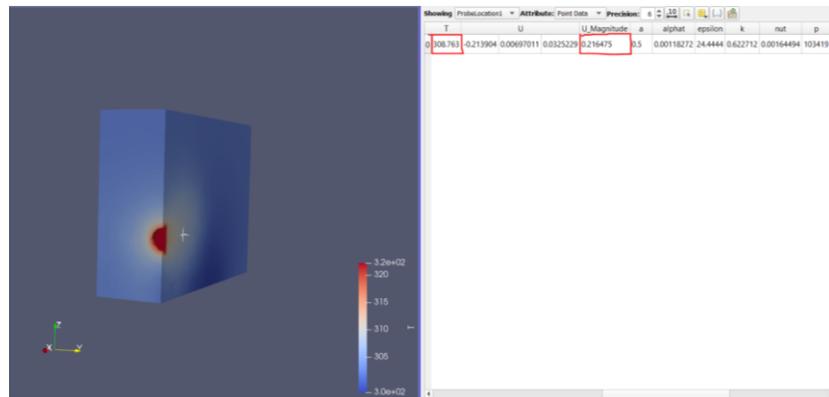
CENTRO			RADIO
0,065811311	0,001936403	0,051058546	8,66025E-05

Tomado de: Excel

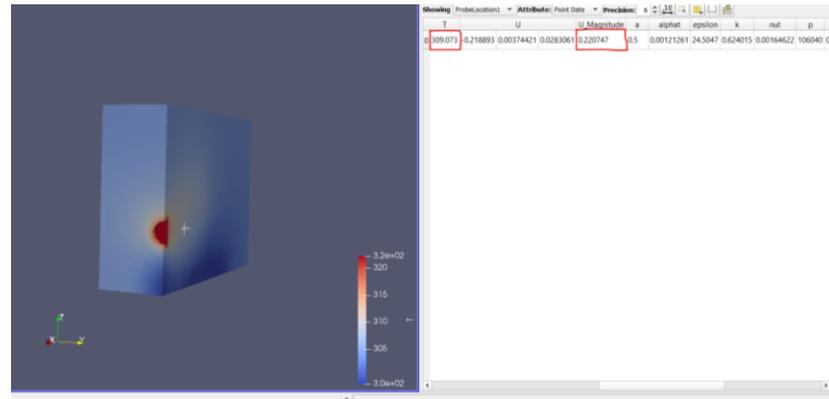
Figura 48. Valores T y U



[a]

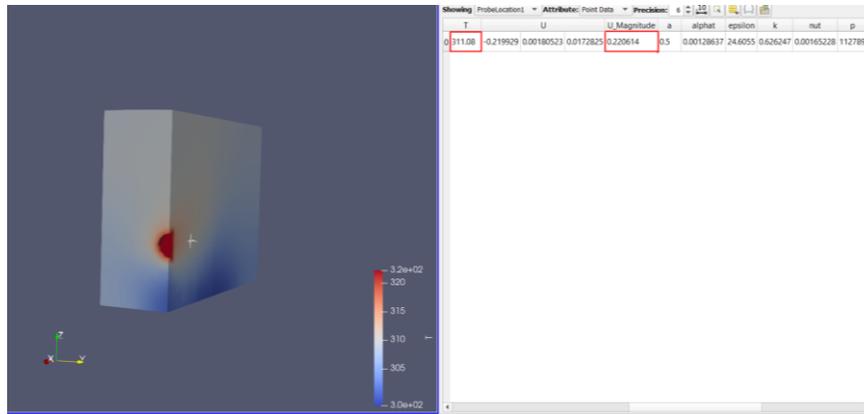


[b]

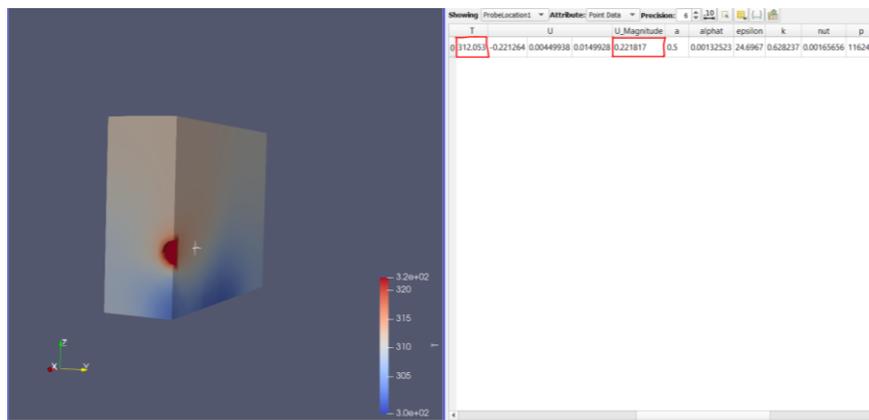


[c]

DISEÑO DE UN MEDIDOR DE ESPEJO ENFRIADO



[d]



[e]

Tomado de: ParaView

Los resultados de los valores medidos representado por la cruz blanca, se presentan en la tabla 8:

Tabla 8. Valores de T y U

ParaView	VARIABLES		
	Tiempo [s]	T [K]	U [m/s]
[a]	0,025	300,376	0,0602108
[b]	1,2	308,763	0,216475
[c]	2	309,073	0,220747
[d]	4	311,08	0,220614
[e]	5	312,053	0,221817

Tomado de: Excel

4. Conclusiones

El prototipo planteado para la medición del punto de rocío en el gas natural presenta una mejora en el manejo e interpretación de datos frente a los equipos manuales existentes actualmente.

Se determinaron algunos parámetros de operación teniendo en cuenta los equipos ya existentes, permitiendo considerar datos que permiten su correcto funcionamiento, además se identificaron otros parámetros teniendo en cuenta los requisitos planteados en el RUT y el comportamiento que presenta el gas natural, como es el caso de su condensación fraccional.

En la selección del método de detección de la condensación, se planteó un controlador PID que cumplió con el objetivo de regular la temperatura a la que se someterá el gas natural. Además, se implementó el principio Dark Spot que presenta un funcionamiento óptimo en la industria, siendo un ejemplo su implementación en equipos de medición como CONDUMAX II de Michell Instruments. Esto permite eliminar el problema principal de los medidores de espejo enfriado tradicionales, el cual tiene que ver con la inspección visual de un operario, ya que el principio Dark Spot, junto a los sensores elegidos permite identificar cuando aparece la condensación en el gas natural y así obtener un resultado exacto. Por otro lado, la implementación del controlador PID permite mantener constante la temperatura de medición de acuerdo a las exigencias establecidas en el RUT.

En la representación y dimensionamiento del medidor de espejo enfriado se obtuvo un resultado favorable, donde se buscaba un prototipo óptimo e intuitivo. Se presentó un estilo de polígono que encierra aquellos elementos necesarios para su correcto funcionamiento. Además, se realizaron los respectivos planos de acuerdo a la norma técnica colombiana de

dibujo técnico, permitiendo así una correcta interpretación en su acotación en caso de ser sometido a una siguiente fase de construcción.

En la simulación del proceso de medición se encontró que el prototipo planteado cumple con su funcionamiento, donde se buscó analizar el comportamiento del gas natural frente a los cambios causados por la celda Peltier. Se logró observar como el gas natural está sometido a un constante enfriamiento por parte de la Fuente de energía y como su velocidad varía con respecto al tiempo, pero en mínima medida.

Teniendo en cuenta lo anterior, se determinó que el prototipo cumple con los requisitos planteados por el RUT y es un equipo óptimo que puede llevarse a cabo en la industria de hidrocarburos.

4.1 Trabajos futuros

Teniendo en cuenta el avance realizado para el prototipo del medidor de espejo enfriado, se plantean algunos posibles trabajos futuros que siguen con la presente línea de investigación:

- Construcción del prototipo.
- Análisis del comportamiento del gas natural frente a la condensación fraccional en el medidor de espejo enfriado.
- Diseño de un solver para condensación en el software OpenFoam.

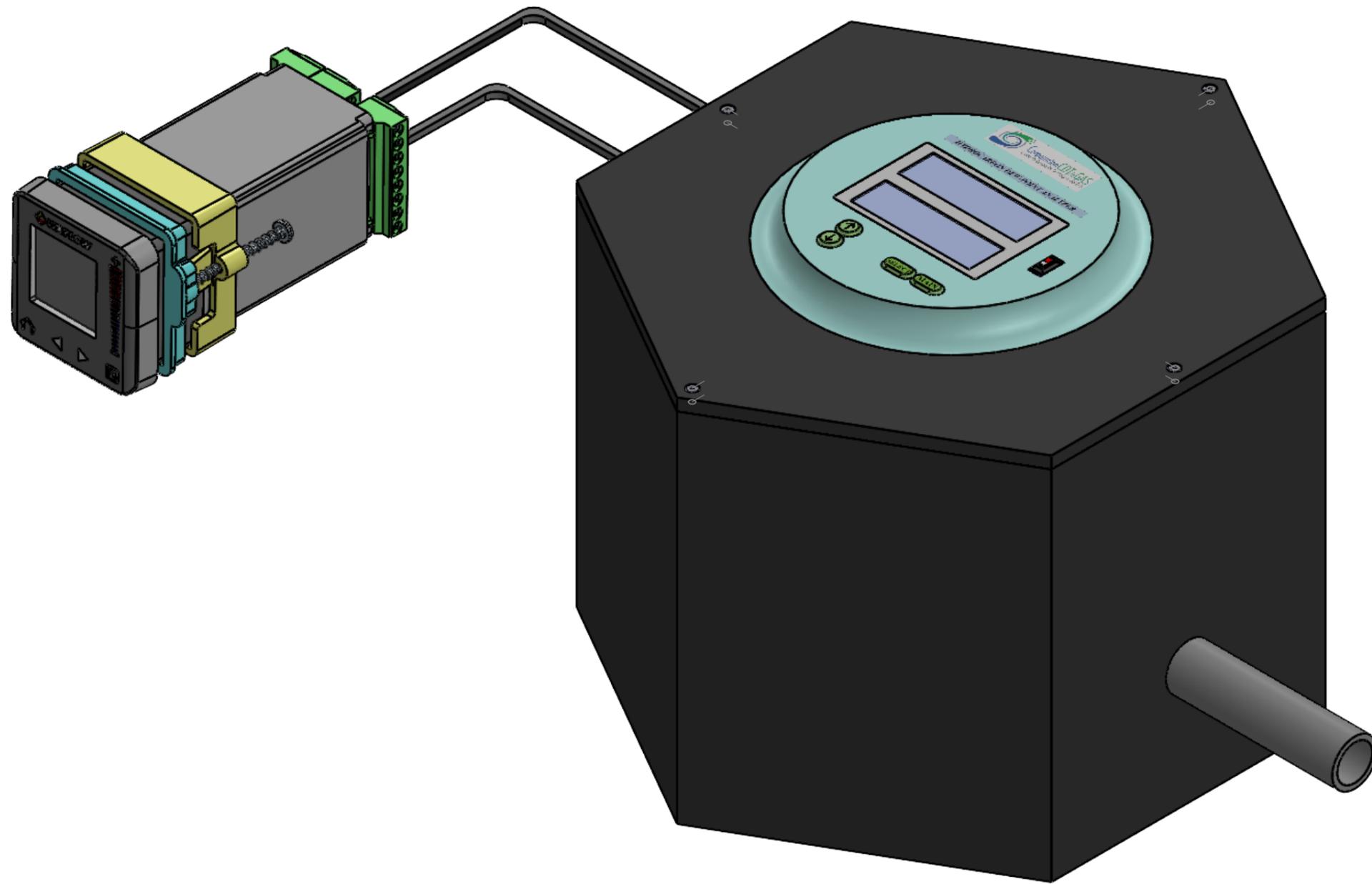
Referencias

- Automation, G. (2021). *Global Automation*. Obtenido de <https://globalautomation.com.co/medidores-de-punto-de-rocio/#1611714565732-2dfbb297-f3fa>
- Benton, A. (s.f.). DETERMINATION OF HYDROCARBON DEW POINT IN NATURAL GAS. *Michell Instruments, Inc*, 8.
- CONTROL, L. I. (2015). *Acero inoxidable tubería*. COMFIT.
- Enagas. (2014). *Enagas*. Obtenido de <https://www.enagas.es/enagas/es/QuienesSomos/QueEsElGasNatural/ElGasNatural#:~:text=Desde%20el%20punto%20de%20vista,trazas%20de%20hidrocarburos%20m%C3%A1s%20pesados.>
- Energía, M. d. (2018). Comisión de regulación de energía y gas. *Resolución No. 050 del 2018* (pág. 2). Ministerio de Minas y Energía.
- Energía, M. d. (2018). *Resolución No. 050 de 2018*. Comisión de Regulación de Energía y Gas.
- ENERGÍA, M. D. (2018). *RESOLUCIÓN No.050 de 2018*. COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS.
- Hamui-Sutton, A. (2013). *Un acercamiento a los métodos mixtos de investigación en educación médica*.
- Herring, J. (2018). *Determination of Hydrocarbon Dew Point Measurement in Natural Gas*. Danbury.
- ICONTEC. (1996). *NTC 1993. Dibujo técnico. Tornillos roscados y partes roscadas. Parte 1: Convenciones generales*. ICONTEC.
- ICONTEC. (2001). *NTC 1777 Dibujo técnico. Principios generales de presentación*. ICONTEC.
- INSTRUMENTS, M. (2019). *CONDUMAX II Analizador del punto de rocío de hidrocarburo*. MICHELL INSTRUMENTS.
- LamarUSA. (2022). *LamarUSA INSTRUMENTATION & CONTROL*. Obtenido de <https://img1.wsimg.com/blobby/go/2150c202-a852-4c4d-bd36-01db75b41db9/COMFIT%20Espa%C3%B1ol%20..pdf>
- Michalsen, K. (2014). *Fundamentals of natural gas processing- hydrocarbon dew point meter modelling*. Trondheim.
- Mussons, T. V. (2017). *Ampliación y mejora de la capacidad de medida y calibración de higrómetros de punto de rocío con el patrón nacional de humedad en el margen de -10°C a 95°C*. Valladolid: Universidad de Valladolid.
- Nasrifar, K. (2006). *Prediction of thermodynamic properties of natural gas mixtures*. Trondheim: science direct.

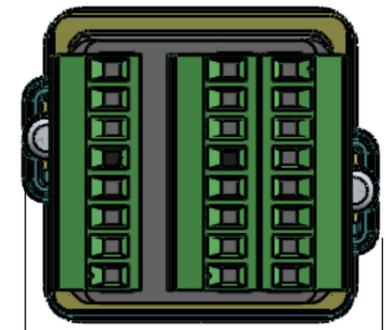
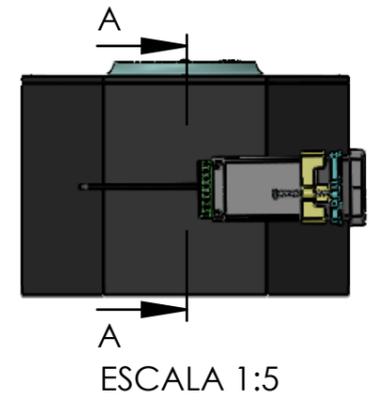
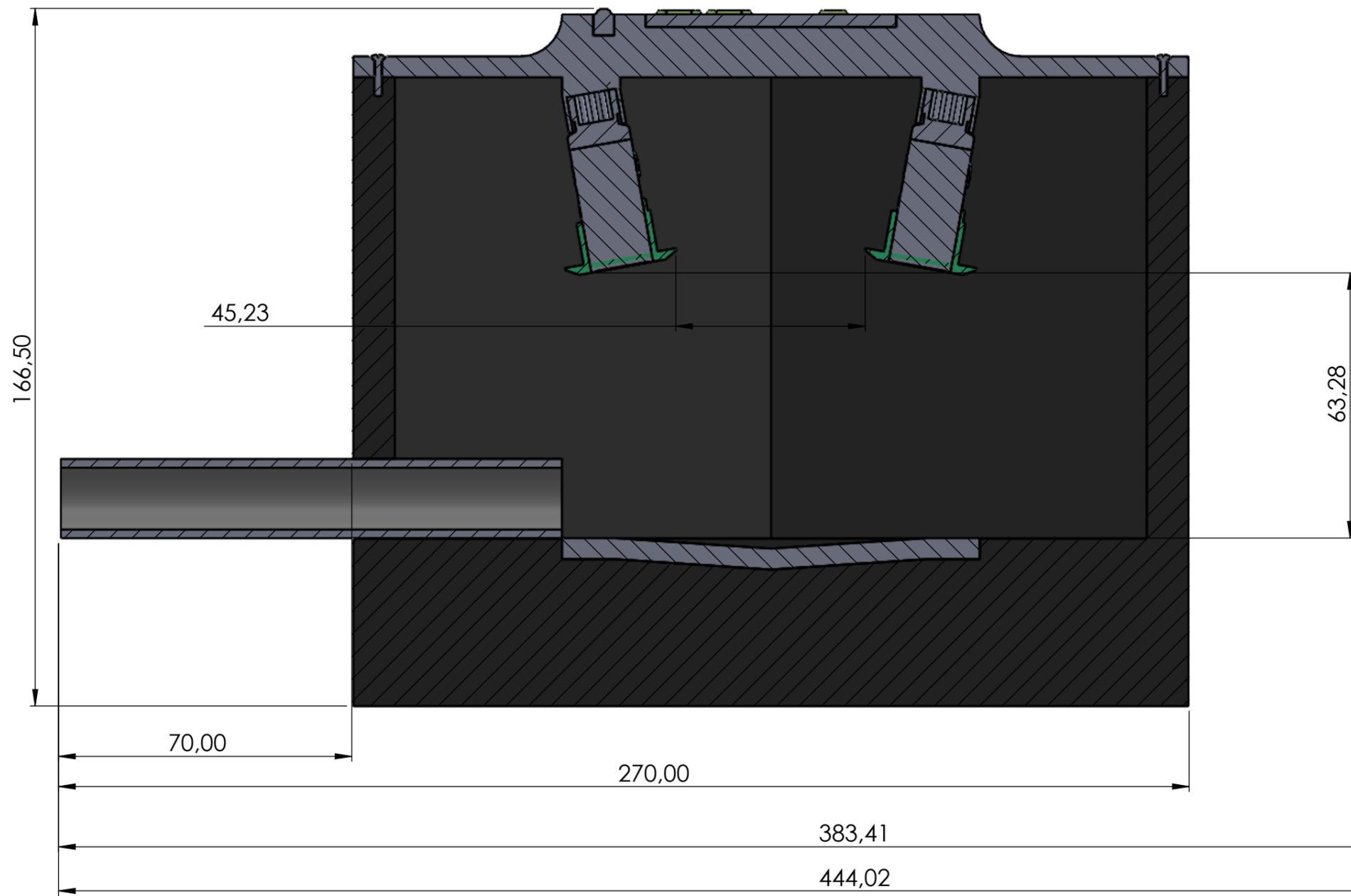
DISEÑO DE UN MEDIDOR DE ESPEJO ENFRIADO

- Pepperl+Fuchs. (2022). *Pepperl+Fuchs*. Obtenido de https://www.pepperl-fuchs.com/global/es/classid_9.htm?view=productdetails&prodid=31855#overview
- PEPPERL+FUCHS. (2022). *Sensor fotoeléctrico de barrera, unidireccional GD18/GV18/73/120*.
- Pereira, I. J. (2010). *Estado del arte sobre la instrumentación ofrecida por Ametek Process Instruments para aplicaciones con gas natural en plantas petroquímicas*. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Questionpro. (2022). *Questionpro*. Obtenido de <https://www.questionpro.com/blog/es/investigacion-descriptiva/>
- Suto. (2021). *Suto-Itec*. Obtenido de <https://www.suto-itec.com/es/productos/medidores-de-punto-de-rocio>
- Vanti. (2022). *Vanti*. Obtenido de <https://www.grupovanti.com/conocenos/el-gas-natural/que-es/>
- Vympel. (2022). *Vympel*. Obtenido de <https://en.vympel.group/products/gas-analyzers/hygrovision-bl/>
- Watlow. (2022). *Watlow*. Obtenido de <https://www.watlow.com/products/controllers/temperature-and-process-controllers/pm-plus>
- Yunes Cengel, M. B. (2012). *Termodinámica*. Mc Graw Hill.

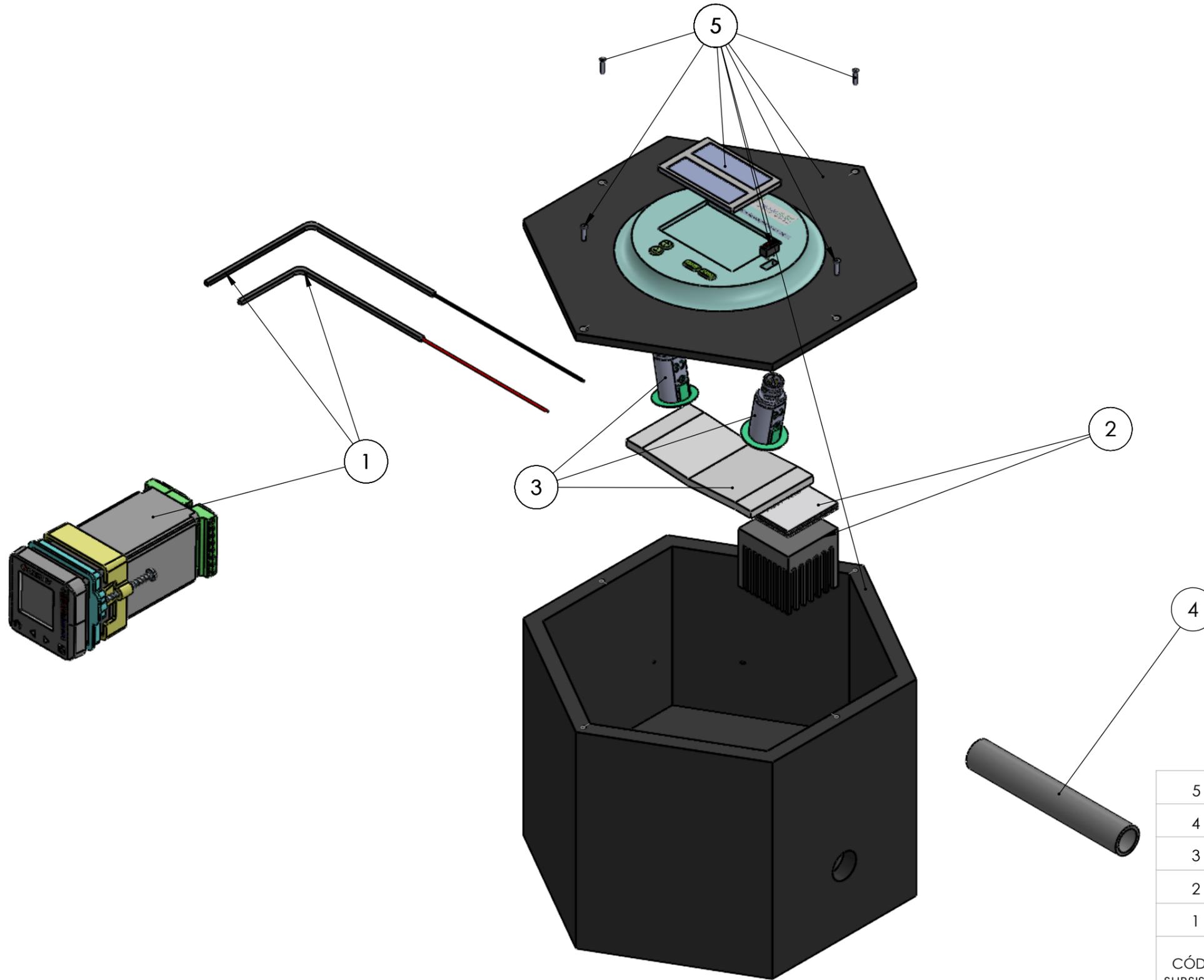
Apéndices



				UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 29/07/2022		TITULO: MEDIDOR DE ESPEJO ENFRIADO ISOMÉTRICA			
ESCALA: 1:1.5		AUTOR: EDGAR MAURICIO MORANTES RODRIGUEZ			
UNIDADES: mm		REVISAR:		HOJA 1/24	
A3					



 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 29/07/2022		TITULO: MEDIDOR DE ESPEJO ENFRIADO VISTA DE SECCIÓN	
ESCALA: 1:1.2		AUTOR: EDGAR MAURICIO MORANTES RODRIGUEZ	
UNIDADES: mm		REVISAR:	
A3			HOJA 2/24



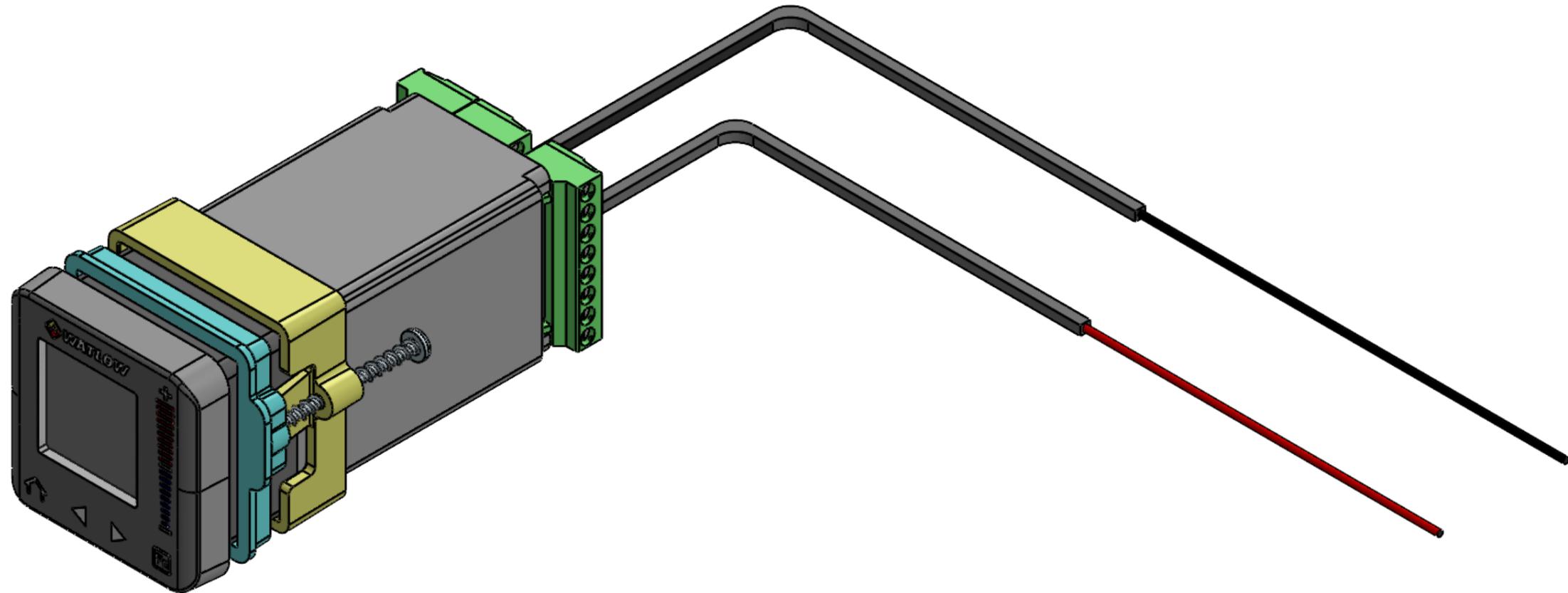
5	SUBSISTEMA DE MANEJO
4	SUBSISTEMA DE TRANSPORTE
3	SUBSISTEMA DE DETECCIÓN
2	SUBSISTEMA DE ENFRIAMIENTO
1	SUBSISTEMA DE CONTROL

CÓDIGO SUBSISTEMA	NOMBRE
-------------------	--------

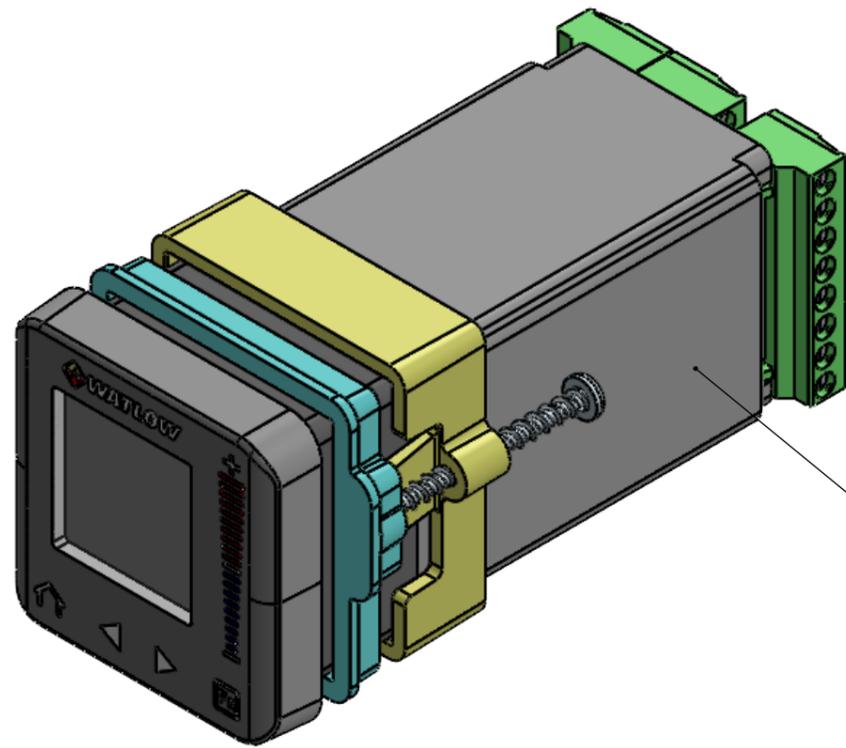


UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

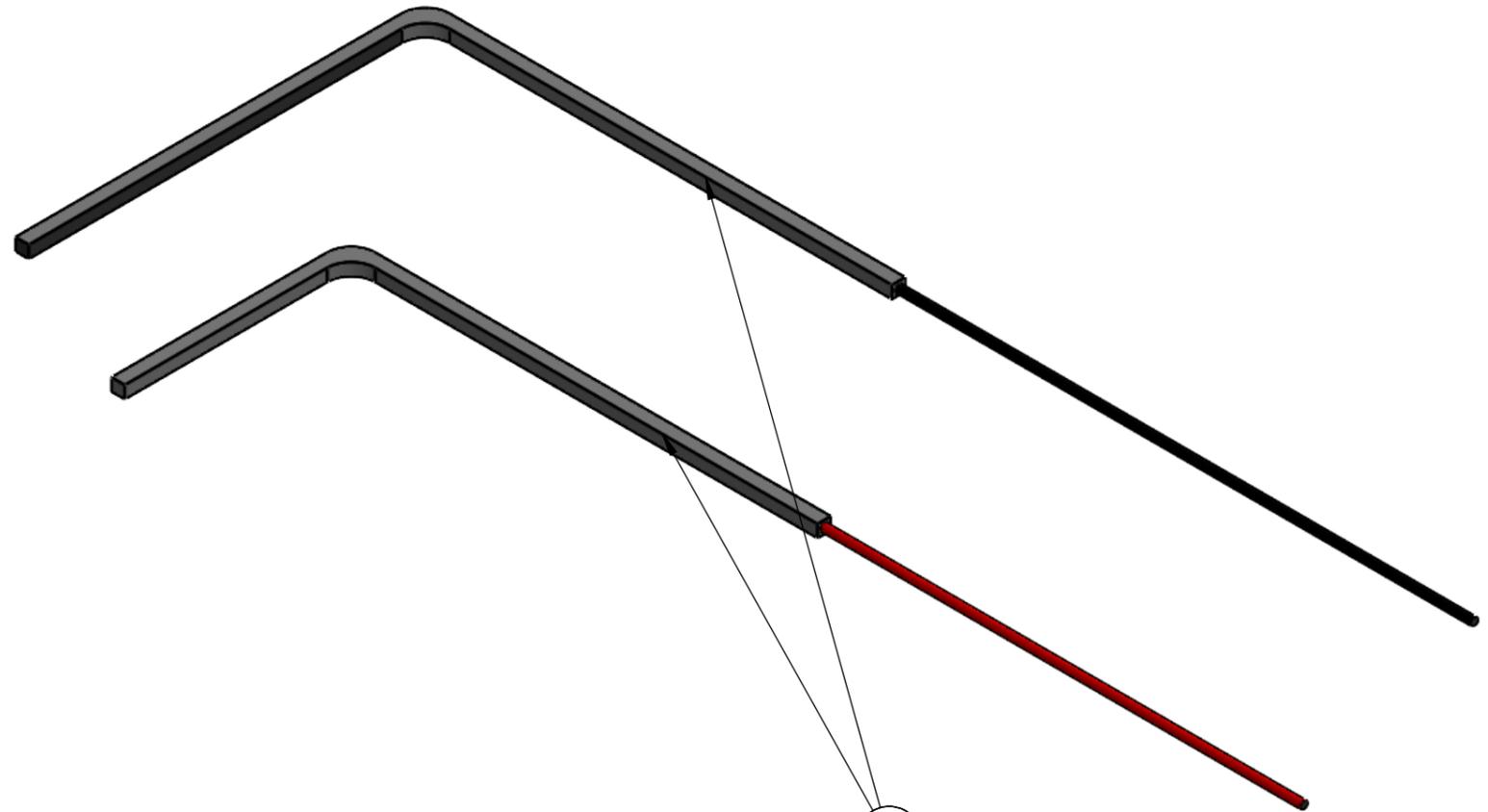
FECHA: 29/07/2022	TITULO: SUBSISTEMAS DEL MEDIDOR DE ESPEJO ENFRIADO VISTA EXPLOSIONADA
ESCALA: 1:2.5	
UNIDADES: mm	AUTOR: EDGAR MAURICIO MORANTES RODRIGUEZ
A3	REVISAR: 



				UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 29/07/2022		TITULO: SUBSISTEMA DE CONTROL ISOMÉTRICA			
ESCALA: 1:1		AUTOR: EDGAR MAURICIO MORANTES RODRIGUEZ			
UNIDADES: mm		REVISAR:		REVISAR:	
A3					HOJA 4/24

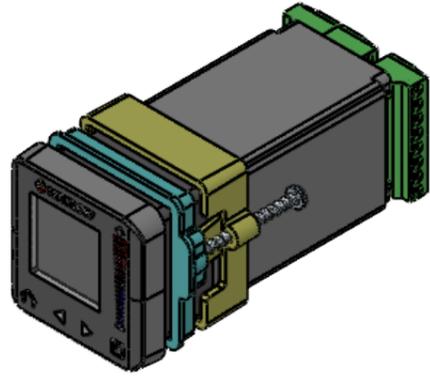


1.1

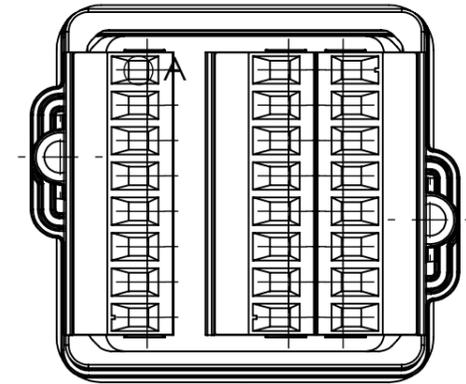
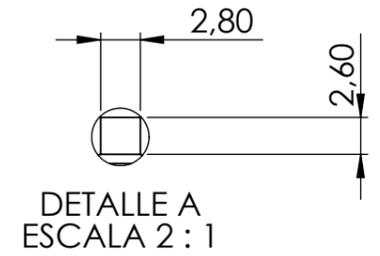
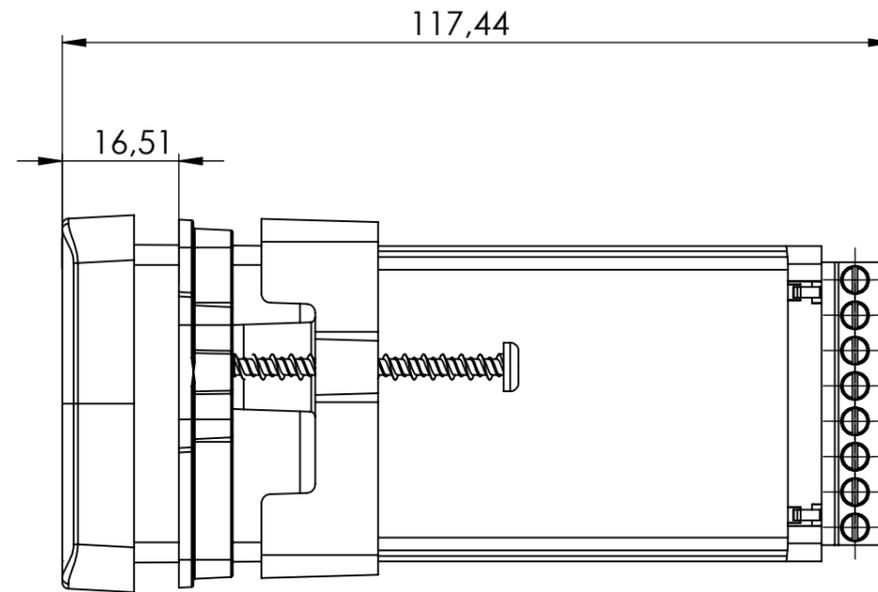
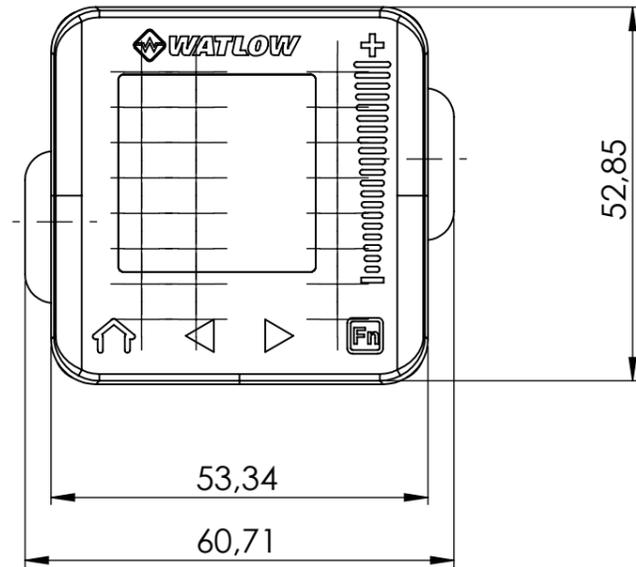


1.2

1.2	CABLE ELECTRICIDAD	2	MATERIAL COBRE
1.1	CONTROLADOR PID	1	PM PLUS CONTROLLER WATLOW
CÓDIGO PIEZA	NOMBRE DE LA PIEZA	CANT.	ESPECIFICACIÓN: DIMENSIONAL, MATERIAL, REFERENCIA TÉCNICA DE SELECCIÓN, MARCA.
 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 29/07/2022		TITULO: SUBSISTEMA DE CONTROL VISTA EXPLOSIONADA	
ESCALA: 1:1		AUTOR: EDGAR MAURICIO MORANTES RODRIGUEZ	
UNIDADES: mm		REVISAR:	
A3			HOJA 5/24



ESCALA 1:2



NOTA: CONTROLADOR PID PM PLUS SEGÚN FICHA TÉCNICA WATLOW

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN:

Pieza ensamblada con materiales plásticos y sujeción de tornillos. Controlador en función de PID con rangos de alto voltaje: 85 a 264 VCA y bajo voltaje: 20 a 28 VCA.



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 29/07/2022

ESCALA: 1:1

UNIDADES: mm

A3



TITULO: PIEZA SUBSISTEMA DE CONTROL
CÓDIGO DE PIEZA: 1.1 - CONTROLADOR PID

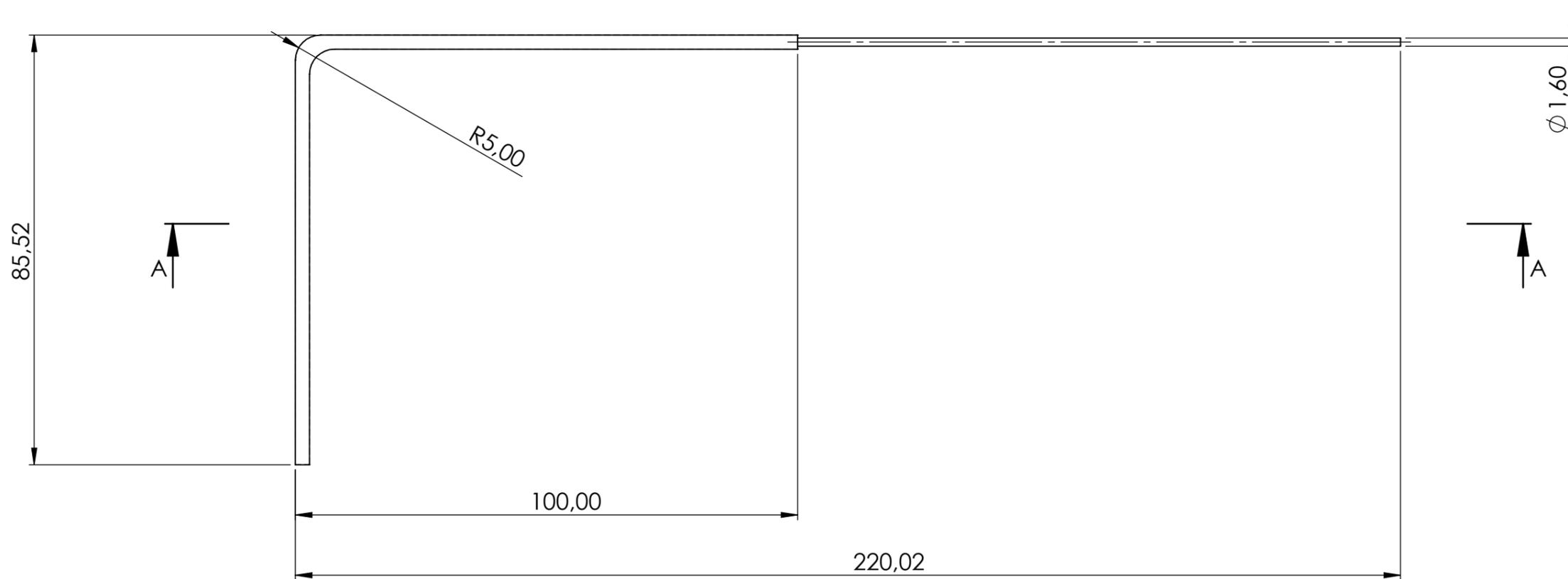
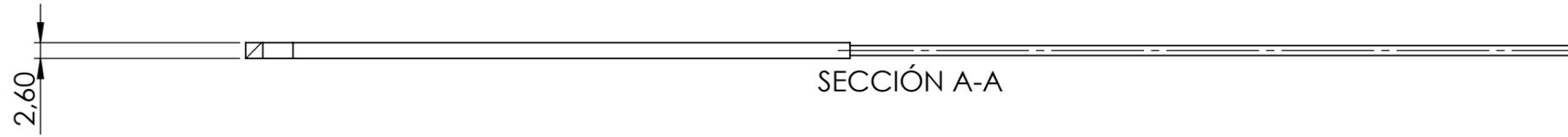
AUTOR: EDGAR MAURICIO MORANTES RODRIGUEZ

REVISAR:

HOJA 6/24



ESCALA 1:2



DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN:

Inicialmente se realiza un trefilado para reducir el tamaño del alambre de cobre hasta el diámetro deseado, seguido se hace un trenzado para agrupar los alambres, luego se aplica una capa de un material de aislamiento y así pasar a un agrupamiento de cables que permite construir un cable multiconductor y finalmente se aplica una cubierta polimérica para cubrir el cableado.



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 29/07/2022

TITULO: PIEZA SUBSISTEMA DE CONTROL
CÓDIGO DE PIEZA: 1.2 - CABLE ELECTRICIDAD

ESCALA: 1:1

UNIDADES: mm

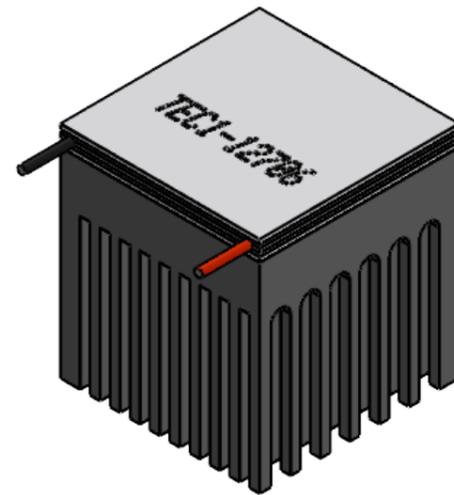
AUTOR: EDGAR MAURICIO MORANTES RODRIGUEZ

A3

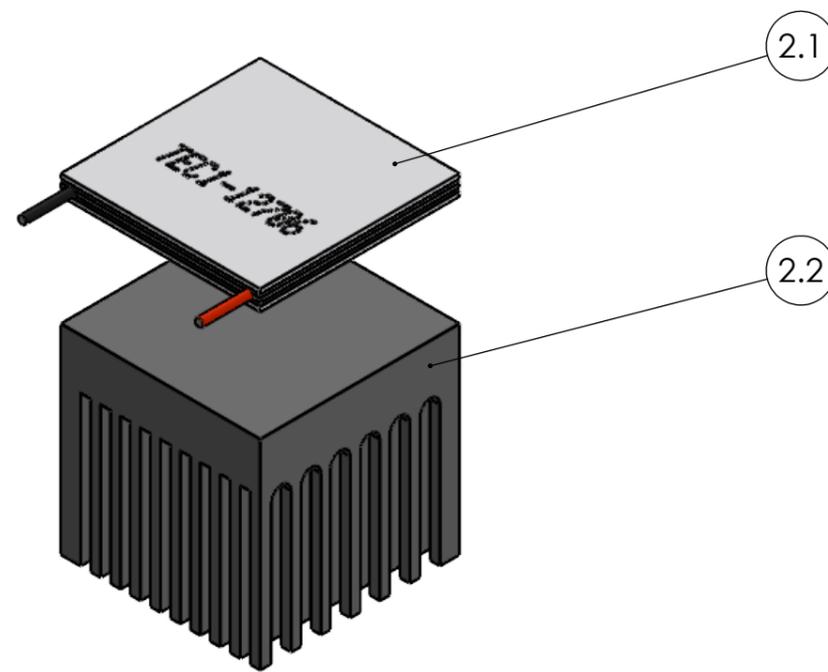


REVISAR:

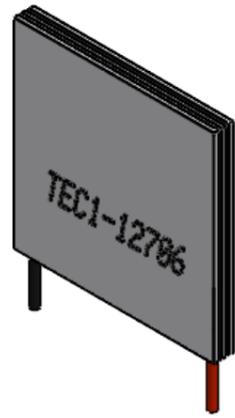
HOJA 7/24



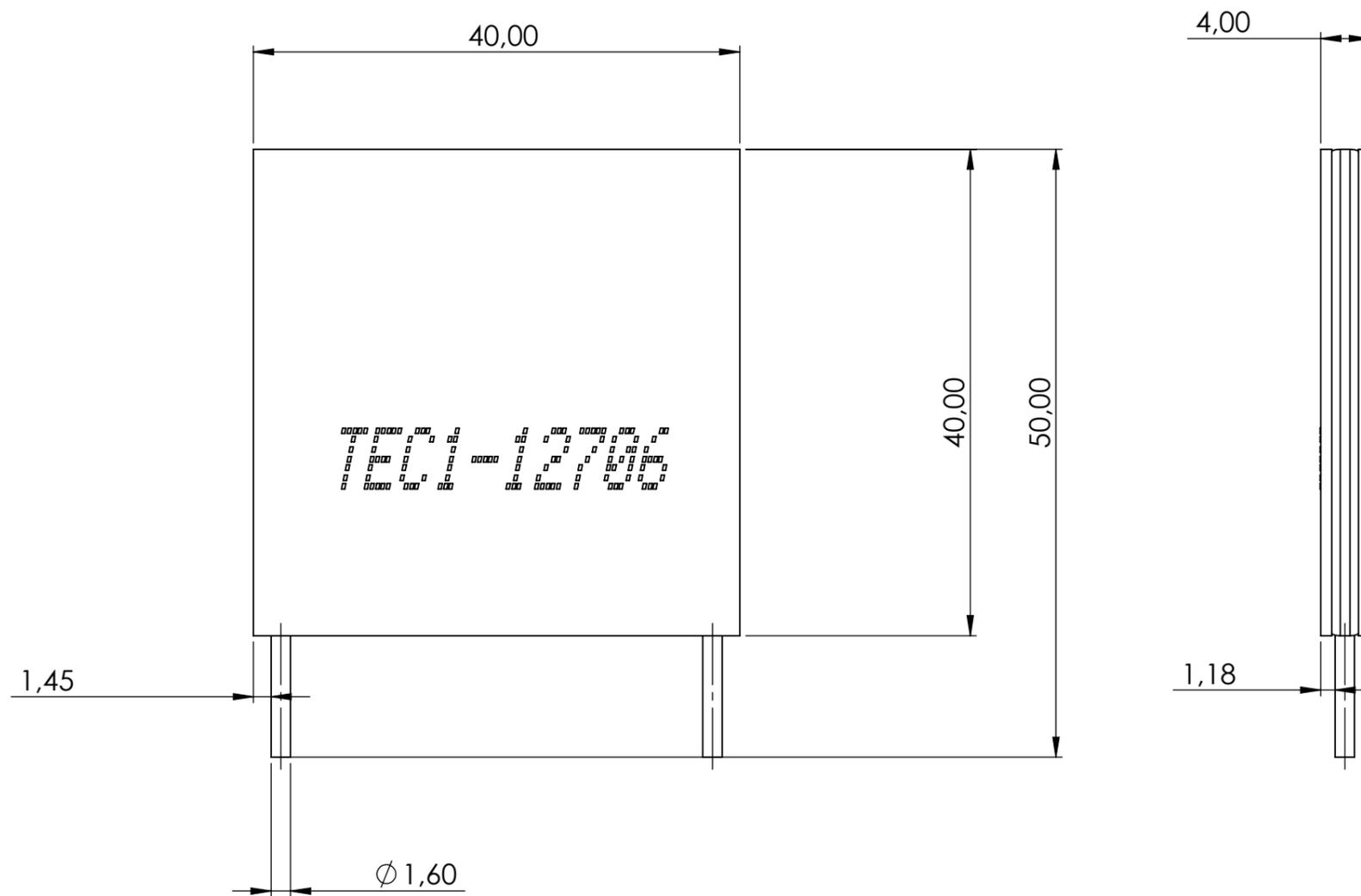
		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 29/07/2022	ESCALA: 1:1	TITULO:	SUBSISTEMA DE ENFRIAMIENTO ISOMÉTRICA
UNIDADES: mm		AUTOR:	EDGAR MAURICIO MORANTES RODRIGUEZ
A3		REVISAR:	HOJA 8/24



2.2	DISIPADOR DE CALOR	1	MATERIAL ALUMINIO
2.1	CÉLULA PELTIER	1	TEC1-12706
CÓDIGO PIEZA	NOMBRE DE LA PIEZA	CANT.	ESPECIFICACIÓN: DIMENSIONAL, MATERIAL, REFERENCIA TÉCNICA DE SELECCIÓN, MARCA.
 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 29/07/2022		TITULO: SUBSISTEMA DE ENFRIAMIENTO VISTA EXPLOSIONADA	
ESCALA: 1:1		AUTOR: EDGAR MAURICIO MORANTES RODRIGUEZ	
UNIDADES: mm		REVISAR:	
A3			HOJA 9/24



ESCALA 1:1



NOTA: VOLTAJE DE OPERACIÓN DE 12V, POTENCIA ELÉCTRICA MÁXIMA DE 107.8W Y POTENCIA CALORÍFICA MÁXIMA DE 62.2W

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN:

Se utilizan dos semiconductores únicos, uno de tipo n y otro de tipo p, con el fin de obtener densidades de electrones diferentes. Posteriormente los semiconductores se colocan térmicamente en paralelo entre sí y eléctricamente en serie y finalmente se unen con una placa conductora térmica en cada lado.



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 29/07/2022

TÍTULO: PIEZA SUBSISTEMA DE ENFRIAMIENTO
CÓDIGO DE PIEZA: 2.1 - CÉLULA PELTIER

ESCALA: 2:1

UNIDADES: mm

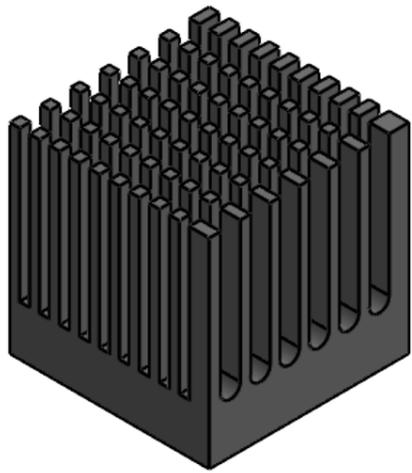
AUTOR: EDGAR MAURICIO MORANTES RODRIGUEZ

A3

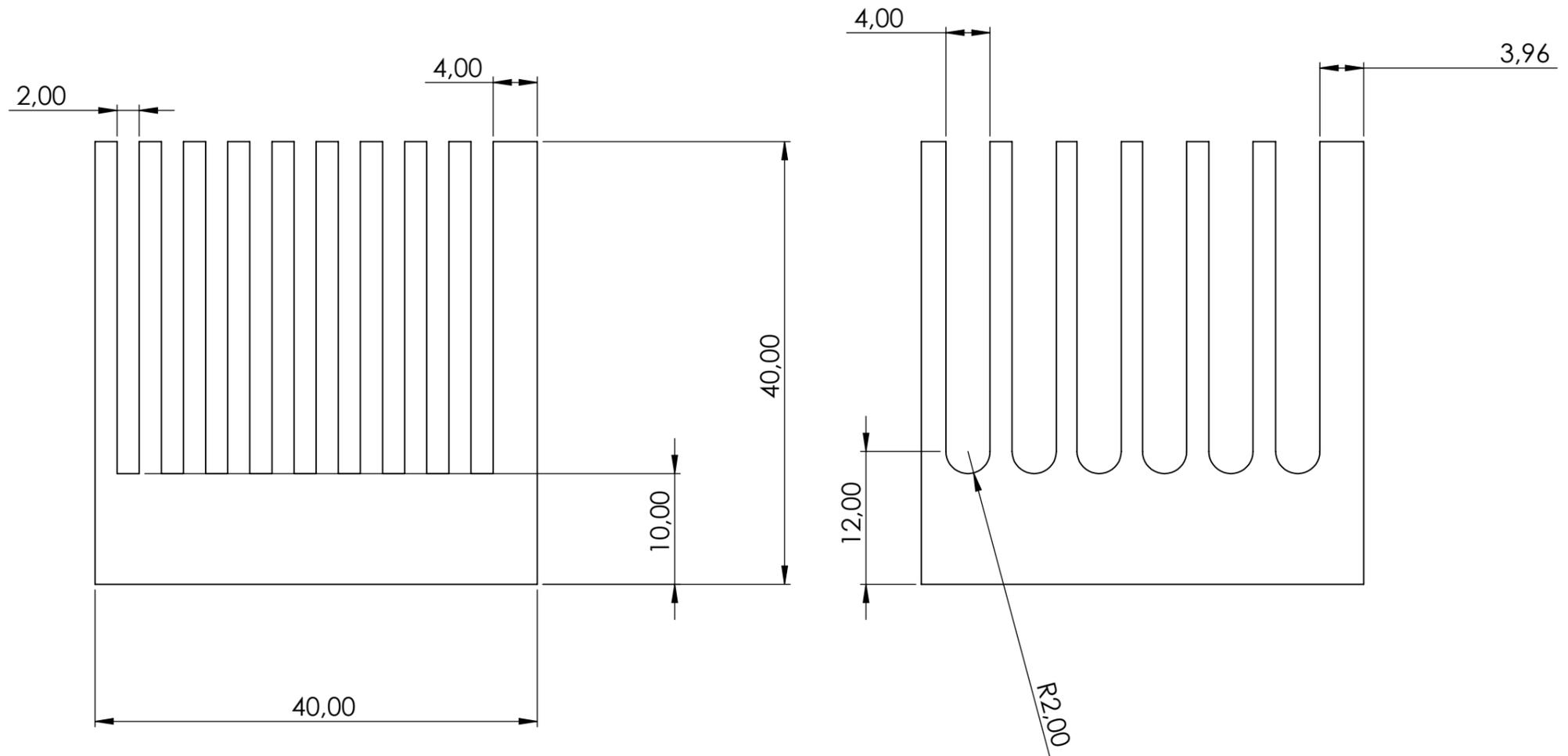


REVISAR:

HOJA 10/24



ESCALA 1:1



DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN:

Se fabrica mediante fundición de aluminio. Este disipador cuenta con un adhesivo en la zona de contacto con la célula Peltier.



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 29/07/2022

TITULO:
PIEZA SUBSISTEMA DE ENFRIAMIENTO
CÓDIGO DE PIEZA: 2.1- DISIPADOR DE CALOR

ESCALA: 2:1

UNIDADES: mm

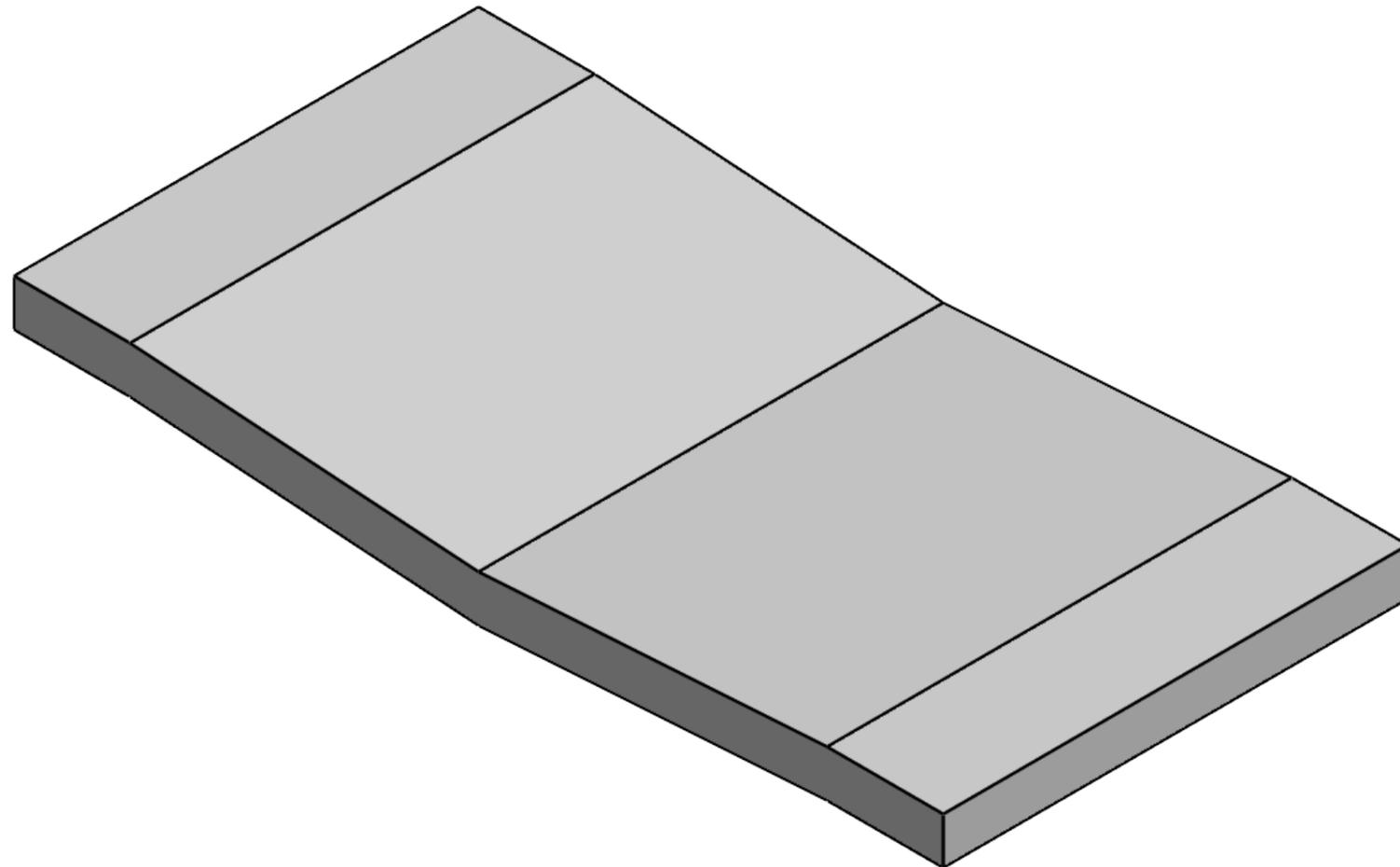
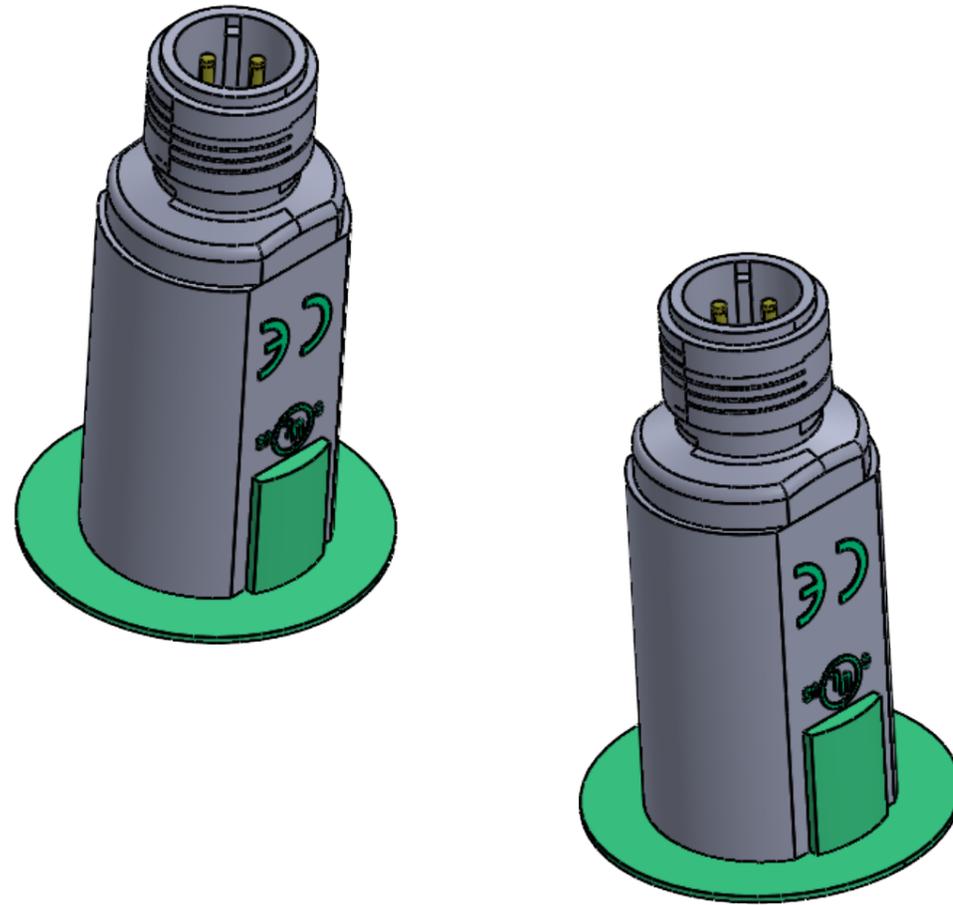
AUTOR: EDGAR MAURICIO MORANTES RODRIGUEZ

A3

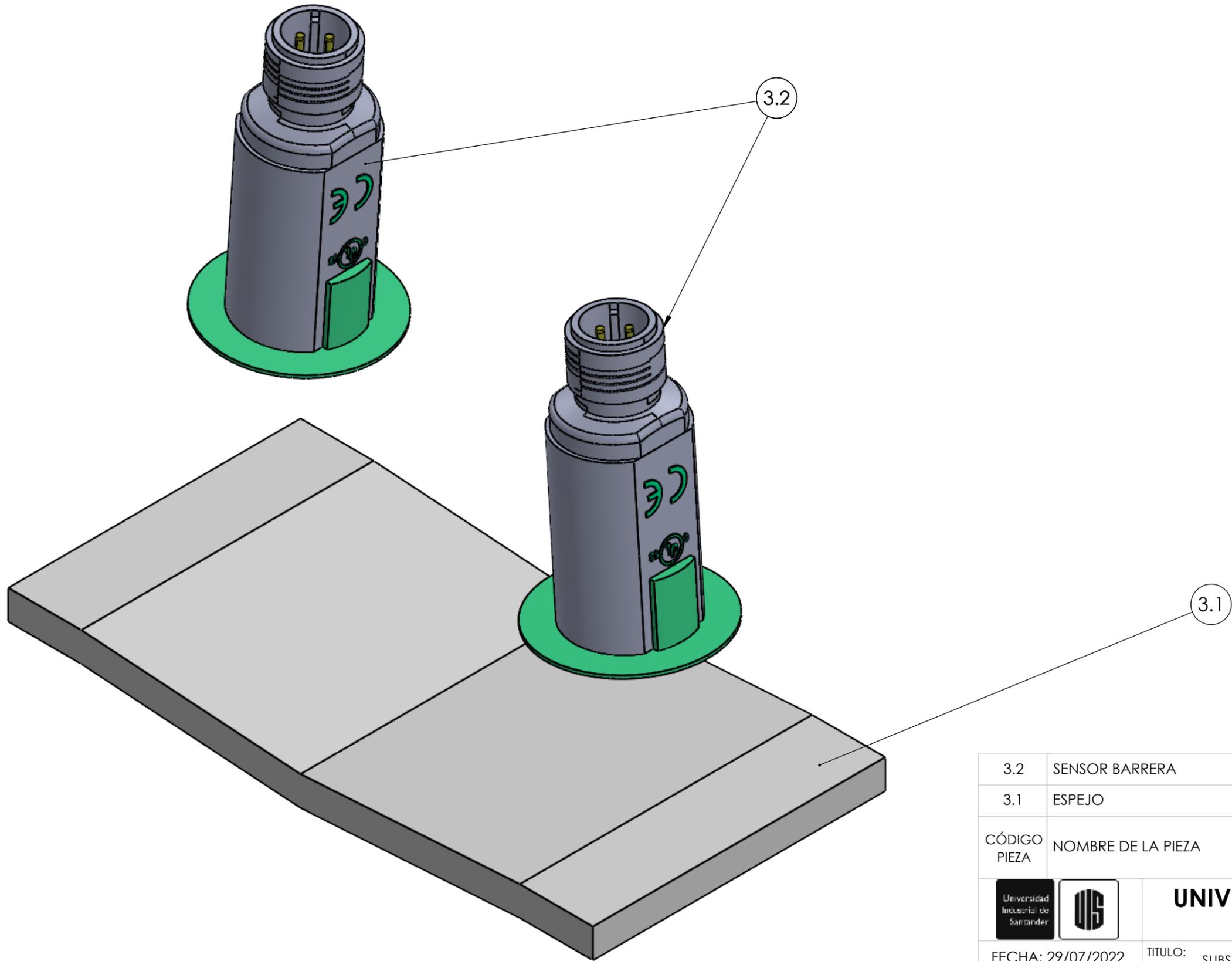


REVISAR:

HOJA 11/24



		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 29/07/2022	ESCALA: 2:1	TITULO:	SUBSISTEMA DE DETECCIÓN ISOMÉTRICA
UNIDADES: mm	A3	AUTOR:	EDGAR MAURICIO MORANTES RODRIGUEZ
		REVIS:	HOJA 12/24

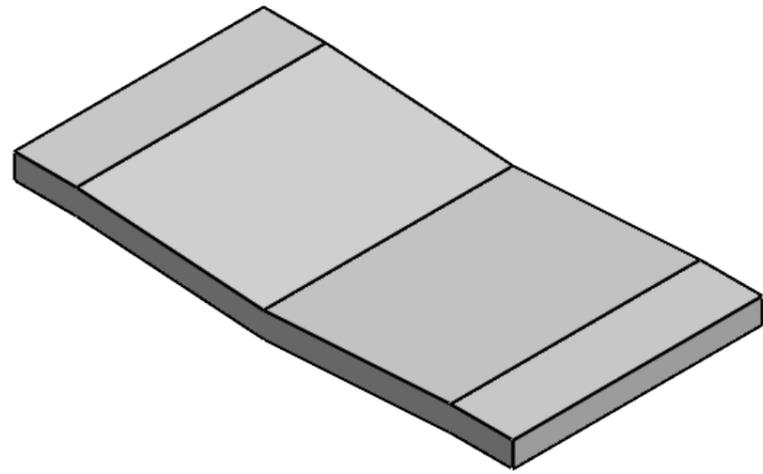


3.2	SENSOR BARRERA	2	SENSOR GD18
3.1	ESPEJO	1	SEMI-MATE DE ACERO INOXIDABLE
CÓDIGO PIEZA	NOMBRE DE LA PIEZA	CANT.	ESPECIFICACIÓN: DIMENSIONAL, MATERIAL, REFERENCIA TÉCNICA DE SELECCIÓN, MARCA.

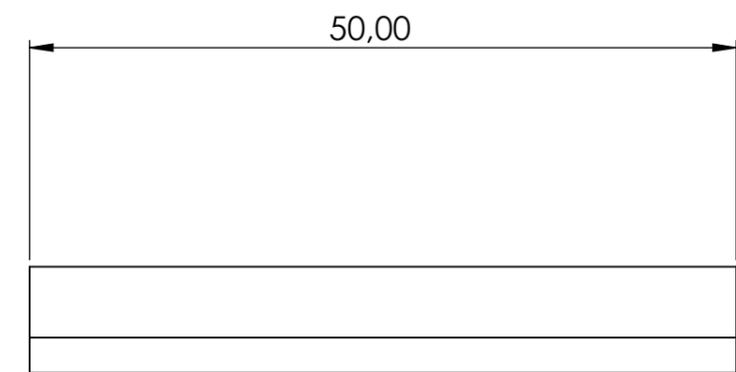
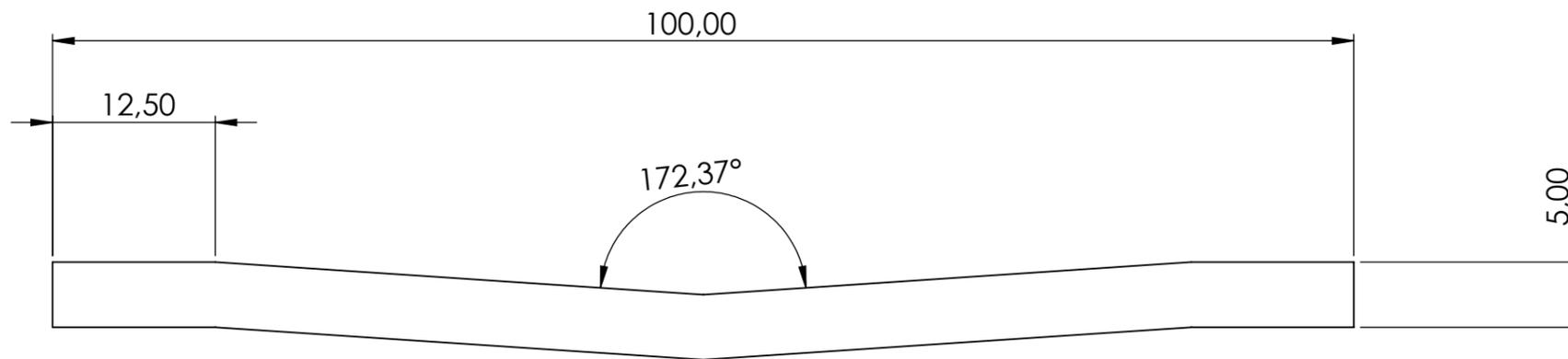


UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 29/07/2022	TITULO: SUBSISTEMA DE DETECCIÓN VISTA EXPLOSIONADA
ESCALA: 2:1	AUTOR: EDGAR MAURICIO MORANTES RODRIGUEZ
UNIDADES: mm	REVISAR:
A3	HOJA 13/24



ESCALA 1:1



DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN:

Inicialmente se obtiene una superficie de acero inoxidable para posteriormente realizar un proceso de pulido cuya fase comienza con una eliminación de soldaduras o impurezas, posteriormente se realiza un matizado, seguido de unos retoques y finalmente un proceso de pulido.



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 29/07/2022

ESCALA: 2:1

UNIDADES: mm

A3

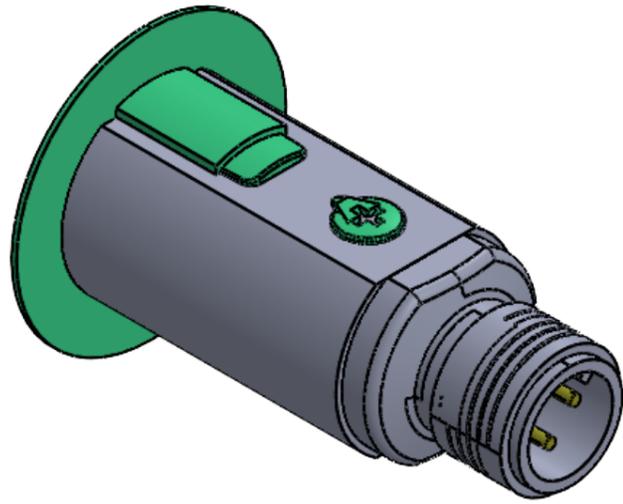


TITULO: PIEZA SUBSISTEMA DE DETECCIÓN
CÓDIGO DE PIEZA: 3.1 - ESPEJO

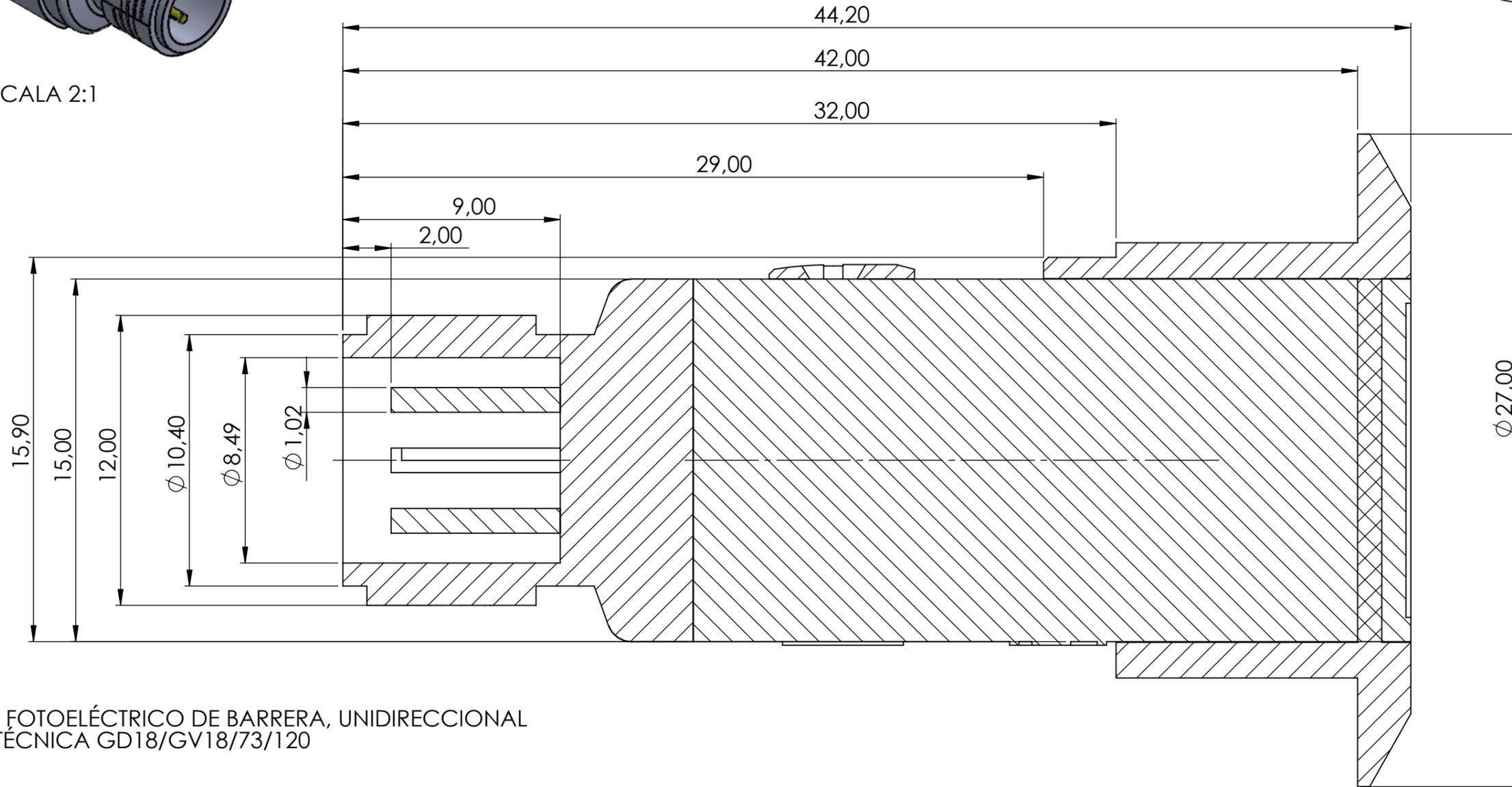
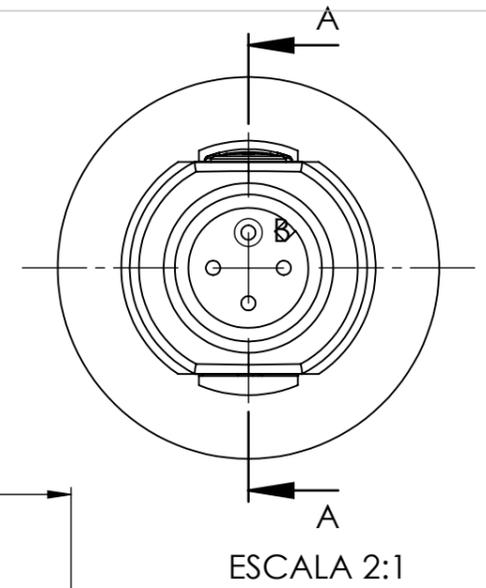
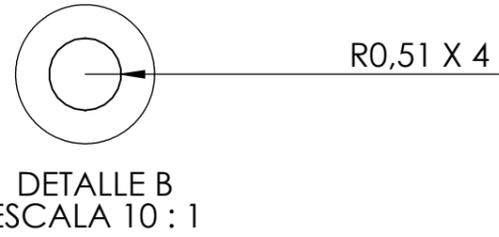
AUTOR: EDGAR MAURICIO MORANTES RODRIGUEZ

REVISAR:

HOJA 14/24



ESCALA 2:1



NOTA: SENSOR FOTOELÉCTRICO DE BARRERA, UNIDIRECCIONAL
SEGÚN FICHA TÉCNICA GD18/GV18/73/120

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN:

Pieza ensamblada con componentes cuyos materiales son de plástico. Tipo de luz roja.



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 29/07/2022

ESCALA: 5:1

UNIDADES: XX

A3

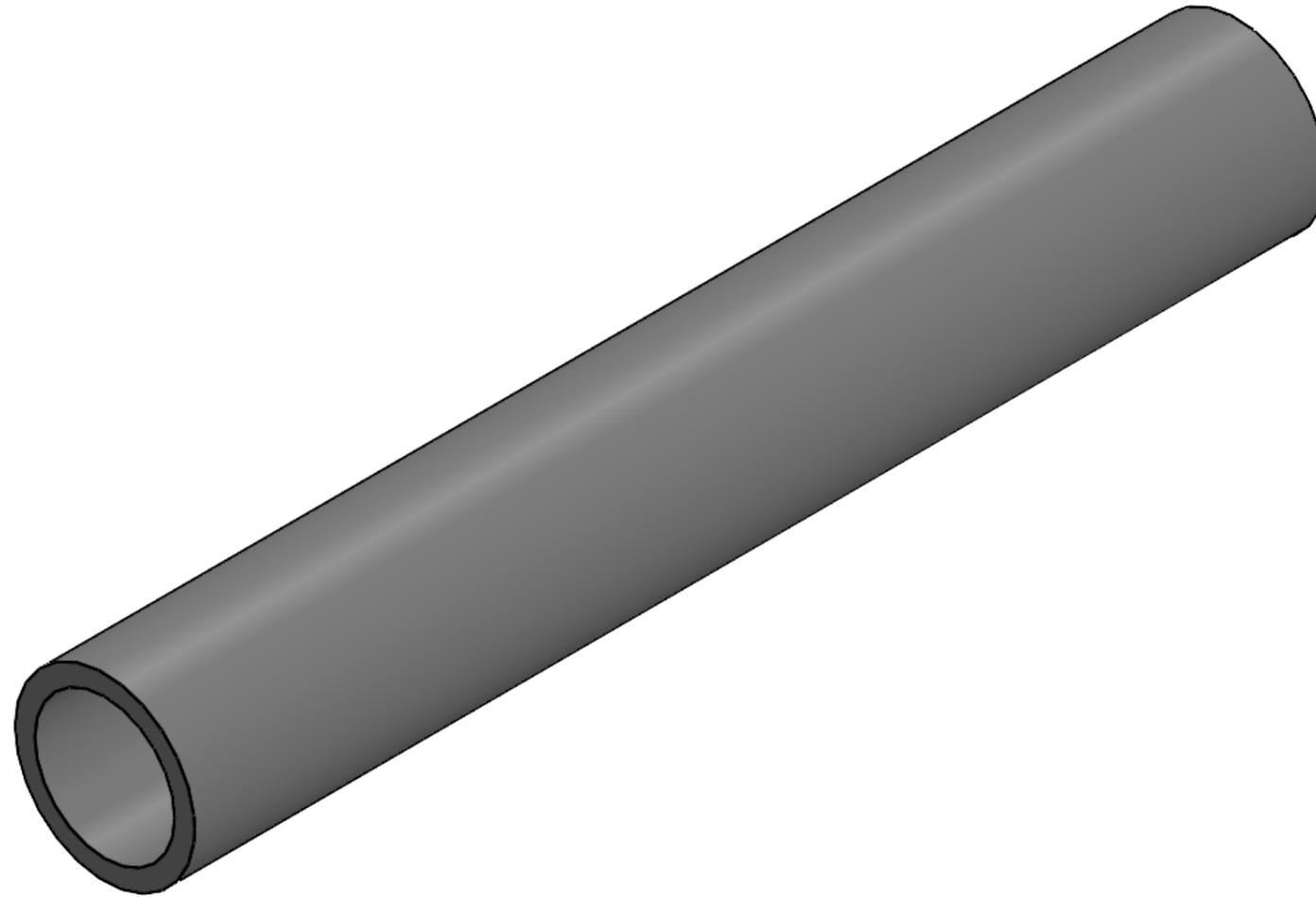


TÍTULO: PIEZA SUBSISTEMA DE DETECCIÓN
CÓDIGO DE PIEZA: 3.2 - SENSOR BARRERA

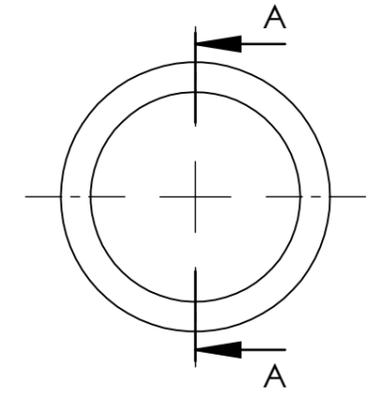
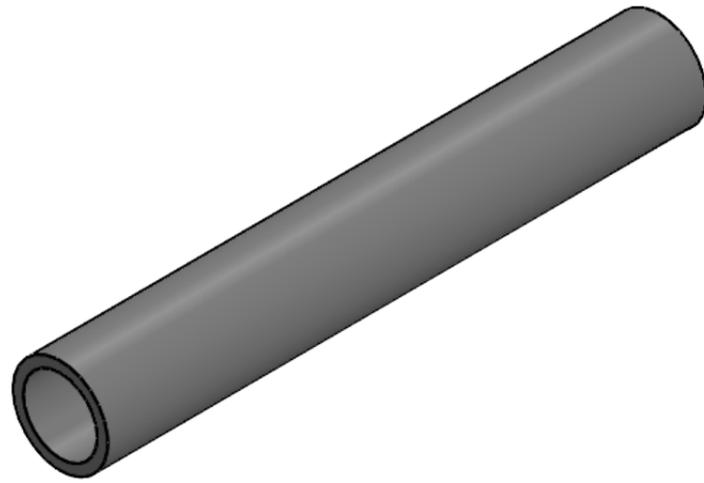
AUTOR: EDGAR MAURICIO MORANTES RODRIGUEZ

REVISAR:

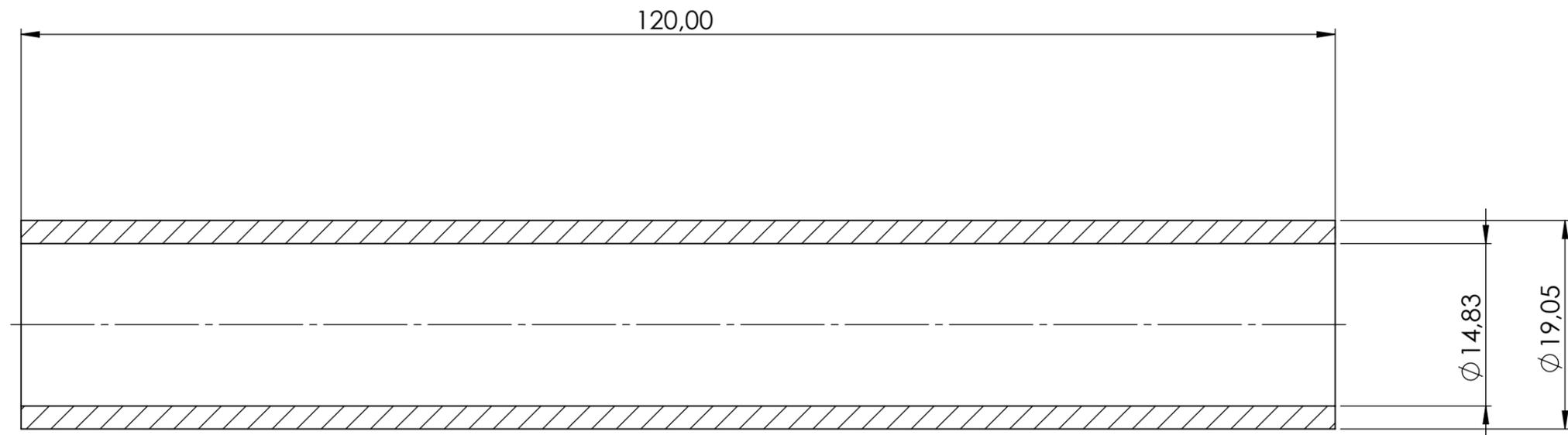
HOJA 15/24



				UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 29/07/2022		TITULO:		SUBSISTEMA DE TRANSPORTE	
ESCALA: 2:1				ISOMÉTRICA	
UNIDADES: mm		AUTOR:		EDGAR MAURICIO MORANTES RODRIGUEZ	
A3		REVISAR:		HOJA 16/24	



ESCALA 1:1



NOTA: Tubing de acero inoxidable 316 sin costura según ficha técnica LamarUSA INSTRUMENTATION & CONTROL

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN:

Inicialmente se tiene un lingote cilíndrico, para posteriormente someterlo a un proceso de calentamiento mediante un horno y así finalmente pasar a un proceso de extrusión.



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 29/07/2022

ESCALA: 2:1

UNIDADES: mm

A3



TITULO:

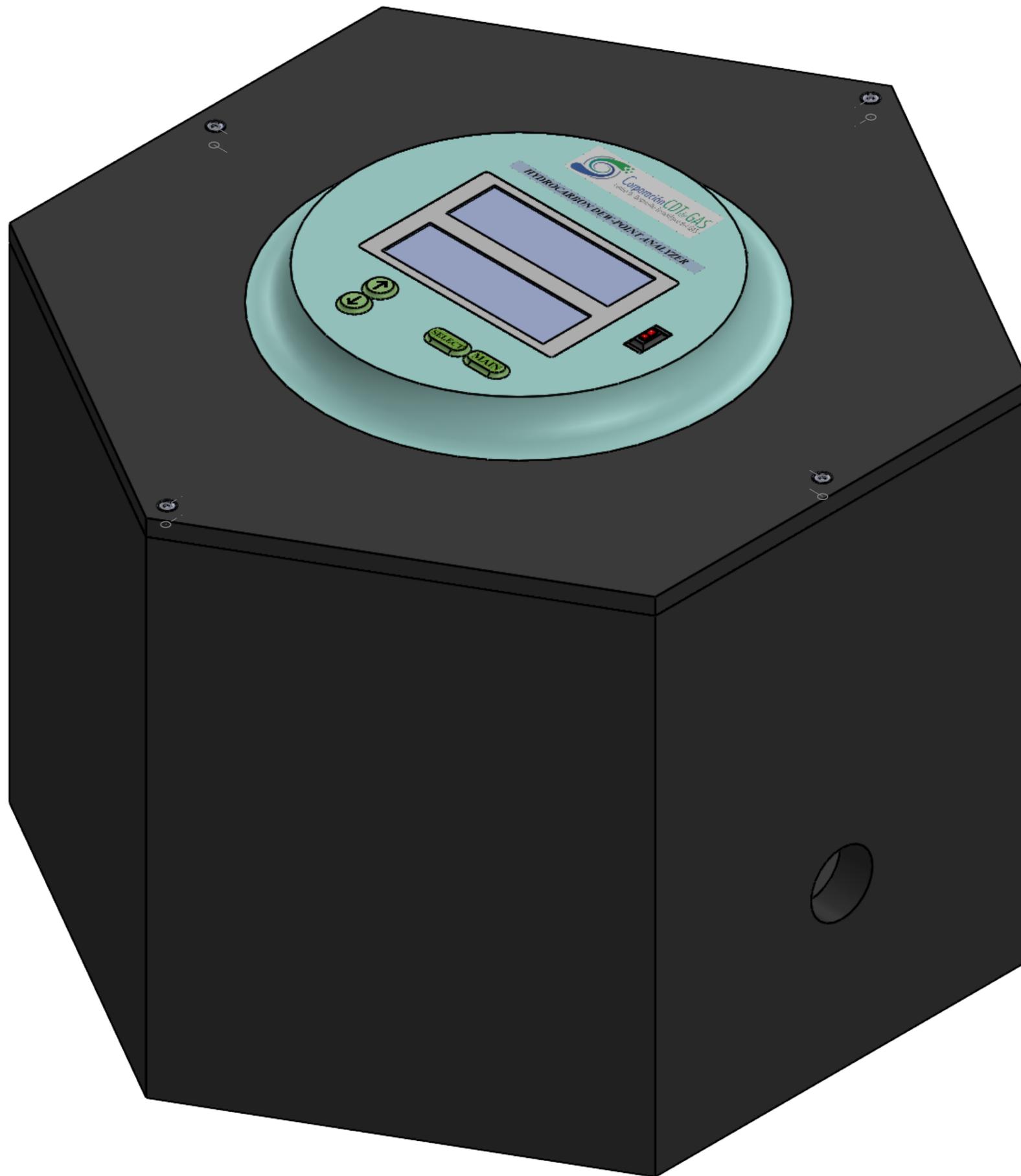
PIEZA SUBSISTEMA DE TRANSPORTE
CÓDIGO DE PIEZA: 5- TUBING

AUTOR:

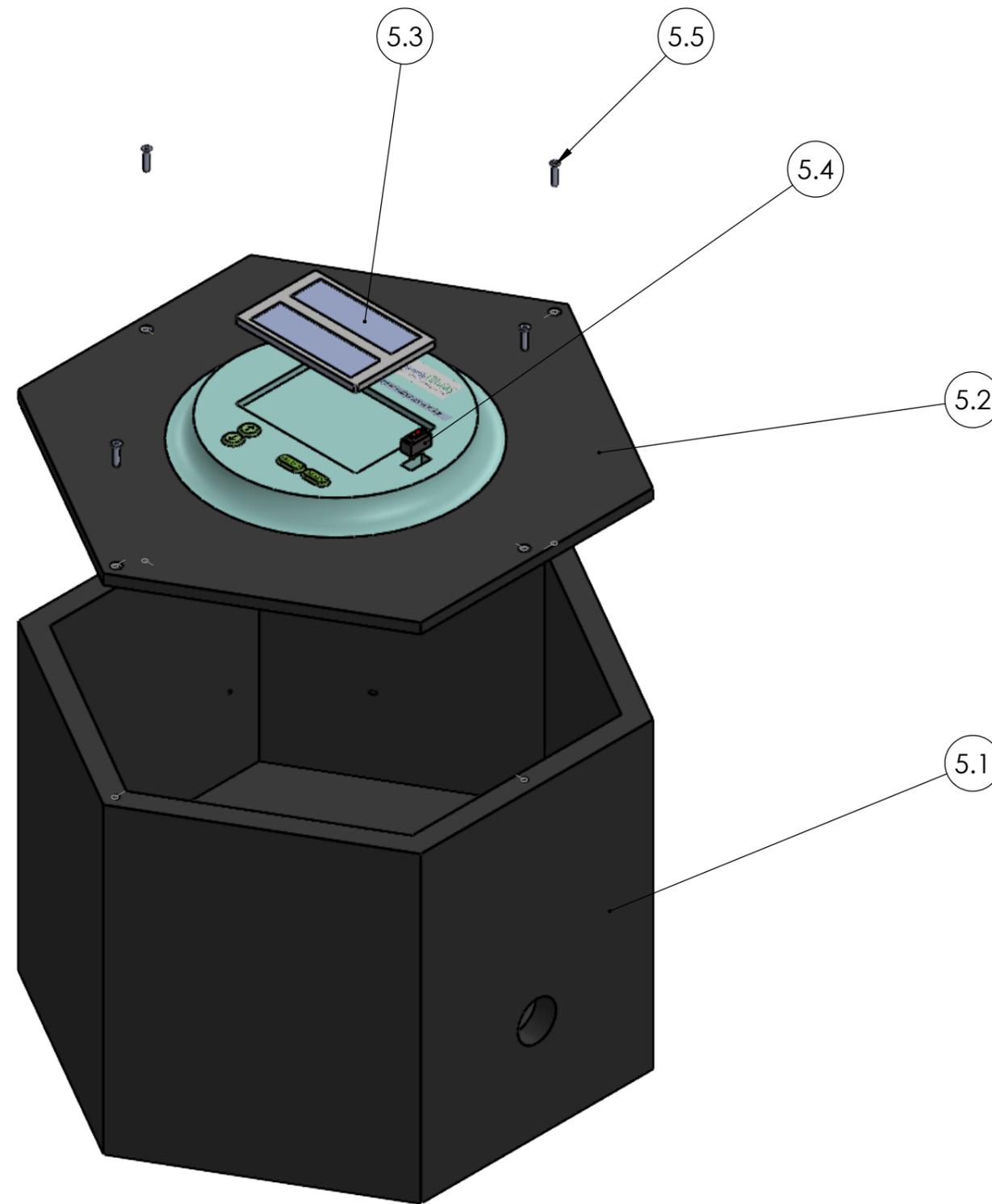
EDGAR MAURICIO MORANTES RODRIGUEZ

REVISAR:

HOJA 17/24



		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 29/07/2022	TITULO:	SUBSISTEMA DE MANEJO ISOMÉTRICA	
ESCALA: 1:1	AUTOR:	EDGAR MAURICIO MORANTES RODRIGUEZ	
UNIDADES: mm	REVIS:		
A3			HOJA 18/24



5.5	TORNILLO AUTORROSCANTE	4	DIN 7051 M2.2 X 8.4
5.4	INTERRUPTOR	1	ON/ OFF. MATERIAL PLÁSTICO
5.3	INTERFAZ	1	MATERIAL PLÁSTICO
5.2	TAPA	1	MATERIAL PLÁSTICO
5.1	CARCASA	1	MATERIAL PLÁSTICO
CÓDIGO PIEZA	NOMBRE DE LA PIEZA	CANT.	ESPECIFICACIÓN: DIMENSIONAL, MATERIAL, REFERENCIA TÉCNICA DE SELECCIÓN, MARCA.



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE
SANTANDER**

FECHA: 29/07/2022

ESCALA: 1:2

UNIDADES: mm

A3

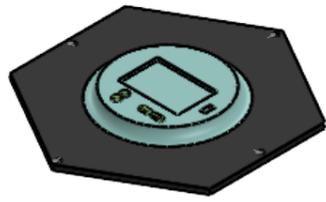


TITULO:
SUBSISTEMA DE MANEJO
VISTA EXPLOSIONADA

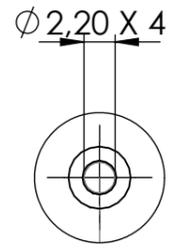
AUTOR:
EDGAR MAURICIO MORANTES RODRIGUEZ

REVISAR:

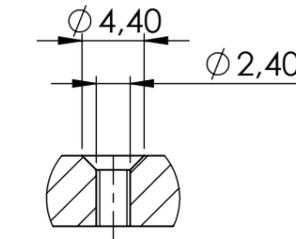
HOJA 19/24



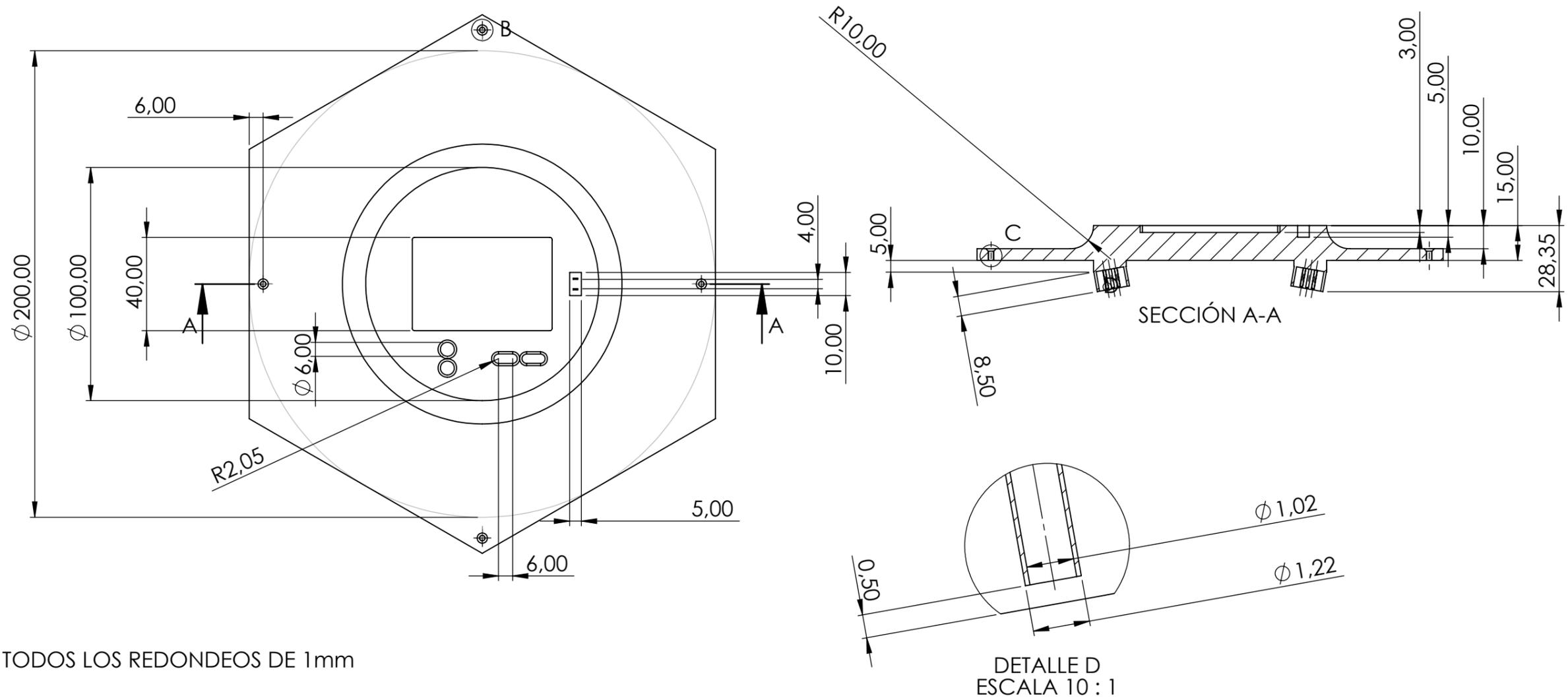
ESCALA 1:5



DETALLE B
ESCALA 2:1



DETALLE C
ESCALA 2:1



NOTA: TODOS LOS REDONDEOS DE 1mm

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN:

Se obtiene por medio de moldeo por inyección de plásticos



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 29/07/2022

ESCALA: 1:2

UNIDADES: mm

A3

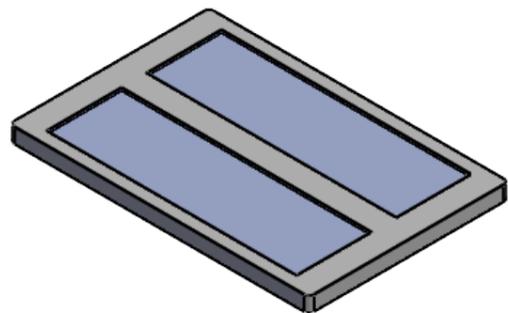


TÍTULO: PIEZA SUBSISTEMA DE MANEJO
CÓDIGO DE PIEZA: 5.2- TAPA

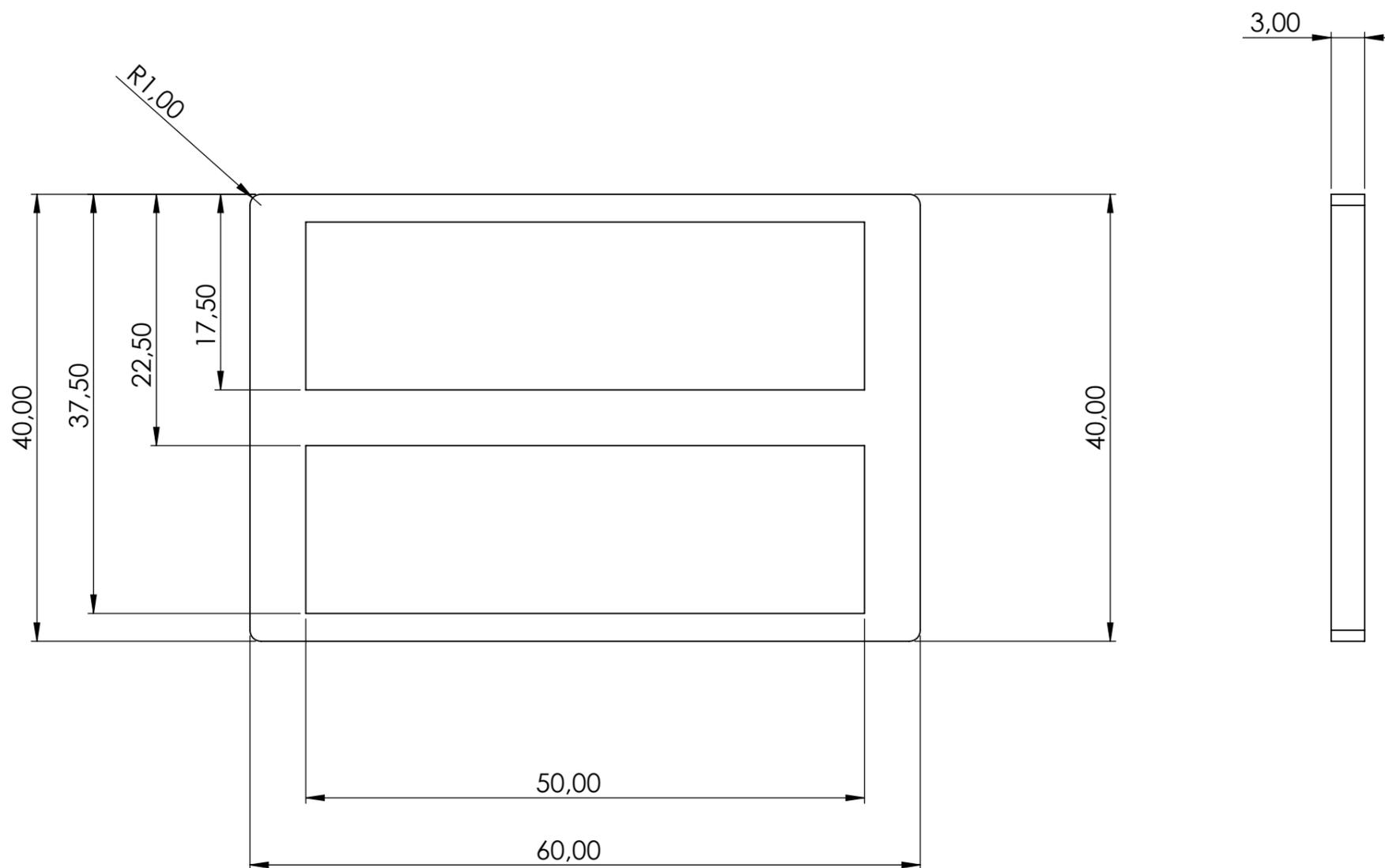
AUTOR: EDGAR MAURICIO MORANTES RODRIGUEZ

REVISAR:

HOJA 21/24



ESCALA 1:1



DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN:

Se obtiene con moldeo por inyección de plástico.



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 29/07/2022

ESCALA: 2:1

UNIDADES: mm

A3



TITULO:

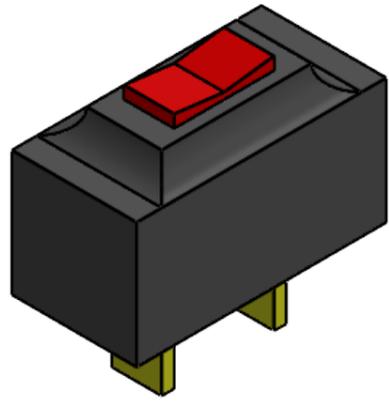
PIEZA SUBSISTEMA DE MANEJO
CÓDIGO DE PIEZA: 5.3- INTERFAZ

AUTOR:

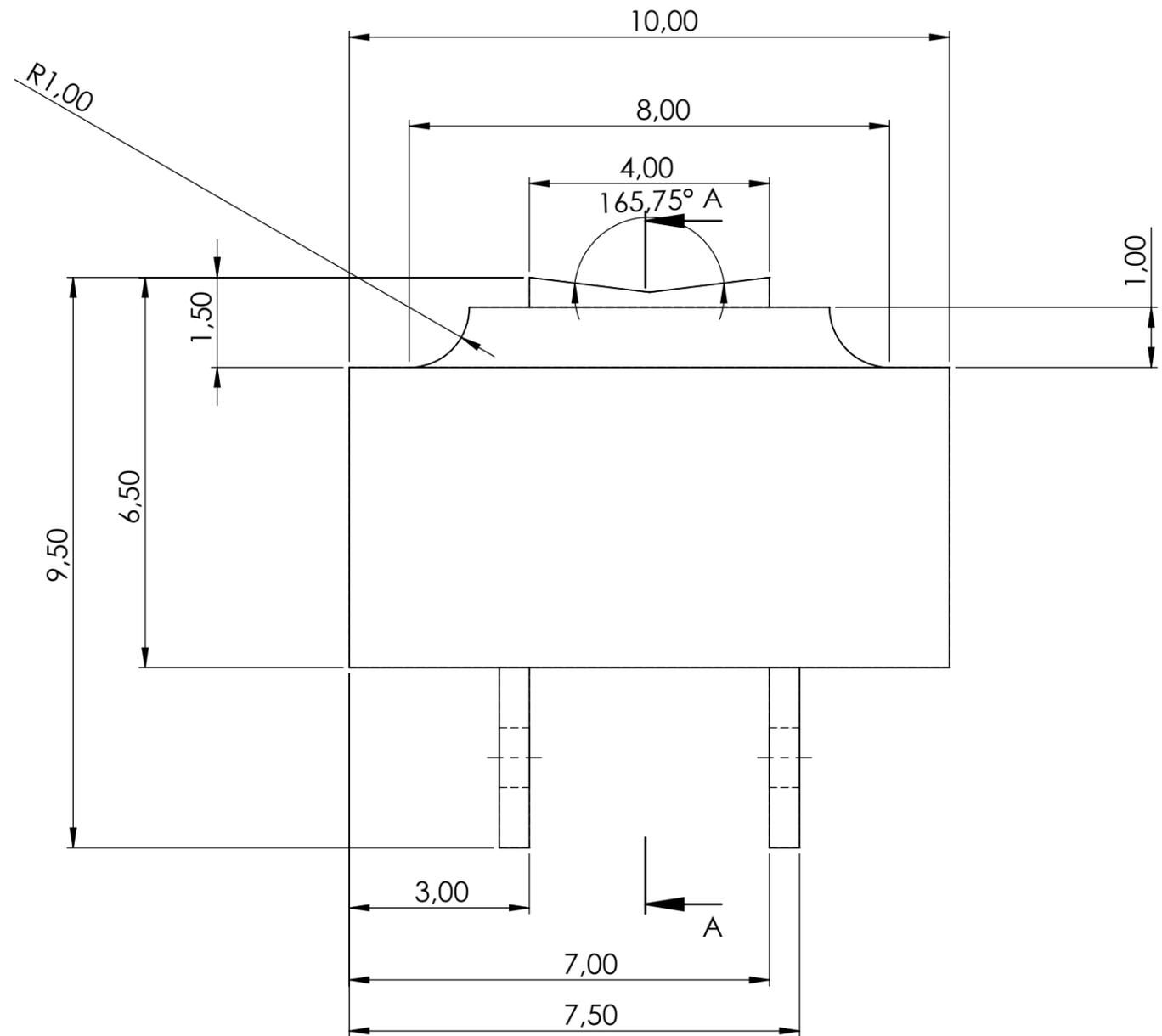
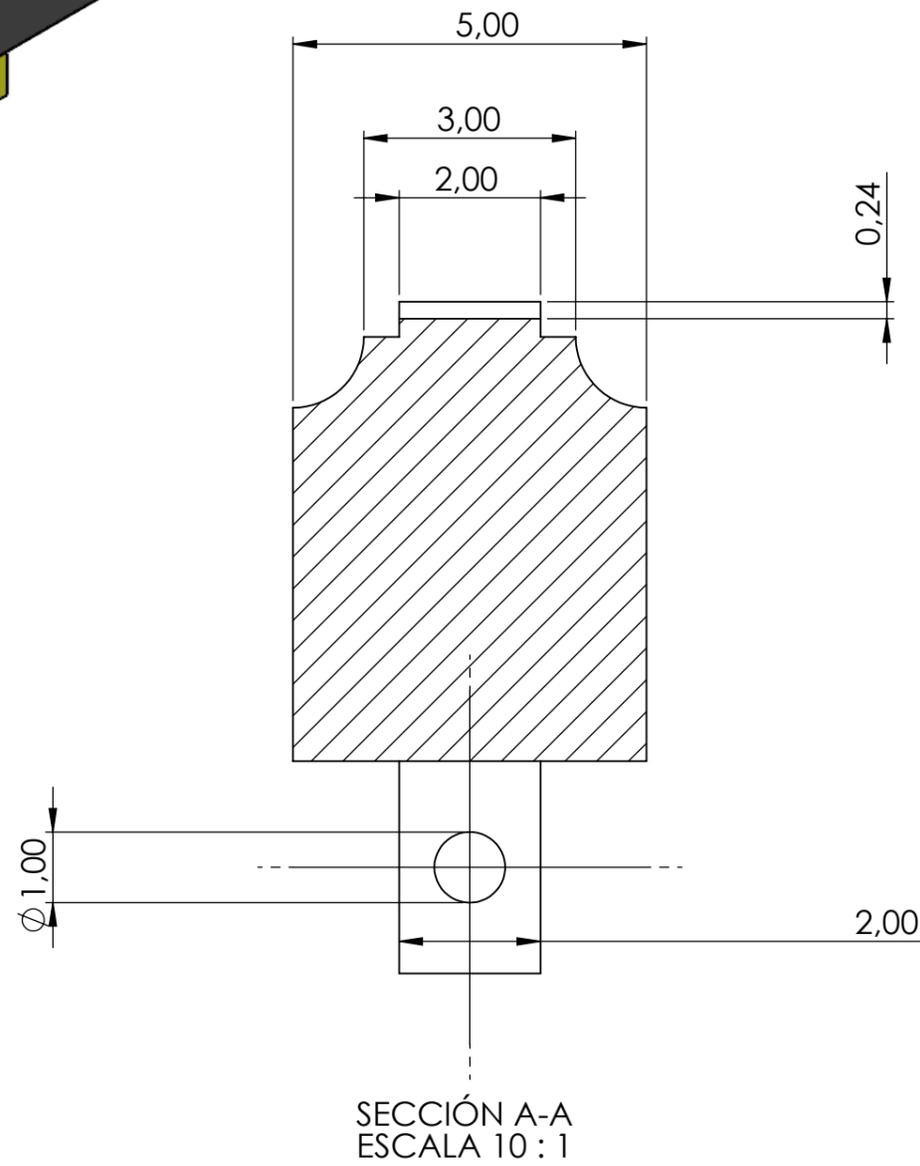
EDGAR MAURICIO MORANTES RODRIGUEZ

REVISAR:

HOJA 22/24



ESCALA 5:1



DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN:

Se obtiene a partir de moldeo por inyección de plásticos



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 29/07/2022

ESCALA: 10:1

UNIDADES: mm

A3

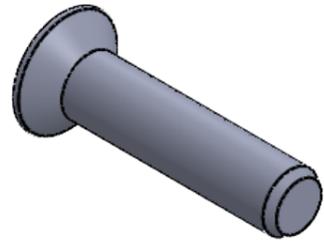


TÍTULO: PIEZA SUBSISTEMA DE MANEJO
CÓDIGO DE PIEZA: 5.4 - INTERRUPTOR

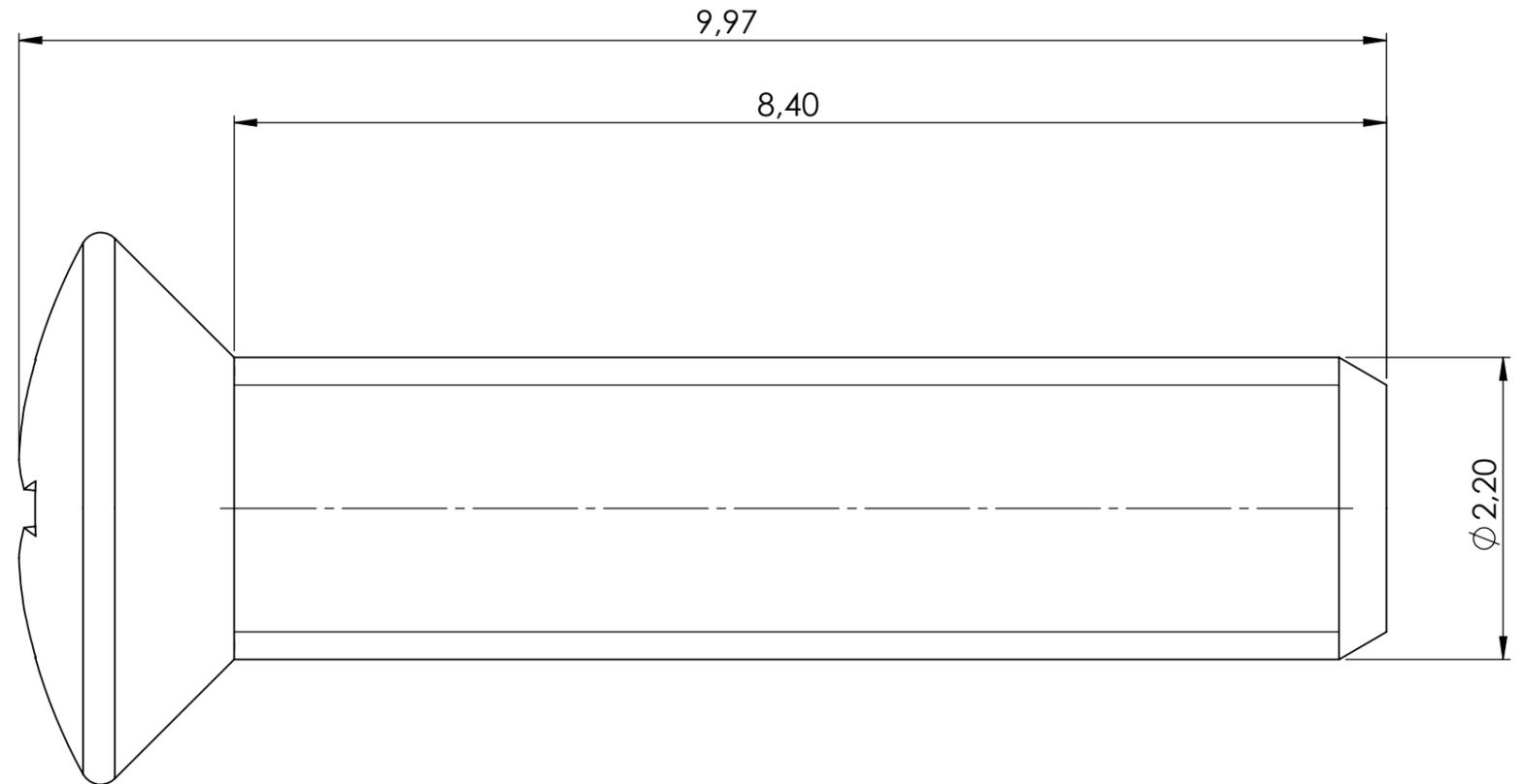
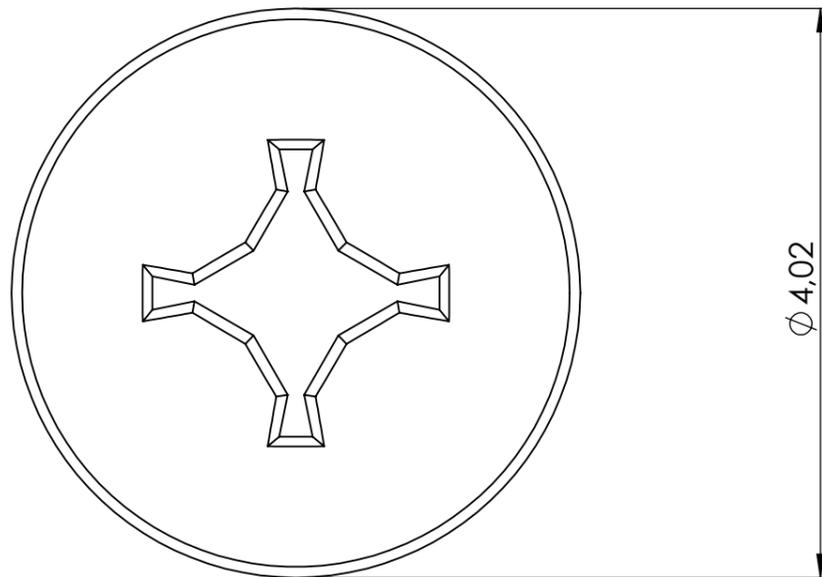
AUTOR: EDGAR MAURICIO MORANTES RODRIGUEZ

REVISAR:

HOJA 23/24



ESCALA 5:1



NOTA: TORNILLO AUTORROSCANTE SEGÚN NORMA
DIN 7051 M 2.2 X 8.4

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN:

Se obtiene a partir de fundición con troquel, para obtener las formas deseadas y finalmente por medio de un proceso de maquinado de torneado se obtienen las ranuras del tornillo según sea el paso deseado.



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE
SANTANDER**

FECHA: 29/07/2022

ESCALA: 20:1

UNIDADES: mm

A3



TITULO:
PIEZA SUBSISTEMA DE MANEJO
CÓDIGO DE PIEZA: 5.5- TORNILLO AUTORROSCANTE

AUTOR:
EDGAR MAURICIO MORANTES RODRIGUEZ

REVISAR:

HOJA 24/24