



Universidad
de Cádiz

Escuela Superior
de Ingeniería

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TEST DE COLECTORES DEL TB2S EN EL
TRACKER EXTERNO DEL COMPACT MUON
SOLENOID (CMS) PARA LA ORGANIZACIÓN
EUROPEA PARA LA INVESTIGACIÓN
NUCLEAR (CERN)

DIRECTOR: ENRIQUE ÁNGEL RODRÍGUEZ JARA

CODIRECTOR: DANIEL CASTRO MEDINA

AUTOR: FERNANDO PEREA ALBELA

Cádiz, mayo 2023

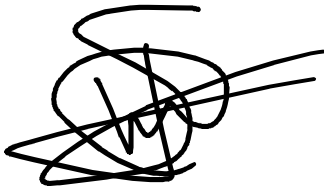
DECLARACIÓN PERSONAL DE AUTORIA

Fernando Perea Albela con DNI 44068405Z, estudiante del Máster en Ingeniería Industrial en la Escuela Superior de Ingeniería de la Universidad de Cádiz, como autor de este documento académico titulado: Test de colectores del TB2S en el Tracker externo del Compact Muon Solenoid (CMS) para la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN) y presentado como Trabajo Final de Máster

DECLARO QUE

Es un trabajo original, que no copio ni utilizo parte de obra alguna sin mencionar de forma clara y precisa su origen tanto en el cuerpo del texto como en su bibliografía y que no empleo datos de terceros sin la debida autorización, de acuerdo con la legislación vigente. Asimismo, declaro que soy plenamente consciente de que no respetar esta obligación podrá implicar la aplicación de sanciones académicas, sin perjuicio de otras actuaciones que pudieran iniciarse.

En Puerto Real, a 4 de mayo de 2023

A handwritten signature in black ink, consisting of a stylized 'F' and 'P' intertwined, with a horizontal line extending to the right.

Fdo: Fernando Perea Albela

Índice

Abstract	3
Agradecimientos	4
1. Introducción.....	5
1.1. Antecedentes.....	5
1.1.1. CERN.....	5
1.1.2. Large Hadron Collider (LHC).....	9
1.1.3. High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC).....	11
1.1.4. Compact Muon Solenoid (CMS).....	11
1.2. Marco teórico.....	13
2. Objetivos.....	15
2.1. Objetivos generales.....	15
2.2. Objetivos específicos	15
3. Metodología	16
3.1. Colector de entrada	19
3.2. Colector de salida	37
3.3. Evaporadores	40
3.4. Tubos de conexión.....	43
3.5. Pruebas de fugas de los subconjuntos.....	47
3.6. Pruebas de alta presión de los subconjuntos	52
3.7. Ensamblaje	55
3.8. Prueba de fugas del conjunto final.....	68
3.9. Instrumentación y toma de medidas	71
4. Resultados.....	74
4.1. Objetivos específicos de fabricación	74
4.1.1. Prueba de fugas de helio de los subconjuntos	74
4.1.2. Prueba de fugas de alta presión de los subconjuntos	76
4.1.3. Prueba de fugas de helio del conjunto experimental	78
4.1.4. Prueba de fugas de CO ₂ del conjunto experimental.....	79
4.1.5. Prueba de fugas de alta presión del conjunto experimental	79
4.2. Objetivos específicos térmicos.....	79
4.2.1. Caída de presión entre entrada y colector de salida.....	79
4.2.2. Título de vapor al comienzo del evaporador.....	82
4.2.3. Título de vapor máximo al final del evaporador	83

4.2.4.	Caída de presión en capilares	86
4.2.5.	Caída de presión en el evaporador y en la línea de retorno al colector	87
5.	Discusión y conclusiones.....	89
6.	Referencias	92
7.	Anexos.....	94
7.1.	Anexo A: Planos.....	94
7.2.	Anexo B: Informe del test de capilares.....	95
7.3.	Anexo C: Procedimiento para el doblado de tubos	96
7.4.	Anexo D: Procedimiento para la soldadura blanda	97
7.5.	Anexo E: Reportes de pruebas de alta presión.....	98

Abstract

El Gran Colisionador de Hadrones (LHC) es el acelerador de partículas más potente e importante en el mundo. En él se aceleran protones e iones hasta velocidades cercanas a la de la luz, para luego hacerlas colisionar y recrear las condiciones existentes segundos después del Big Bang. Esas condiciones son visibles gracias a detectores como el Compact Muon Solenoid (CMS) en la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN).

El objetivo de este proyecto es verificar los procesos de producción y los requisitos de refrigeración del Tracker Barrel de módulos 2S del Tracker Externo en el detector de partículas CMS del CERN.

Para ello se ha producido una maqueta del sistema de refrigeración a escala 1:1 siguiendo los mismos métodos que se utilizarán durante la producción real del detector. Se han verificado satisfactoriamente los procesos de producción mediante prueba de fugas y resistencia, y los requisitos de refrigeración con los datos tomados al circular CO₂ por el conjunto experimental en las mismas condiciones de operación que en la realidad.

The Large Hadron Collider (LHC) is the most powerful and important particle accelerator in the world. In it, protons and ions are accelerated to close to the speed of light, then they collide so that the conditions existing seconds after the Big Bang are recreated. These conditions are visible thanks to detectors such as the Compact Muon Solenoid (CMS) in the European Organization for Nuclear Research (CERN).

The main objective of this project is the verification of the production processes and refrigeration requirements of the Tracker Barrel of 2S modules of the External Tracker in the CMS particle detector of CERN.

To this end, a 1:1 scale mock-up of the refrigeration system has been produced following the same methods that will be used during the actual production of the detector. The production processes have been successfully verified by means of leak and proof tests, and the refrigeration requirements with the data taken when CO₂ circulates through the experimental set in the same operation conditions as in reality.

Agradecimientos

Quiero agradecer a mis padres por todo el apoyo que me han brindado. Gracias por darme la oportunidad de llegar hasta aquí. Sin vosotros no habría sido posible. Os debo todo.

Gracias a María y Juanlu por estar siempre ahí, y ser unos apoyos inmejorables. Habría sido mucho más difícil de no haber sido por vosotros, hermanos.

Gracias Rebe, por haber aparecido en mi vida, y por ayudarme a conseguirlo.

Quiero también agradecer a mis amigos de Chiclana, Ginebra, y otras partes del mundo por haber estado conmigo durante todo el proceso.

I also want to thank CERN (and particularly Thomas French and Antti Onnela) for giving me the opportunity of being part of such a great project and organization.

Thanks to all my colleagues involved in the TB2S and TBPS project for their support.

1. Introducción

1.1. Antecedentes

1.1.1. CERN

La Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN) es una organización internacional de investigación que opera el laboratorio de física de partículas más grande del mundo.

Al final de la Segunda Guerra Mundial, la ciencia europea ya no era de clase mundial. Siguiendo el ejemplo de las organizaciones internacionales, un grupo de científicos visionarios imaginó la creación de un laboratorio europeo de física atómica. Raoul Dautry, Pierre Auger y Lew Kowarski en Francia, Edoardo Amaldi en Italia y Niels Bohr en Dinamarca fueron algunos de estos pioneros.

El físico francés Louis de Broglie presentó la primera propuesta oficial para la creación de un laboratorio europeo en la Conferencia Cultural Europea, que se inauguró en Lausana el 9 de diciembre de 1949.

En una reunión intergubernamental de la UNESCO en París en diciembre de 1951, se adoptó el establecimiento de un Consejo Europeo de Investigación Nuclear. Dos meses después, 11 países firmaron un acuerdo por el que se establecía el consejo provisional. En aquel momento nació el acrónimo CERN.

Ginebra fue seleccionada como sede del Laboratorio del CERN en la tercera sesión del consejo provisional en 1952.

El Sincrociclotrón (SC) de 600 MeV, construido en 1957, fue el primer acelerador del CERN. Proporcionó haces para los primeros experimentos del CERN en física nuclear y de partículas.



Figura 1. Montaje del Sincrociclotrón (SC).^[1]

El sincrotrón de protones (PS) consiguió acelerar protones por primera vez el 24 de noviembre de 1959, convirtiéndose durante un breve período en el acelerador de partículas de mayor energía del mundo. Con una energía de haz de 28 GeV, el PS se convirtió en el anfitrión del programa de física de partículas del CERN y proporciona haces de partículas para experimentos hasta hoy día.



Figura 2. Sincrotrón de protones (PS).^[2]

En la década de 1960, la detección en física de partículas consistía principalmente en examinar millones de fotografías de cámaras de burbujas o cámaras de chispas. Esto era un procedimiento lento, laborioso e inadecuado para estudios de fenómenos raros. Sin embargo, se produjo una revolución con los amplificadores de transistores. Mientras que una cámara puede detectar una chispa, un cable detector conectado a un amplificador puede detectar un efecto mucho menor.

En 1968, Georges Charpak desarrolló la “cámara proporcional de multihilos”, una caja llena de gas con una gran cantidad de cables detectores paralelos, cada uno conectado a amplificadores individuales.

Esto, conectado a un ordenador, podía lograr una tasa de conteo mil veces mejor que los detectores existentes.

La invención revolucionó la detección de partículas, que pasó de la era manual a la electrónica.

Charpak, que se incorporó al CERN en 1959, recibió el premio Nobel de física en 1992 "por su invención y desarrollo de detectores de partículas, en particular la cámara proporcional de multihilos".

Hoy en día, prácticamente todos los experimentos de física de partículas utilizan algún detector de pistas basado en el principio de la cámara proporcional de multihilos. En la siguiente imagen tenemos un módulo de detección de partículas real del TB2S.

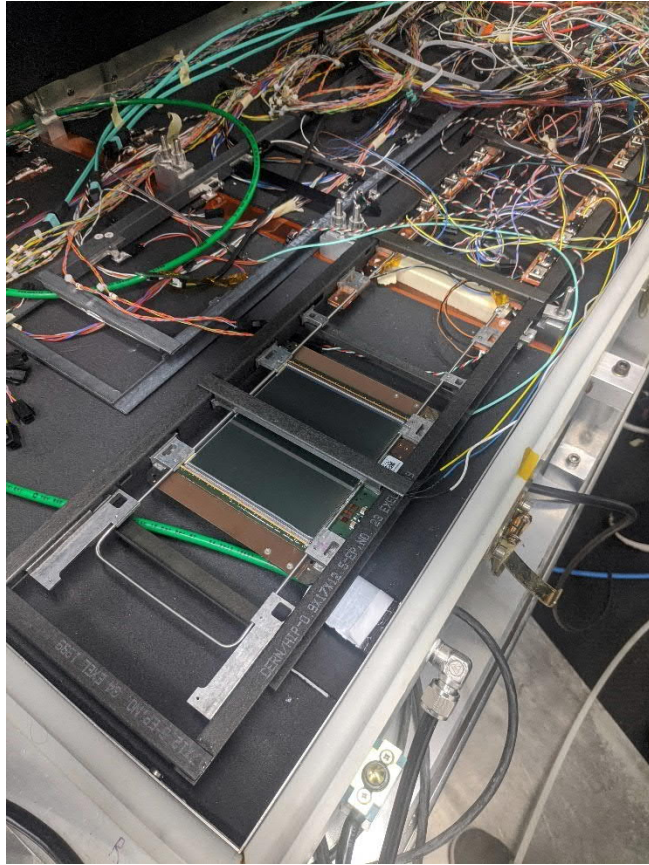


Figura 3. Módulo de detección de partículas.

El Super Proton Synchrotron (SPS) se convirtió en el caballo de batalla del programa de física de partículas del CERN cuando comenzó a funcionar en 1976. El primer haz de protones circuló los 7 kilómetros completos del acelerador el 3 de mayo de 1976. La investigación que utilizó haces del SPS exploró la estructura interna de los protones, investigando la preferencia de la naturaleza por la materia sobre la antimateria, ha buscado como podría haber sido la materia en los primeros instantes del universo y ha buscado formas exóticas de materia. Un punto culminante se produjo en 1983 con el descubrimiento, ganador del premio Nobel, de las partículas W y Z, con el SPS funcionando como un colisionador protón-antiprotón.

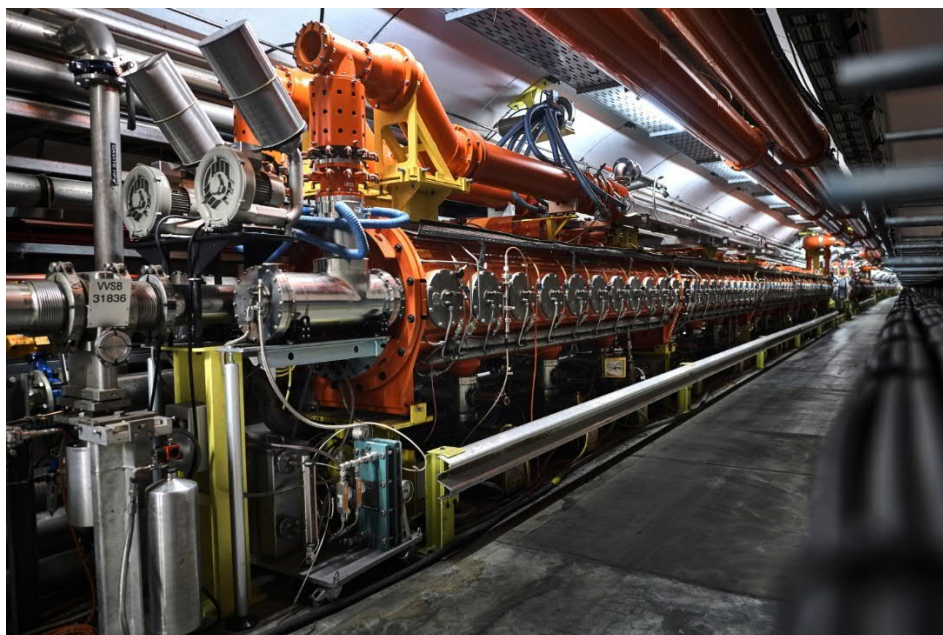


Figura 4. Super Proton Synchrotron (SPS).^[3]

El Gran Colisionador de Electrones y Positrones (Large Electron-Positron/LEP) fue, y aún es, el acelerador electrón-positrón más grande jamás construido. El LEP se formaba por 5176 imanes y 128 cavidades aceleradoras. En él se colisionaban partículas dentro de los cuatro detectores existentes (ALEPH, DELPHI, L3 y OPAL). Los detectores actúan como cámaras donde se registran todas las colisiones para su posterior estudio.

Durante 11 años, el LEP y sus experimentos produjeron grandes avances en el entendimiento del Modelo electrodébil basados en fundamentos experimentales. Las mediciones llevadas a cabo permitieron conocer la masa del Bosón Z y W, confirmando de esa forma el Modelo propuesto anteriormente con el descubrimiento de estas partículas en el anterior SPS.



Figura 5. Gran Colisionador de Electrones y Positrones (LEP).^[4]

En los años 1997 y 1998, los proyectos de los cuatro nuevos experimentos (ATLAS, CMS, ALICE, LHCb) son aprobados oficialmente. De esta forma en el año 2000, el LEP termina su funcionamiento, para dar paso (aprovechando el túnel de 27 kms. de diámetro que lo alberga) al Gran Colisionador de Hadrones.

1.1.2. Large Hadron Collider (LHC)

El Gran Colisionador de Hadrones (LHC) es el acelerador de partículas más grande y de mayor energía del mundo. El LHC puede acelerar protones e iones pesados, y ha producido colisiones de protones, iones de plomo y protones en iones de plomo (p-p, Pb-Pb y p-Pb).

El LHC es el último acelerador de partículas dentro del esquema siguiente, y está situado en un túnel de 27 kilómetros de circunferencia a una profundidad de más de 100 metros en la frontera franco-suiza cerca de Ginebra.

The CERN accelerator complex *Complexe des accélérateurs du CERN*

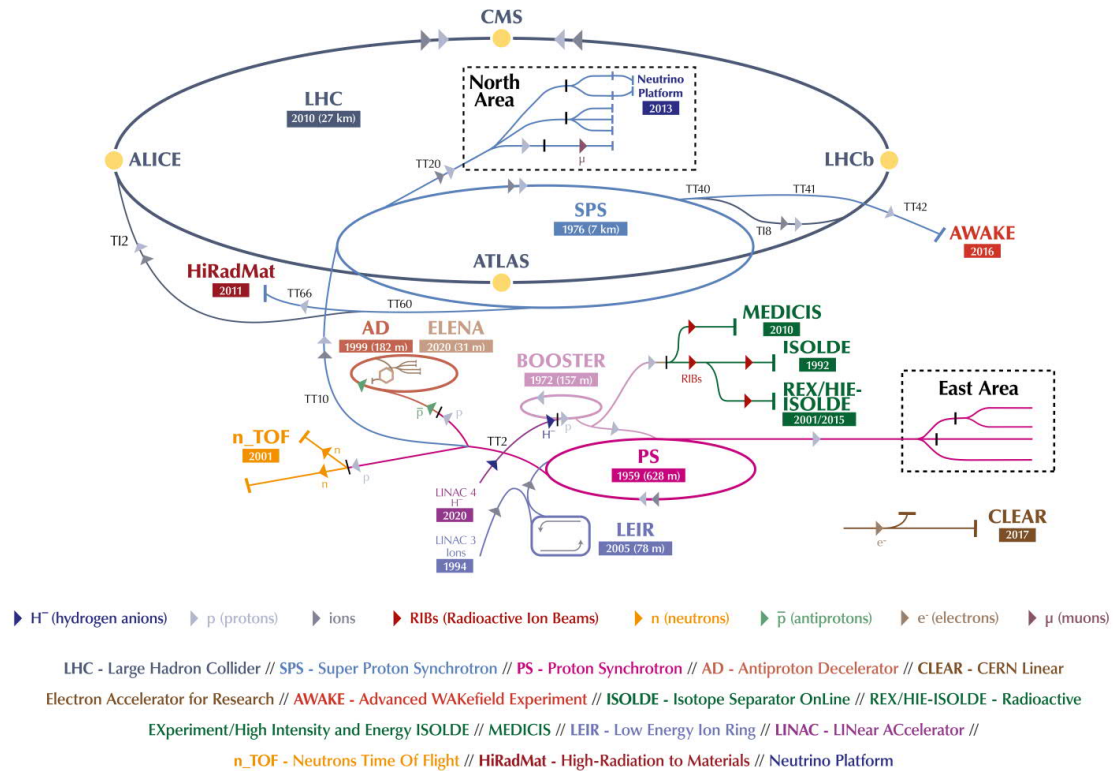


Figura 6. Esquema del LHC y sus detectores.

[5]

Las partículas son inyectadas en el PS, que acelera las partículas hasta el 87% de la velocidad de la luz. De ahí pasan al SPS, donde llegan a alcanzar el 99,97% de la velocidad de la luz. Por último, este haz de partículas se inyecta en el LHC, que permite que el haz circule al 99,9999% de la velocidad de la luz. Este incremento permite una luminosidad mayor y por tanto una creación de partículas como antes no ha existido.

Es conveniente recordar que la base de todo este proyecto proviene de la famosa ecuación descubierta por Albert Einstein: $E=m \cdot c^2$.

En la colisión de partículas se utiliza una cantidad ingente de energía, que provoca la creación de nuevas partículas, por las mejoras en el LHC se realizan con el objetivo de maximizar esa energía (E), para, de esa forma, producir una mayor cantidad de masa (m).

El acelerador comenzó a funcionar en 2009. El periodo de funcionamiento comprendido entre 2010-2012 se llamó Primera Fase Operativa (Run 1). El Run 1 fue seguido por un apagado de dos años, siendo llamado Primer Apagado Prolongado o “Long Shutdown 1 (LS1)”, donde tanto el acelerador como los experimentos fueron consolidados. Esto permitió el comienzo del segundo periodo, de un año, llamado “Run 2” en 2015.

Gracias al excelente rendimiento del LHC, los experimentos (ATLAS, ALICE, CMS y LHCb) han podido lograr una gran cantidad de resultados físicos de vital relevancia, incluyendo el descubrimiento del bosón de Higgs por ATLAS y CMS en 2012, y la

medición de las relaciones de ramificación de las desintegraciones raras de los mesones B_s^0 y B^0 neutros a dos muones por CMS y LHCb, y más recientemente por ATLAS. Se han impuesto límites estrictos a una gran variedad de nuevos modelos físicos. La sección transversal de producción del par de quarks superiores se ha determinado en función de p_T y la masa de los quarks superiores se ha medido con una precisión sin precedentes.

El Segundo Apagado Prolongado o “Long Shutdown 2 (LS2)” estaba programado para el periodo comprendido entre principios de 2019 y finales de 2020, para que a principios del año 2021 se empezara con la Tercera Fase Operativa (Run 3). Debido a la pandemia de Covid-19, los tiempos del proyecto han sido modificados, de forma que este apagado se ha extendido hasta marzo del año 2022, donde se ha comenzado con el Run 3.

El Run 3 se prolongará hasta inicios del año 2025. Mientras tanto, la actualización del LHC será construida para su posterior instalación al final de este Run 3, dando paso al Tercer Apagado Prolongado o “Long Shutdown 3 (LS3)” con una fecha de finalización esperada para mediados del año 2027.

1.1.3. High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC)

La actualización del Gran Colisionador de Hadrones lo convertirá en el Gran Colisionador de Hadrones de Alta Luminosidad.

El ratio de colisiones protón-protón del LHC durante el Run 1 y 2 fue aumentando de forma continua desde los $2.1 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ en 2010 hasta los $1.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ en 2016.

Durante el Long Shutdown 3 el acelerador será actualizado para mejorar su rendimiento hasta el punto de alcanzar una luminosidad máxima de hasta $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, e incluso $7.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

La mejora del HL-LHC será acompañada por otra actualización del experimento CMS, para así mantener el rendimiento del detector y aprovechar el 100% del nuevo acelerador.

1.1.4. Compact Muon Solenoid (CMS)

El experimento Compact Muon Solenoid (CMS) es un detector multipropósito construido para funcionar en el Large Hadron Collider (LHC) del CERN.

En él se producirán colisiones de dos haces de partículas de protones de 7 TeV cada uno, con una luminosidad diseñada de $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

En la siguiente figura se muestra un esquema de conjunto del CMS:

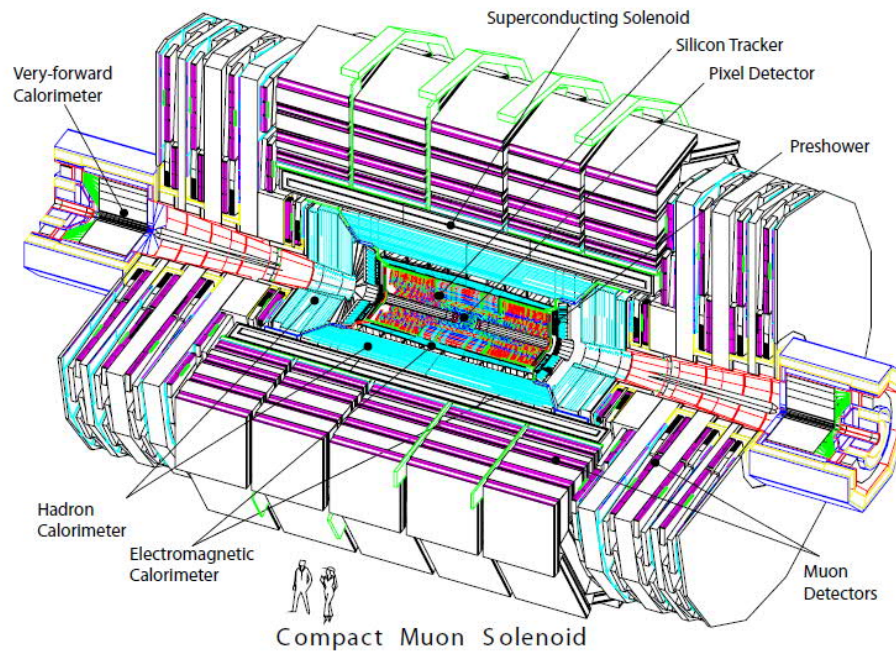


Figura 7. Esquema del CMS.^[6]

En el corazón del CMS se encuentra un solenoide superconductor de 13 metros de largo, 6 metros de diámetro interno y 4 Teslas, capaz de proveer una fuerza de curvatura de 12 Toneladas métricas.

El campo magnético es suficientemente intenso como para saturar 1.5 metros de hierro, permitiendo así integrar 4 detectores de muones que introducen robustez y una cubierta geométrica total.

Cada detector de muones se compone en varias capas de tubos de deriva de aluminio en la región del Barrel y de los cátodos de las cámaras de hilos en los endcaps.

El orificio de la bobina magnética es suficientemente grande como para acomodar en su interior al Tracker Interno y al calorímetro. El volumen del Tracker es el de un cilindro de 5.8 metros de longitud y 2.6 metros de diámetro.

Como se puede ver en la figura anterior, el CMS se compone de varios subdetectores, cada uno focalizado en una tarea concreta.

Este proyecto se enmarca en el Barrel de módulos 2S del Tracker (TB2S), el cual se encuentra en la parte externa de éste. En la siguiente figura se muestra el esquema de un cuarto del Tracker.

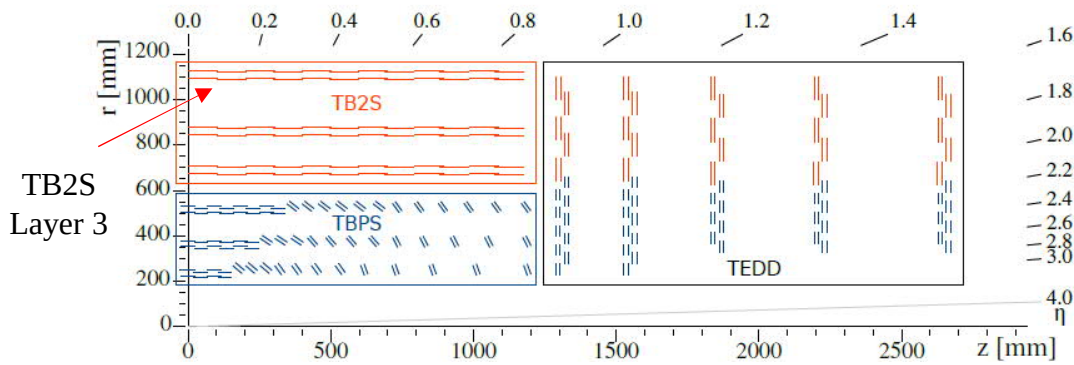


Figura 8. Layout del Tracker Externo.^[7]

La maqueta realizada corresponde al sistema de tuberías completo de la tercera corona circular (Layer) del TB2S (señalada con una flecha roja en la Figura 8).

1.2. Marco teórico

Se espera que la potencia total disipada en Tracker y debido a las pérdidas de calor del entorno sea de unos 100 kW para el Tracker Externo y de unos 50 kW para el Tracker Interno, incluidas las pérdidas en los cables dentro del Tracker y dejando cierto margen.

El sistema de enfriamiento debe eliminar esta carga de calor y mantener los sensores de silicio a una temperatura de -20°C o menor. Para esta tarea, se selecciona CO_2 de dos fases como refrigerante. El sistema de enfriamiento se diseñará para una temperatura nominal de funcionamiento del refrigerante de -35°C , lo que dará como resultado una temperatura del refrigerante de aproximadamente -33°C al comienzo del primer módulo de silicio, que es el punto de mayor temperatura a lo largo de un circuito de enfriamiento.

Al igual que en la actualización de la Fase 1 del Pixel en CMS, el enfriamiento del Tracker la Fase 2 se realizará con un ciclo líquido de CO_2 evaporativo. Un sistema de refrigeración común está diseñado para servir tanto al Tracker Externo como al Tracker Interno. Las propiedades líquidas del CO_2 lo convierten en un medio ideal para enfriar detectores de partículas, concretamente por la ventaja que proporciona usar tubos de menor diámetro y menor masa que los requeridos con refrigerantes convencionales.

La razón principal de esto es que el CO_2 se evapora a presiones más altas que los refrigerantes normales. La alta presión mantiene los vapores comprimidos y, por lo tanto, el volumen del circuito bajo. La temperatura de ebullición es una función de la presión y, dado que la caída de presión dinámica a lo largo de una tubería de enfriamiento puede mantenerse pequeña en comparación con la alta presión absoluta del fluido, el cambio en la temperatura de evaporación a lo largo de una tubería de enfriamiento suele ser relativamente pequeño: dos grados entre la temperatura del refrigerante de entrada y salida es el objetivo para el diseño de la tubería del Tracker.

El uso del CO_2 en el detector CMS es bastante novedoso. La primera implementación a gran escala data del 2016 al darse en la Fase 1 del Pixel.

Por este motivo, se considera necesario evaluar su funcionalidad en la geometría propuesta del Outer Tracker para validar la compatibilidad con las restricciones térmicas y geométricas esperadas.

Además, se investiga el uso de un precalentador (o preheater), con el objetivo de reducir el subenfriamiento y crear burbujas en el flujo para iniciar una inestabilidad, y así evitar el sobrecalentamiento.

El sistema de enfriamiento de CO₂ en el Tracker tendrá la temperatura controlada por un acumulador (punto 6 en la Figura 9) que establece la presión del fluido bifásico en la línea de retorno (5-6).

El acumulador está configurado para alcanzar una temperatura de salida de -35°C en la salida del detector (5). El fluido luego pasa a través de un compresor, condensador (6-7) y bomba (7-1).

El flujo de retorno (5-6) establece la temperatura del flujo de entrada a medida que pasa por el anillo exterior de una línea de transferencia coaxial con el flujo de suministro en el centro (1-2). Se usa una gran caída de presión a través de un capilar (2-3) para equilibrar el flujo entre múltiples circuitos de enfriamiento en el mismo colector.

Debido a que la entrada está ajustada a casi la misma temperatura que la salida por la línea de transferencia coaxial, llega a la entrada del detector como líquido subenfriado (3). Esto significa que la entalpía del fluido (y por lo tanto su temperatura, ya que es completamente líquido) debe aumentarse para llevar el fluido a condiciones de saturación (3-4).

El fluido a través del circuito detector (4-5) toma el calor de los módulos y aumenta la entalpía hasta una calidad de vapor de aproximadamente un 30%.

Aunque en un tubo perfectamente liso la temperatura permanecería constante a través del detector a medida que se produce la evaporación, la temperatura en realidad disminuye ligeramente debido a las pérdidas de presión en la tubería.

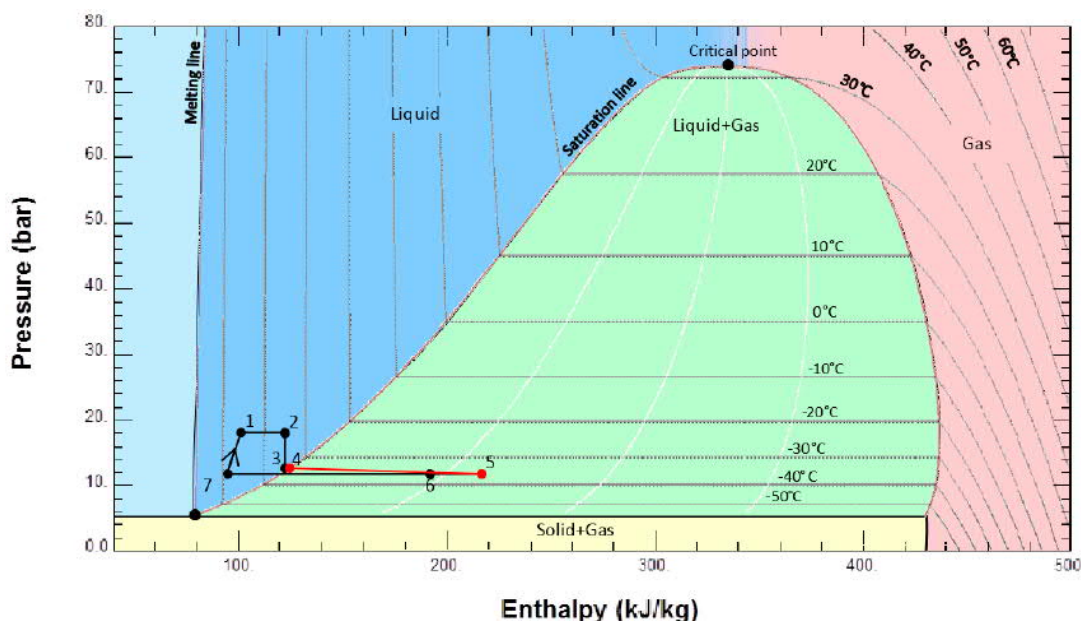


Figura 9. Ciclo térmico de funcionamiento del Layer 3 del TB2S.^[8]

2. Objetivos

2.1. Objetivos generales

El presente TFM se realizará en el detector Compact Muon Solenoid (CMS) en las instalaciones de la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN) en Meyrin (Ginebra). CMS es uno de los 4 experimentos principales del Gran Colisionador de Partículas (LHC). CMS actúa como una gran cámara de alta velocidad, tomando fotografías 3D de las colisiones de partículas que se producen en él. Es uno de los experimentos más importantes de la física de partículas, teniendo, por ejemplo, un papel fundamental en el descubrimiento del Bosón de Higgs.

Actualmente se está implementando el proyecto para convertir el LHC (Gran Colisionador de Hadrones) en el HL-LHC (Gran Colisionador de Hadrones de Alta Luminosidad) para incrementar su luminosidad, y así poder estudiar nuevas partículas en profundidad como el Bosón de Higgs. En este marco de actualización se encuentra la mejora del CMS a su Fase 2, y con ello también la de este proyecto de TFM.

El objetivo general de este proyecto es realizar el diseño, fabricación de un conjunto experimental para llevar a cabo el último test de los colectores del Tracker Barrel de módulos 2S en el Tracker Externo del detector CMS, de vital importancia para el correcto funcionamiento del mismo.

2.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos de este Trabajo Fin de Máster son:

- Conocer si el Layer 3 del Tracker Barrel de módulos 2S del Tracker Externo del detector Compact Muon Solenoid (CMS) cumple con los requisitos de refrigeración necesarios para la operación del detector CMS en el Acelerador de Partículas (LHC). Estos objetivos podrían resumirse en la siguiente tabla:

	Especificación	Objetivo
1.1	Caída de presión entre entrada y colector de salida.	10 bares a flujo nominal
1.2	Título de vapor al comienzo del evaporador.	$0 < x < 0.03$
1.3	Título de vapor máximo al final del evaporador.	0.57 a +15°C y 0.32 a -35°C
1.4	Caída de presión en capilares.	$8 \text{ bar} < \Delta p < 10 \text{ bar}$
1.5	Caída de presión en el evaporador y en la línea de retorno al colector.	$\Delta p \leq 2 \text{ bar (4.7 °C)}$

Tabla 1. Objetivos térmicos específicos del presente TFM.

- Conocer si los procesos de fabricación implicados en el sistema de refrigeración del Layer 3 del Tracker Barrel de módulos 2S del Tracker Externo del Compact

Muon Solenoid cumple con los requisitos mecánicos y térmicos para la operación del detector CMS en el Acelerador de Partículas (LHC).

	Especificación	Objetivo
1.1	Prueba de fuga de helio de los diferentes subgrupos.	Estos tests se considerarán aptos si no existe una fuga detectable.
1.2	Prueba de fuga a alta presión de los diferentes subgrupos.	
1.3	Prueba de fuga de helio del conjunto experimental completo.	
1.4	Prueba de fuga de CO ₂ del conjunto experimental completo.	
1.5	Prueba de fuga a alta presión del conjunto experimental completo.	

Tabla 2. Objetivos específicos de fabricación del presente TFM.

3. Metodología

Para lograr el objetivo general del proyecto, se planea realizar una maqueta de todo el sistema de tuberías a escala 1:1.

Este sistema de tuberías se instala en una caja experimental de espuma aislante, para evitar cualquier tipo de contaminación térmica.

Se seguirán los procesos de fabricación reales para así asegurar los requerimientos de estanqueidad de todas las tuberías y uniones.

En el conjunto experimental se reproducirán las condiciones reales de potencia, caudales, presiones, etc. De esta forma, las medidas tomadas en el experimento servirán para predecir los valores que se encontrarán en el detector durante la operación real del mismo.

Para conseguir los objetivos específicos de fabricación, se realizan test de fugas con distintos métodos, para verificar que los procesos de fabricación cumplen con las condiciones reales de funcionamiento.

A continuación, para la consecución de los objetivos específicos de refrigeración, el conjunto experimental dispone de varios sensores de presión y temperatura, permitiendo de esta forma saber el estado del CO₂ en los puntos claves.

El diseño real del Layer 3, como puede observarse en la siguiente imagen, complica en demasía una reproducción 100% fiel del sistema de tuberías.

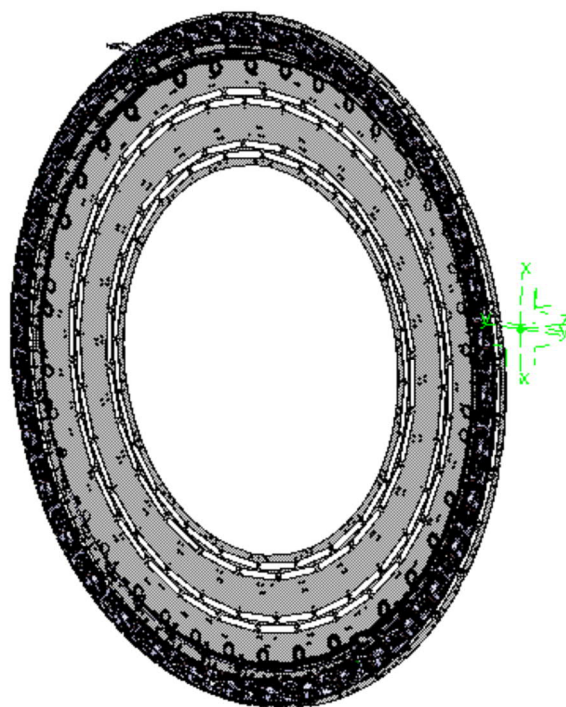


Figura 10. Modelo del sistema de tuberías Layer 3 del T2BS externo. ^[9]

Para superar este primer obstáculo, se diseña el sistema de tuberías de una forma más compacta, respetando todas las longitudes de los diferentes tramos.

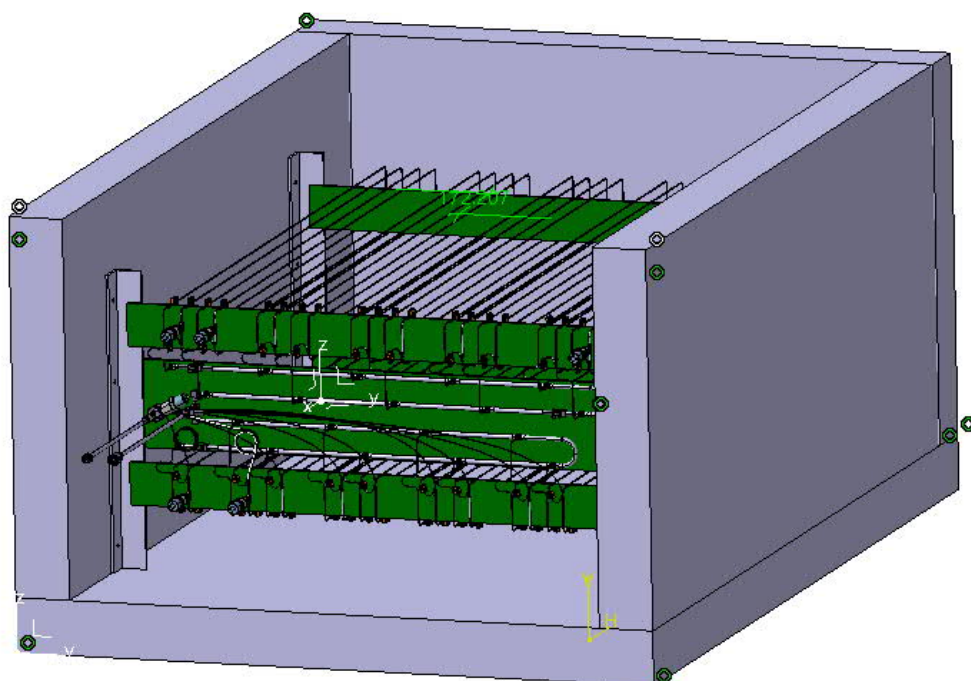


Figura 11. Modelo del test de colectores del Layer 3 del TB2S.

La circunferencia del Layer 3 se compone de diecinueve barreras de módulos para la detección de partículas. Éstos están colocados de forma que se cubren la totalidad de la

pared lateral del cilindro. Cada una de estas diecinueve barreras de módulos está refrigerada, por lo que nos encontramos con un sistema de diecinueve ciclos en paralelo.

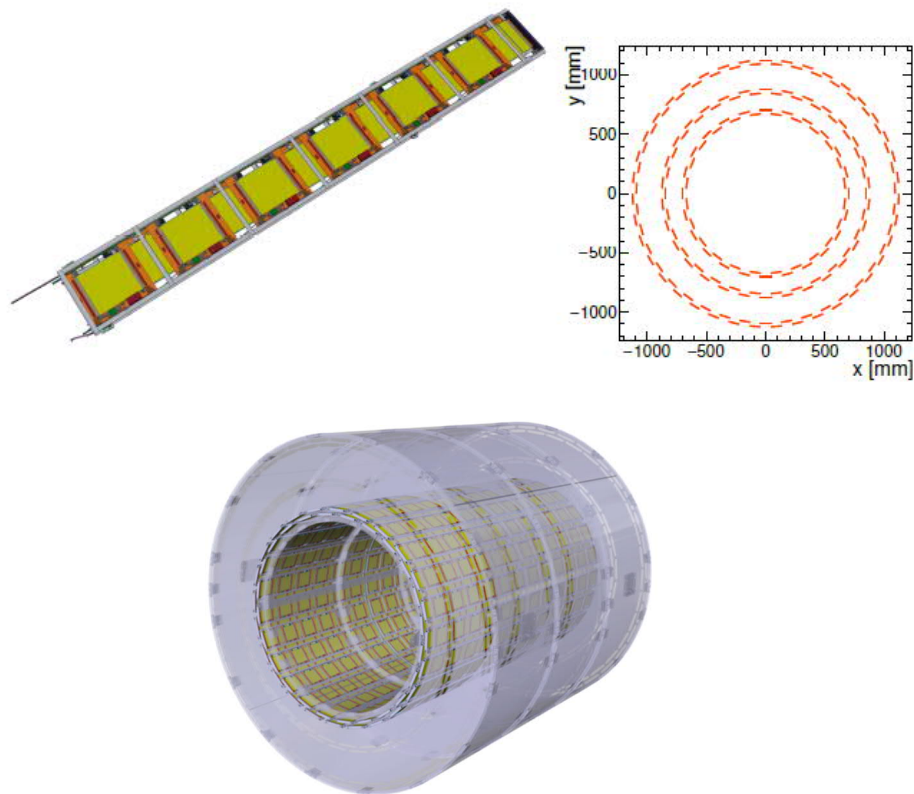


Figura 12. Modelo real del Layer 3 del TB2S.^[7]

En el siguiente esquema podemos observar de una forma más visual de qué partes se compone el conjunto experimental completo, y cómo se relaciona con el ciclo de refrigeración mostrado en la Figura 9.

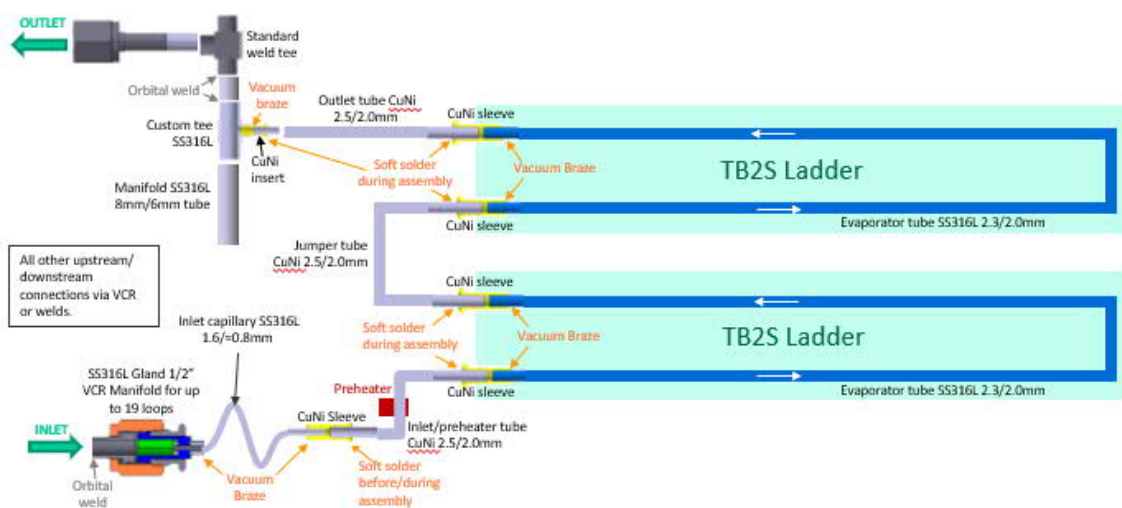


Figura 13. Esquema de un ciclo de refrigeración del Layer 3 del TB2S.^[10]

Este ciclo refrigerante se repite diecinueve veces para conseguir el conjunto experimental definitivo. Se repiten todos los materiales mostrados en la Figura 13, a excepción de los

colectores de entrada y salida, ya que ambos son diseñados para dar servicio a los diecinueve ciclos.

El fluido refrigerante es CO₂ a una temperatura nominal de -35°C. El dióxido de carbono ingresa en el experimento en forma líquida, donde pasa a convertirse en un fluido de dos fases en los evaporadores para continuar en este estado durante el retorno por el colector de salida.

El conjunto de tuberías experimental se ha dividido en tres subconjuntos para facilitar la fabricación, la detección de fallos, y para optimizar el tiempo disponible de los talleres.

Los tres subconjuntos son los siguientes:

- Tubería y colector de entrada con 19 capilares.
- Tubería y colector de salida con 19 conectores en “T”.
- 19 pares de tubos evaporadores.

En la siguiente figura podemos observar los diferentes subgrupos:

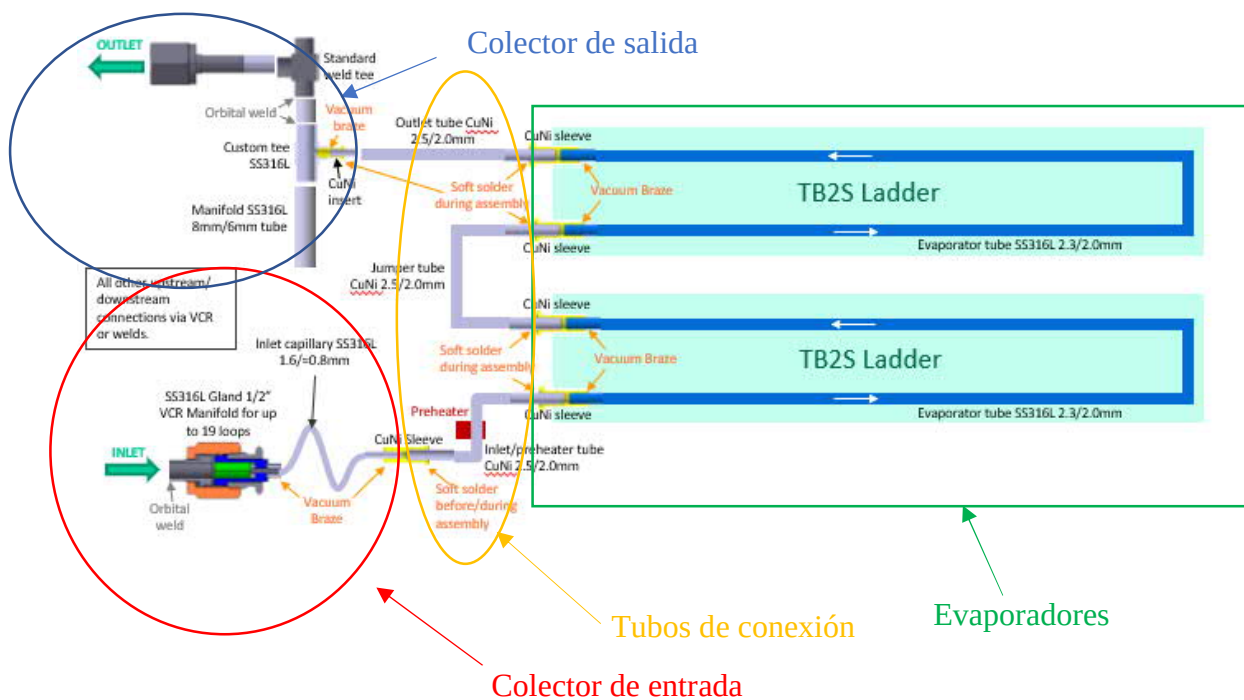


Figura 14. Esquema de los diferentes subconjuntos del experimento.^[10]

Además, se podría considerar una especie de cuarto subconjunto, de menor entidad, compuesto por los tubos que sirven de conexión/unión entre los tres subgrupos principales.

3.1. Colector de entrada

Este primer subconjunto del proyecto se compone de los siguientes materiales:

Cantidad	Ítem	Material
1	Colector de entrada para 19 capilares.	SSL316

19	Capilar de 1,6 mm de diámetro externo (OD) y 0,65 mm diámetro interno (ID).	SSL316
19	Adaptador para capilar de 1,6 mm OD a tubería de 2,5 mm OD	Cobre-Níquel
1	Manguito adaptador de 8mm a ½ pulgada VCR	SSL316
1	Tuerca hembra VCR ½ pulgada	SSL316
1	Manguito adaptador de 8mm a ¼ pulgada VCR	SSL316
1	Tuerca macho VCR ¼ pulgada	SSL316
1	Unión T de soldadura de tubo a tope 8mm OD modelo Swagelok 316L-8MTB7-3	SSL316
1	Tubería de entrada de 8mm OD y 6mm ID de 290mm de longitud	SSL316

Tabla 3. Lista de materiales del subconjunto “Colector de entrada”.

Se muestra en modelo de Catia una vista simplificada del resultado final del subconjunto:

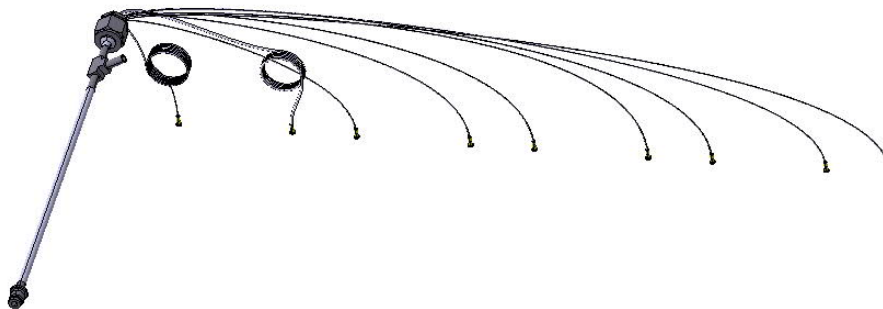


Figura 15. Modelo del subconjunto colector de entrada.

A su vez, este subconjunto se dividió en dos ramas de trabajo independientes una de otra. Por un lado, se trabajó la tubería de entrada, y por otra el colector con los capilares. Esto es debido a los métodos de soldadura utilizados en cada uno de ellos.

En la tubería de entrada se realizaron soldaduras orbitales para la unión de los diferentes componentes. En la siguiente figura pueden verse los diferentes componentes:

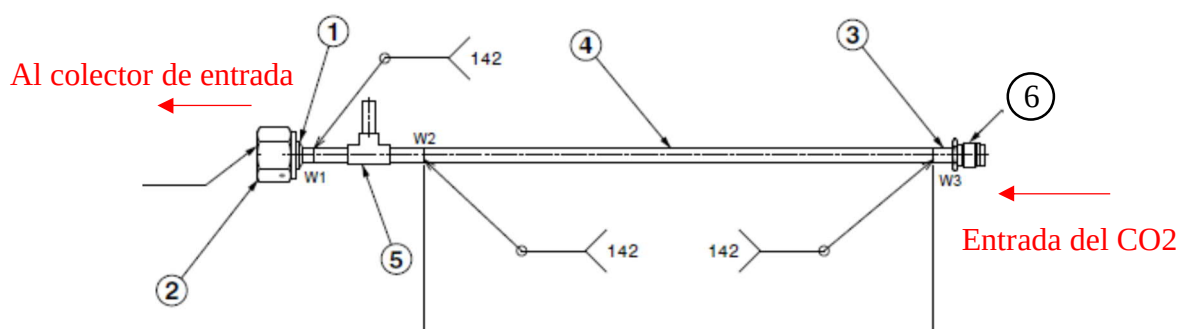
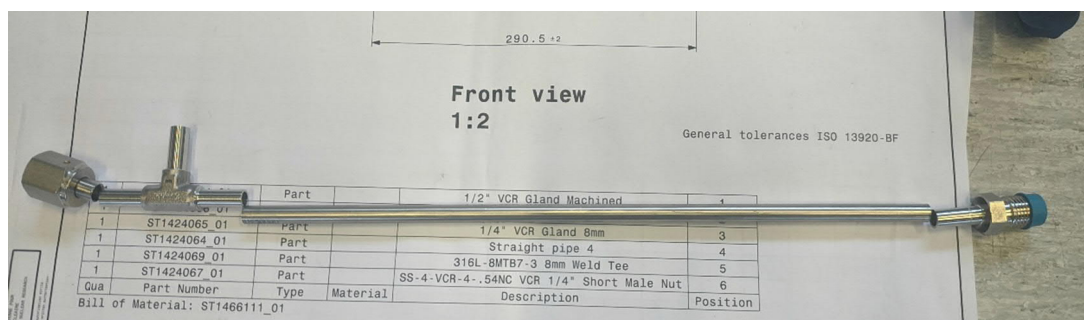


Figura 16. Materiales de la tubería de entrada.

El CERN tiene en su infraestructura diferentes talleres especializados. Este trabajo fue realizado por el taller de soldadura del departamento de Gases de Física Experimental.

N.º	Cantidad	Ítem	Material
1	1	Manguito adaptador de 8mm a ½ pulgada VCR	SSL316
2	1	Tuerca hembra VCR ½ pulgada	SSL316
3	1	Manguito adaptador de 8mm a ¼ pulgada VCR	SSL316
4	1	Tubería de entrada de 8mm OD y 6mm ID de 290mm de longitud	SSL316
5	1	Unión T de soldadura de tubo a tope 8mm OD	SSL316
6	1	Tuerca macho VCR ¼ pulgada	SSL316

Tabla 4. Lista de materiales de la tubería de entrada.

La tubería de entrada es una tubería de 8 milímetros de diámetro externo por 6 milímetros de diámetro interno. Con el objetivo de normalizar los materiales al máximo posible, estos tubos también son los utilizados en el colector de retorno.

En total, se disponía de un lote de tuberías, por lo que la primera tarea fue cortar el tubo a la longitud final. Para ello se utiliza una herramienta como la de la Figura 17.



Figura 17. Herramienta para cortar los tubos.

El resto de los materiales son componentes estándares de la marca Swagelok. Es el principal proveedor del CERN para este tipo de conducciones.

A la entrada de la tubería se coloca una tuerca macho de $\frac{1}{4}$ de pulgada (número 6 de la Figura 16), porque la manguera que conecta con la planta refrigeradora es de $\frac{1}{4}$ de pulgada hembra.

Para soportar la tuerca y asegurar la estanqueidad se debe colocar un manguito adaptador que pase el diámetro de la tubería al de la tuerca (número 3 de la Figura 16).

De la misma forma se procede en el otro extremo de la tubería, con el manguito adaptador y la tuerca hembra de $\frac{1}{2}$ pulgada. Esta tuerca se conecta al colector de entrada, el cual está diseñado en un manguito adaptador de $\frac{1}{2}$ pulgada macho (números 1 y 2 de la Figura 16).

Se instala una unión “T” soldada (número 5 de la Figura 16) justo antes de llegar al colector de entrada, para colocar en ese punto un sensor de presión, ya que eso nos permitirá controlar uno de los puntos clave del experimento (la entrada).

Para la producción de la tubería se requieren tres soldaduras orbitales. Esta soldadura es una soldadura TIG automatizada. En las siguientes imágenes se observa la maquinaria y procedimiento llevado a cabo:



Figura 18. Máquina de soldadura orbital.

En la Figura 18 se observa la máquina de soldadura orbital. Es una Orbimat 165 CA El proceso solo requiere una preparación previa, después de ello, todo es automático.



Figura 19. Alineación de la soldadura orbital.

En la Figura 19 se observa la preparación previa que se requiere para la soldadura orbital. Este proceso es necesario en nuestras soldaduras ya que los componentes Swagelok seleccionados son “microfittings”.

Estos microfittings son muy pequeños, por lo que no se pueden sostener por sí mismo en el cabezal de la máquina de soldadura orbital. Por ese motivo, se deben marcar tres puntos de la soldadura de forma manual antes de proceder con la soldadura orbital. Con estos tres puntos de marcación, se asegura una alineación correcta entre las dos partes soldadas.

A continuación, se coloca el tubo a soldar en el cabezal de la Orbimat como se observa en la Figura 20. Por último, se conectan las mangueras que suministran gas argón para la soldadura TIG.

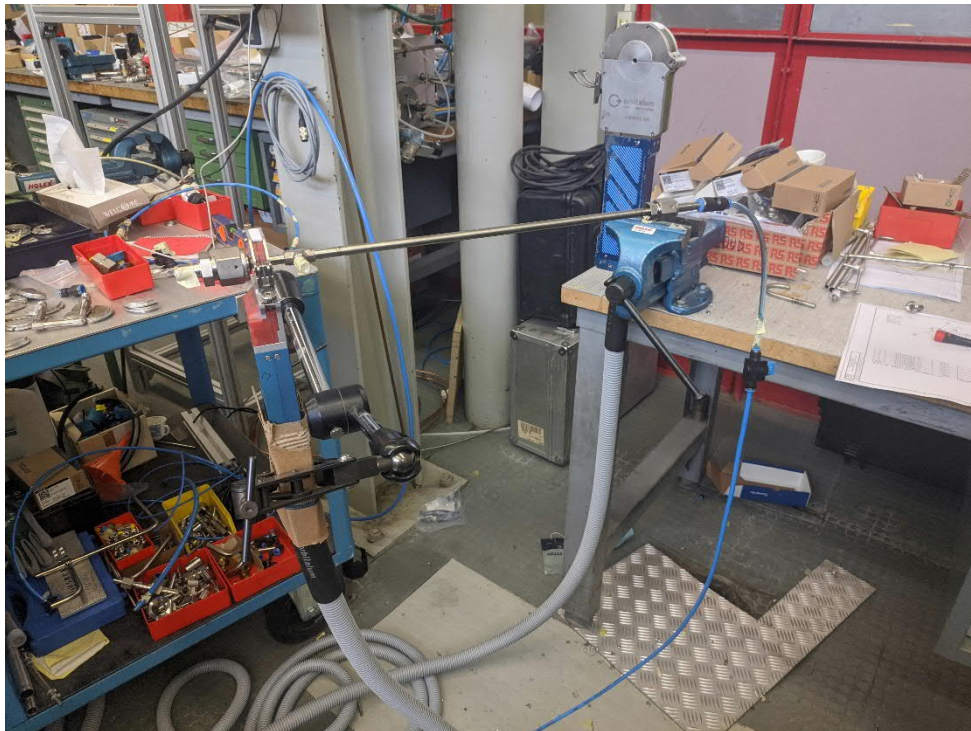


Figura 20. Preparación de la soldadura orbital.

Una de las mangueras que suministra el gas se conecta al cabezal para proteger el electrodo de soldadura. La segunda es conectada al otro extremo de la tubería. De esta forma, se insufla argón al interior de la tubería, evitando un posible efecto de oxidación en la soldadura por el interior de la tubería.

En la Figura 21 se puede comprobar el resultado final del proceso de soldadura orbital. En la parte superior del cabezal se puede ver el electrodo infusible que realiza la soldadura.

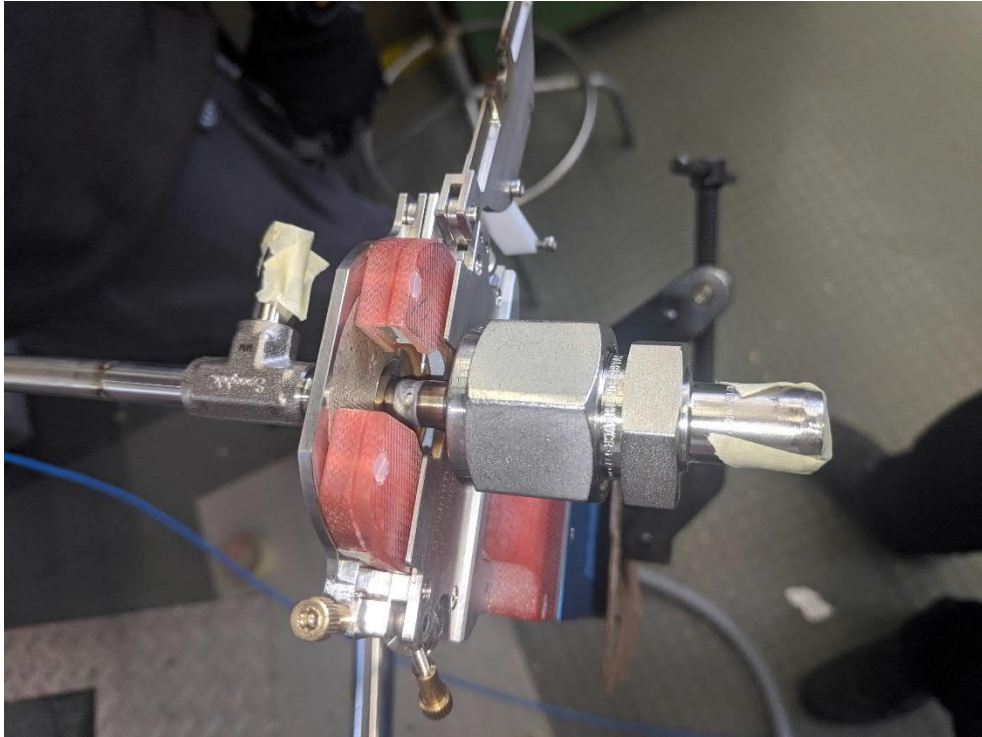


Figura 21. Resultado de la soldadura orbital.

Para terminar con la soldadura se realiza una inspección visual después de cada una de las soldaduras con el endoscopio de la Figura 22.



Figura 22. Endoscopio Karl Storz power LED 175.

El plano del tubo de entrada, al igual que los demás, se recogen en el Anexo A.

La segunda rama de trabajo de este subconjunto es el colector de entrada con los 19 capilares, tal y como se puede ver en la siguiente Figura 22.

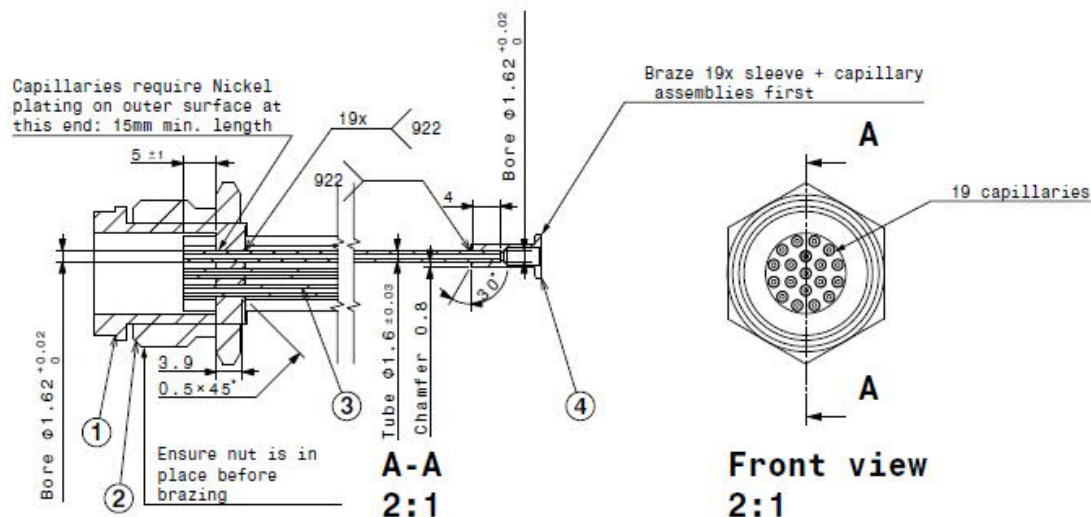


Figura 22. Materiales del colector de entrada.^[11]

El colector de entrada es una pieza realizada a la medida para el TB2S. Proviene de la pieza original Swagelok SS-8-VCR-3-BL. Es un manguito ciego de ½ pulgada. Se adjunta el plano del mecanizado en el anexo A ^[12]



Figura 23. Vista isométrica del colector de entrada.^[12]

Los capilares son los encargados de producir una caída de presión que equilibre el flujo entre los diecinueve ciclos de enfriamiento.

Tal y como se establece en el objetivo específico 4 de refrigeración, la caída de presión en los capilares debe estar entre 8 y 10 bares.

Este objetivo es interdependiente con otros objetivos específicos, como por ejemplo el primero, donde la caída de presión en total en el experimento debe ser de 10 bares.

Mediante experimentación se ha determinado que la caída de presión en cada pareja de evaporadores es de 1.3 bares.

La caída en el colector de salida es despreciable, debido a que el diámetro de este es bastante mayor que el resto de las tuberías.

Por lo que es de suma importancia intentar conseguir 8.7 bares de caída de presión en cada uno de los capilares, y así conseguir esos 10 bares en total.

Se adquirió un lote de 37 capilares de diámetro interno de 0.65mm, y 1.60mm de diámetro externo.

El uso de capilares como forma de equilibrar el flujo de refrigerante por los sistemas no es único del TB2S. Para el CMS se necesitarán capilares en un orden de miles. Debido a la importancia de este punto, se propuso investigar la posibilidad de desarrollar un procedimiento estándar para el tratamiento de los capilares, desde la entrega por parte del proveedor hasta la instalación final en el detector.

La pérdida de carga en una tubería viene dada con la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g}$$

Ecuación 1. Ecuación de Darcy-Weisbach para la pérdida de carga en tuberías.

Dónde:

- h_f = pérdida de carga debida a la fricción (m).
- f = factor de fricción de Darcy (adimensional).
- L = longitud de la tubería (m).
- D = diámetro interno de la tubería (m).
- v = velocidad media del fluido (m/s).
- g = aceleración de la gravedad (m/s^2).

Por otro lado, se tiene la ecuación del caudal en una tubería circular:

$$Q = v * A = \frac{v * D^2 * \pi}{4}$$

Ecuación 2. Ecuación del caudal en tuberías circulares.

Dónde:

- Q = caudal (m^3/s).
- A = área de la tubería (m^2).
- v = velocidad media del fluido (m/s).

Despejando la velocidad:

$$v = \frac{4 * Q}{D^2 * \pi}$$

Ecuación 3. Velocidad del fluido en tuberías circulares.

Introduciendo la Ecuación 3 en la Ecuación 1:

$$h_f = f * \frac{8}{\pi^2} * \frac{L}{g} * \frac{Q^2}{D^5}$$

Ecuación 4. Ecuación de Darcy-Weisbach para la pérdida de carga en tuberías.

Además, el caudal másico viene dado por:

$$\dot{m} = Q * \rho$$

Ecuación 5. Ecuación de la densidad.

Dónde:

- ρ = densidad (kg/m³).
- $\dot{m}$ = flujo másico (kg/s).
- Q = caudal volumétrico (m³/s).

Introduciendo la Ecuación 5 en la Ecuación 4:

$$h_f = f * \frac{8}{\pi^2} * \frac{L}{g} * \frac{\left(\frac{\dot{m}}{\rho}\right)^2}{D^5} * \rho = f * \frac{8 * L * \dot{m}^2}{\pi^2 * g * \rho^2 * D^5}$$

Ecuación 6. Ecuación de Darcy-Weisbach para la pérdida de carga en tuberías.

Después de este razonamiento matemático, llegamos a la conclusión que la pérdida de carga del capilar vendrá dada por el flujo másico de CO₂ y su densidad. Además, dependerá de la longitud y diámetro del capilar.

El flujo másico de CO₂ viene dado por parámetros de diseño del TB2S, y es 1,6 g/s nominales. La explicación de este valor es la siguiente:

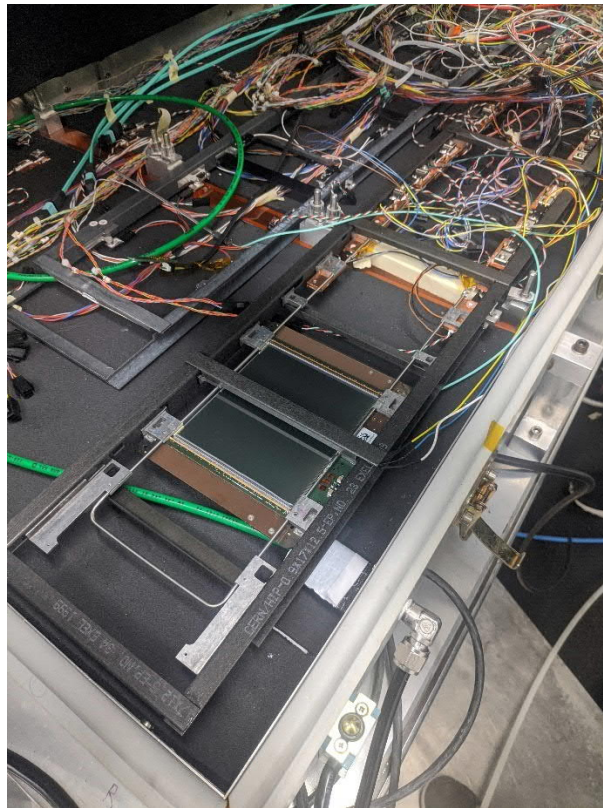


Figura 23. Ladder con módulos reales del TB2S.

En la Figura 23 se pueden ver los módulos de detección de partículas que deben ser refrigerados. Este es el verdadero porqué de todo el proyecto de refrigeración.

Cada una de estas estructuras de fibra de carbono se llaman Ladder. Estos ladders sostienen los módulos detectores. Cuando se colocan 19 pares de ladders formando una corona circular, obtenemos el estado final del Layer 3 del TB2S, tal y como se puede ver en la Figura 12 de este trabajo.

Para el TB2S, el CO₂ refrigerará dos ladders en serie por cada ciclo de refrigeración. Cada ladder tiene una potencia de 80W, dando una potencia en total de unos 160W por cada pareja de ladders. Normalmente, los sistemas de refrigeración de CO₂ se dimensionan para un funcionamiento "en caliente" de unos +15 °C, donde se busca una calidad de vapor del 60% aproximadamente. Esto corresponde a unos 100 J/g.

Con el mismo caudal másico (se mantiene fijo al cambiar la temperatura para evitar grandes cambios en la caída de presión a través de los capilares), se proporciona una calidad de vapor del 32% a -35 °C.

Por lo tanto, se utiliza como regla general que un caudal de 1 g/s de CO₂ equivale a una potencia disipada de 100. Por ejemplo, 160 W tendría un flujo másico de $160\text{W}/100\text{ J/g} = 1,6\text{ g/s}$ para garantizar una calidad de vapor de aproximadamente el 32 % en la salida.

Volviendo al resultado de la Ecuación 6, con este desarrollo se comprueba que el flujo másico de refrigerante está fijado, y por tanto no es un parámetro que se pueda variar. Además, las temperaturas de funcionamiento del CO₂ también lo están, por lo que la densidad es otro parámetro invariable, al igual que lo es el diámetro interno de los capilares.

Por lo que lo único que podemos variar es la longitud del capilar. Por tanto, los capilares deben ser testados y cortados antes de ser instalados en el proyecto.

El diámetro interno de los capilares está diseñado para ser de 0,65mm. Sin embargo, el proveedor siempre dispone de una tolerancia. En nuestro caso, la tolerancia es de $\pm 0,03\text{mm}$.

La entrada al ciclo más lejano del colector de entrada en el Layer 3 se encuentra a 1,8m de él. Por lo que los capilares deberían tener una pérdida de carga de al menos 8,7 bares.

Utilizando una calculadora online para la pérdida de carga en tuberías ^[13], se realizan unos cálculos para ver la variabilidad existente en esa tolerancia del diámetro interno, para ver si se deben tener en cuenta.

La realidad es que la sensibilidad de la pérdida de carga en estos capilares es muy alta con respecto a las variaciones que puedan darse en el diámetro interno de los mismos.

Para un diámetro interno de 0.62mm la caída de presión sería de 12,87 bares, para 0,65mm 10,12 bares y para 0,68mm 8,06 bares.

A raíz de estas averiguaciones se decide diseñar un procedimiento de test de capilares que permita prever con seguridad que los capilares que se instalan están en el entorno de esos 8,7 bares de caída de presión requeridos.

Se utiliza el montaje de la Figura 24 para la prueba de capilares, en el cual se hace circular CO₂ a -35°C, y con unos sensores de temperatura y diferencial de presión se miden los parámetros buscados.

Para la conexión de los capilares, se desarrolla un conector personalizado en latón, que con una combinación de o-rings de goma y arandelas metálicas, permitiendo la sujeción de los capilares en combinación con un sellado sin fugas de CO₂.

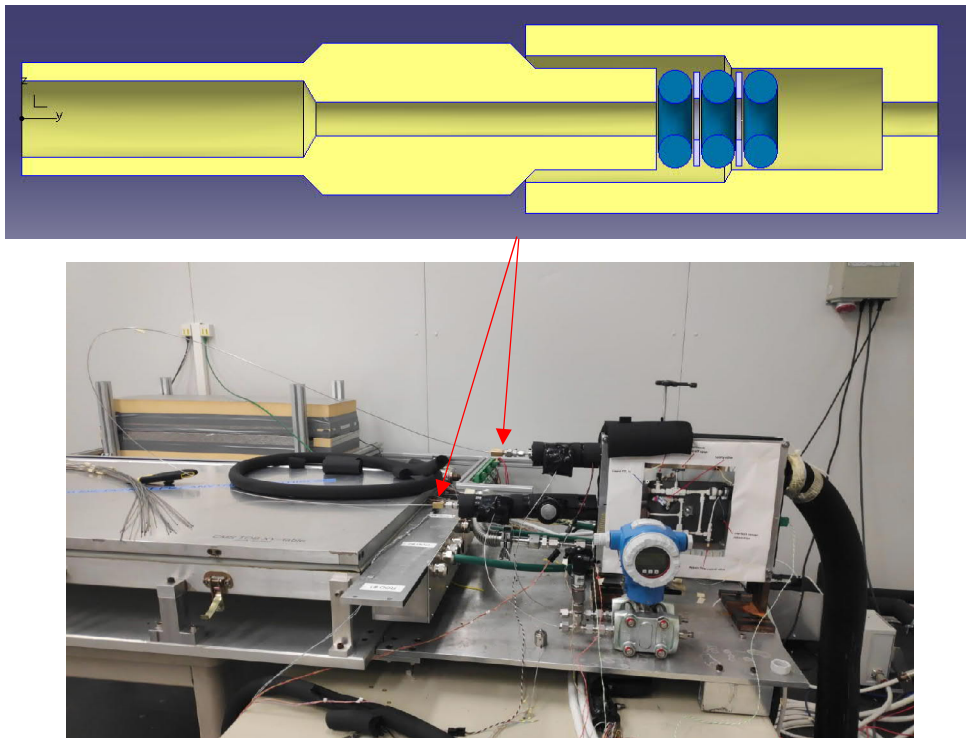


Figura 24. Set up del test de capilares.

A través del tubo coaxial de la derecha se inyecta el CO₂ que proviene de la planta refrigeradora “TRACI+”, visible en la Figura 25.

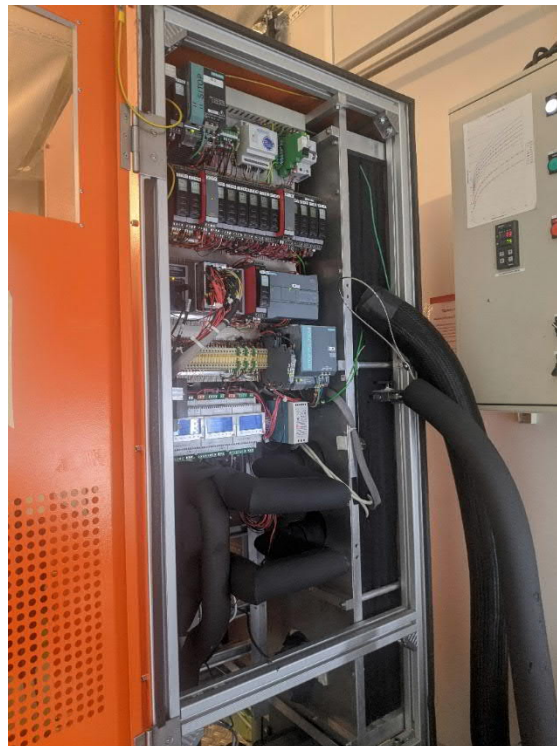


Figura 25. Planta refrigeradora TRACI+.

Los sensores son conectados a un PLC y de ahí a un ordenador, donde se trabaja con el programa LabView.



Figura 26. PLC Siemens.

En la siguiente figura se puede observar el layout del experimento en el programa LabView. En él son fácilmente identificables los valores medidos.

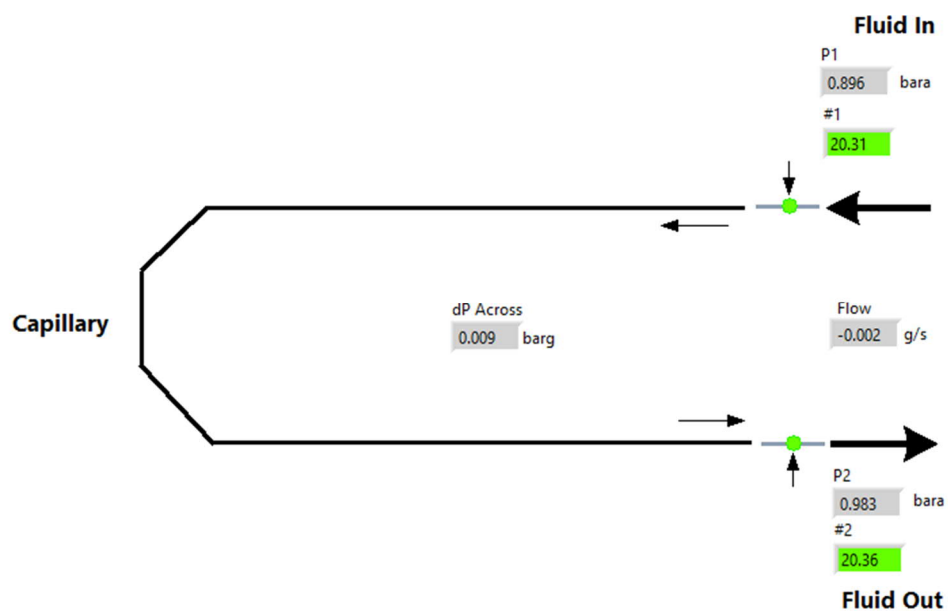


Figura 27. Esquema del programa LabView.

En primer lugar, se realizó un test de repetibilidad para conocer si el método de experimentación era lo suficientemente robusto para dar resultados coherentes y repetitivos.

Este test consistió en medir la pérdida de carga de tres capilares diferentes. Cada uno de los capilares se medía en cinco ocasiones, y entre una medición y otra, el capilar era desmontado y montado en el set up por completo siguiendo un procedimiento.

Los resultados del test fueron los siguientes:

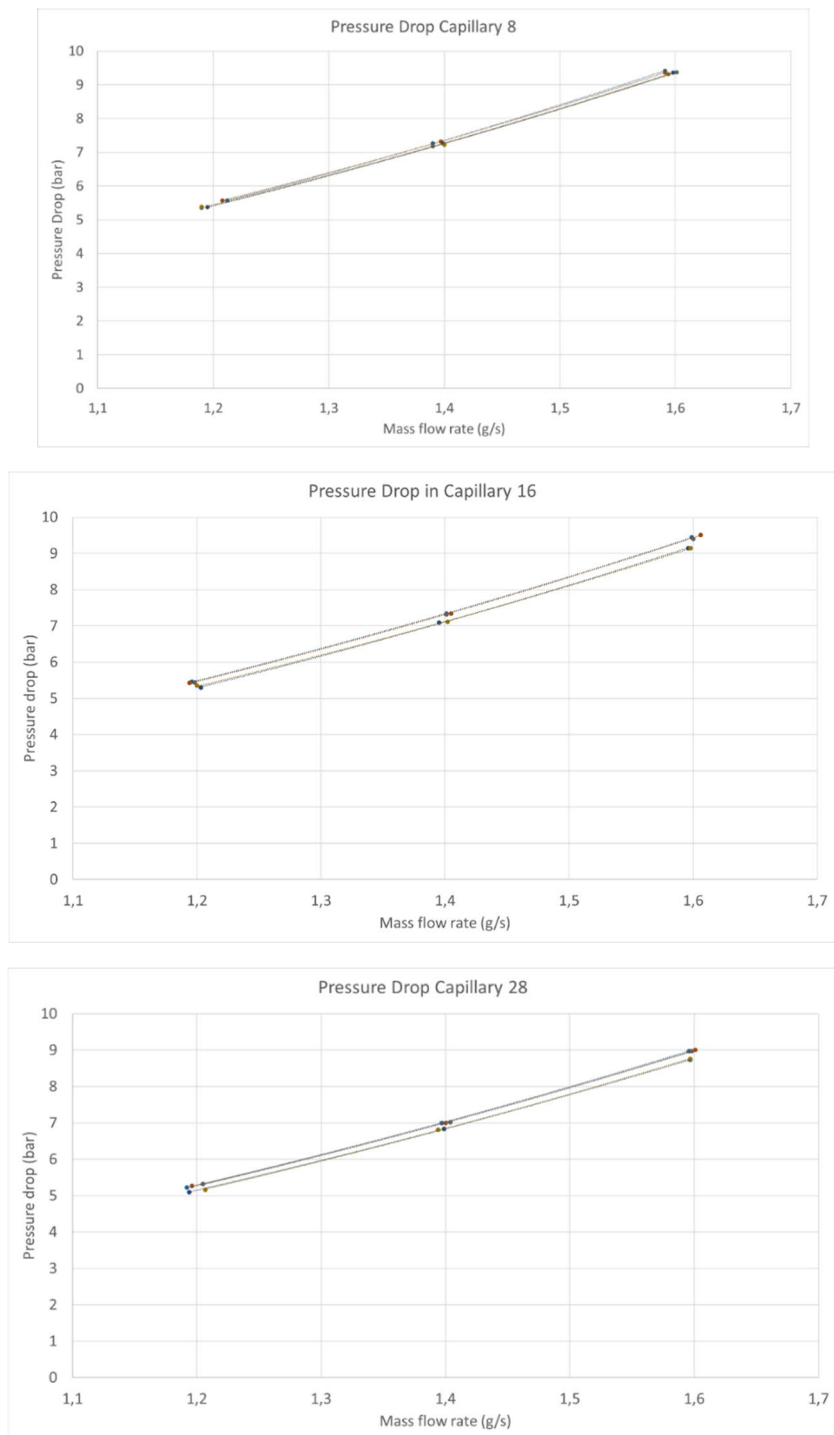


Figura 28. Resultados del test de repetibilidad.

El test había sido un éxito. Las mediciones tenían una variabilidad pequeña. De 0,5 bares en el peor de los casos. Además, se pudo traducir que esta variabilidad en pérdida de carga suponía un cambio muy pequeño en flujo másico, y por tanto (y lo más importante), una variación despreciable en el título de vapor final.

Se había logrado diseñar un procedimiento estándar para la medición de capilares aplicable posteriormente en todo el proceso de fabricación del CMS.

A continuación, se procedió con el test de todo el lote de capilares, cuyos resultados fueron los siguientes:

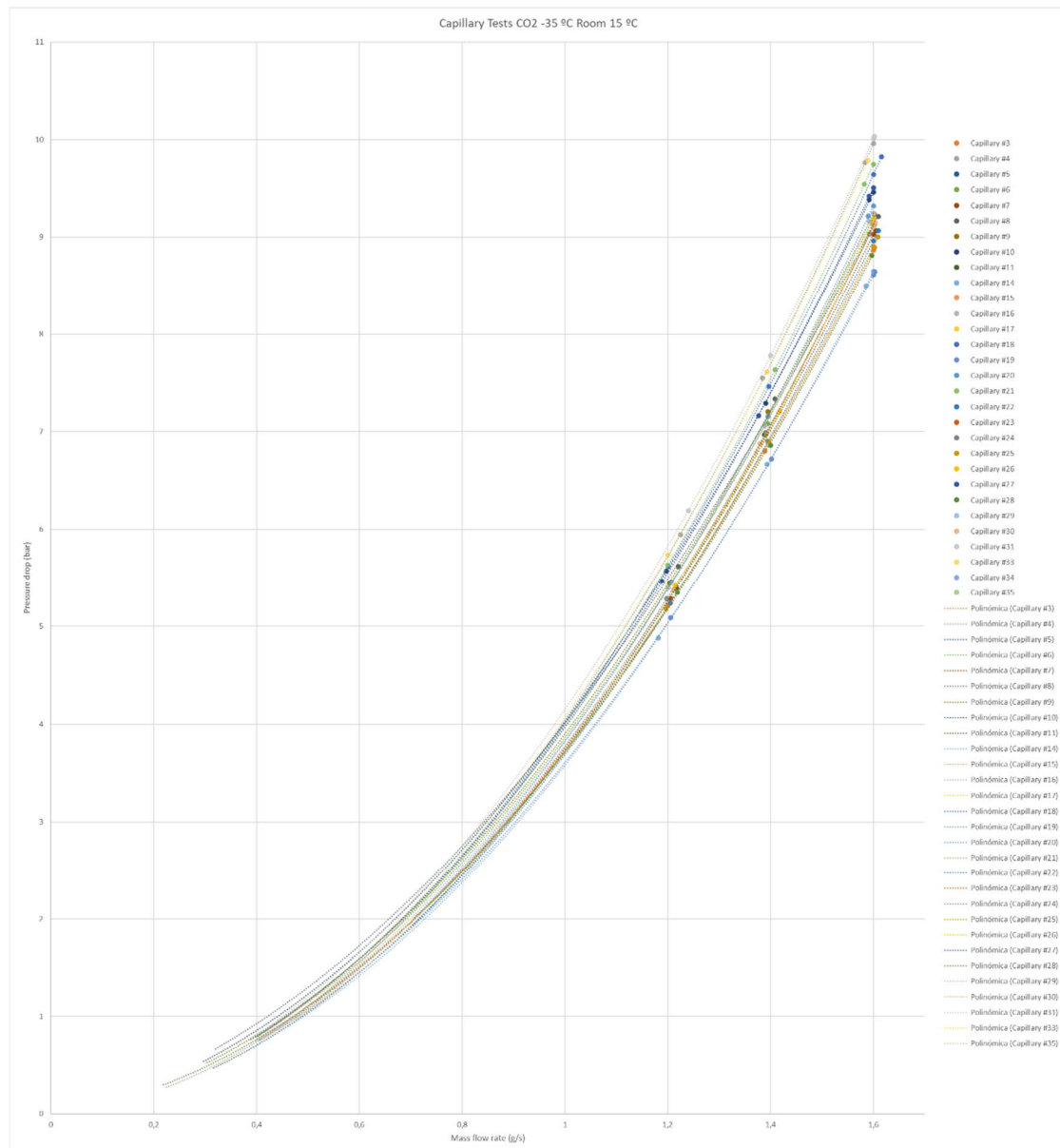


Figura 29. Resultados del test de caída de presión.

Ampliando la zona final del gráfico, que son los valores nominales de flujo (1,6 g/s):

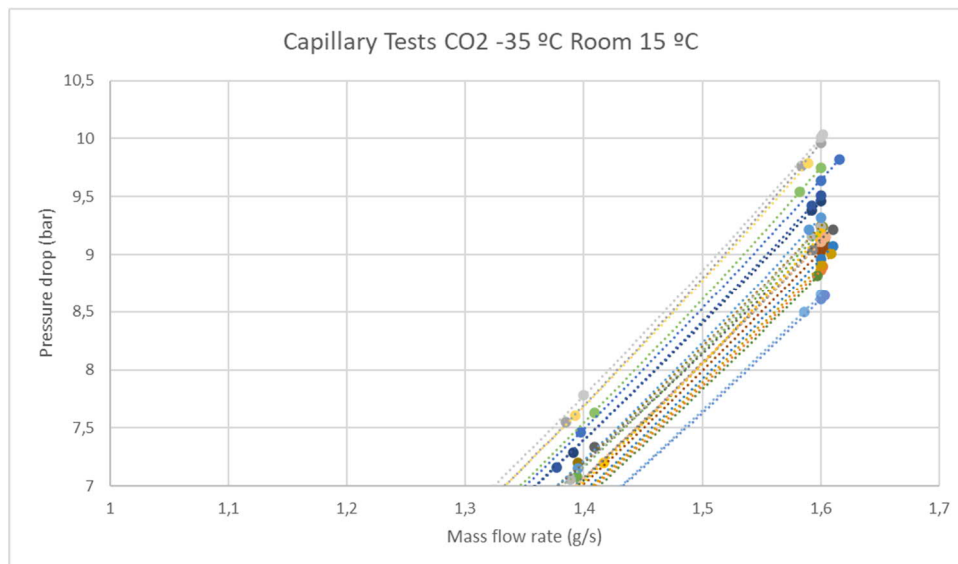


Figura 30. Detalle de los resultados del test de caída de presión.

Algunos capilares no llegan a los 8,7 bares necesarios, por lo que son descartados inmediatamente. El resto (que son aptos), son cortados para buscar esa pérdida de carga objetivo.

Para calcular la longitud final de esos capilares, simplemente se realiza una proporción simple, ya que la pérdida de carga se considera lineal, por lo que un capilar de 10 bares y 1,8 m deberá medir 1,57 m para producir una caída de presión de 8,7 bares.

Los capilares fueron cortados mediante una técnica de electroerosión o EDM. El taller central del CERN dispone de una máquina de EDM por hilo. Este proceso garantiza un gran acabado final y la seguridad de que en el capilar no ha entrado ningún tipo de viruta que obstruya el conducto.

Por último, se realiza un segundo test de pérdida de carga para comprobar que los capilares tienen la caída de presión objetivo. Los resultados son los siguientes:

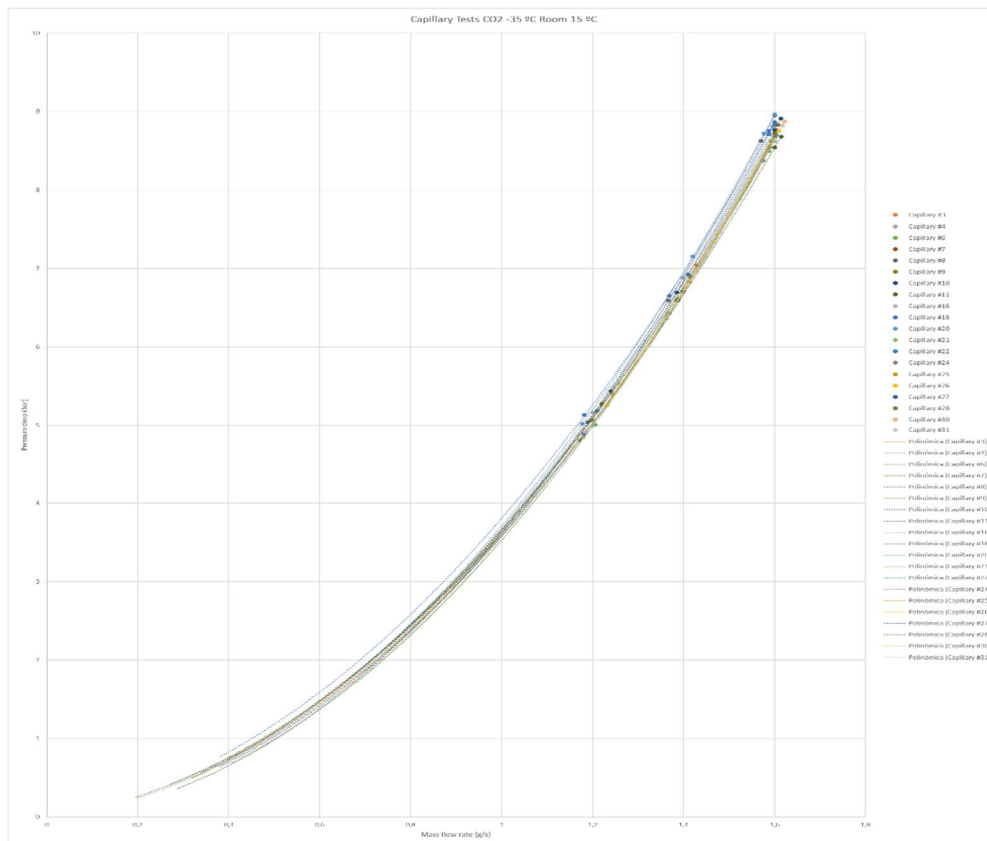


Figura 31. Resultados del segundo test de caída de presión.

Ampliando la zona final del gráfico, que son los valores nominales de flujo (1,6 g/s):

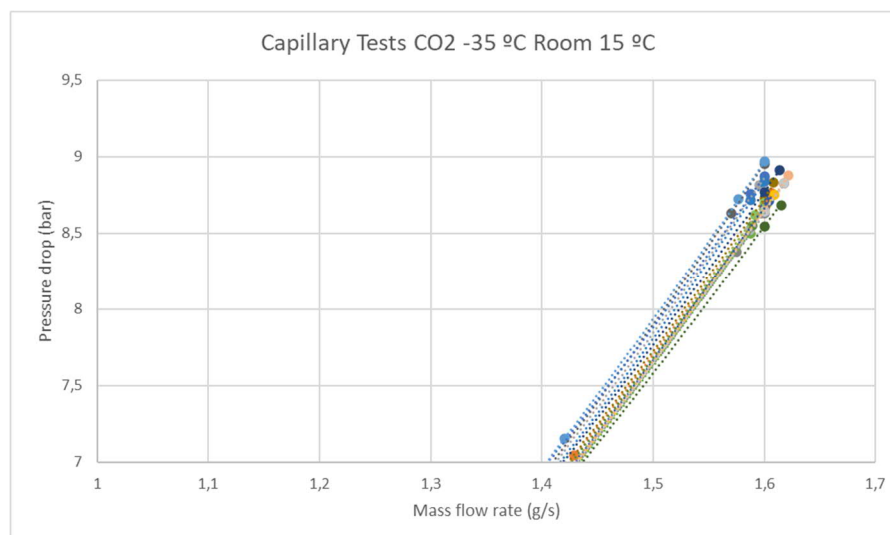


Figura 32. Detalle de los resultados del segundo test de caída de presión.

Este apartado está ampliado en mayor medida en el Anexo B, el cual se compone del paper oficial que escribí para el CERN “Test Report for CMS Outer Tracker CO2 Cooling – TBPS and TB2S Capillaries – Tubes Only”.

Una vez los capilares están cortados a la medida requerida, son llevados al taller de soldadura de vacío.

Se utiliza este principio de soldadura principalmente por la dificultad que entraña la soldadura de un tubo tan pequeño como es 1,6mm de diámetro exterior. Además, las tolerancias son bastante justas, por lo que este tipo de soldadura es la más indicada para este tipo de casos.

Los capilares deben ser soldados al vacío en dos operaciones diferentes. En primer lugar, se sueldan los 19 adaptadores de 1,6 mm OD a tubería de 2,5 mm OD en cada uno de los capilares. Para ello se colocan los capilares en un soporte metálico tal y como se ve en la Figura 33:



Figura 33. Colocación de capilares para soldadura al vacío.

Alrededor de los adaptadores se coloca el material de aporte, en este caso es SCP1 (en hilo de 0,8mm según la ISO 17672:2010 V1).

Los capilares son colocados entonces dentro del horno de soldadura:



Figura 34. Colocación de capilares en el horno de soldadura al vacío.

El programa de soldadura toma unas 3 horas. En él se incrementa la temperatura en bandas de 10°C para llegar a una temperatura 20°C menor a la temperatura de fusión del material de aporte. Después se procede a la temperatura de fusión por unos 2-3 minutos, la cual es 820°C. Posteriormente el proceso de enfriamiento dura unas 12 horas.

Los capilares después son soldados nuevamente en el otro extremo al colector de entrada. Se utiliza otro material de aporte con una temperatura de fusión menor para de esta forma no fundir nuevamente el material ya soldado de forma previa en el extremo contrario.

Para todo este proceso se sigue el plano de soldadura que se puede encontrar en el Anexo A ^[11].

La fabricación de este subconjunto queda finalizada en este momento. Más adelante se procede a la consecución de uno de los objetivos de este proyecto, la verificación mediante pruebas de fuga de la conformidad de esta parte del experimento. Las pruebas de fuga serán explicadas posteriormente en este trabajo cuando la fabricación de los tres subconjuntos quede descrita.

3.2. Colector de salida

Este es el segundo subconjunto del proyecto. Se compone de los siguientes materiales:

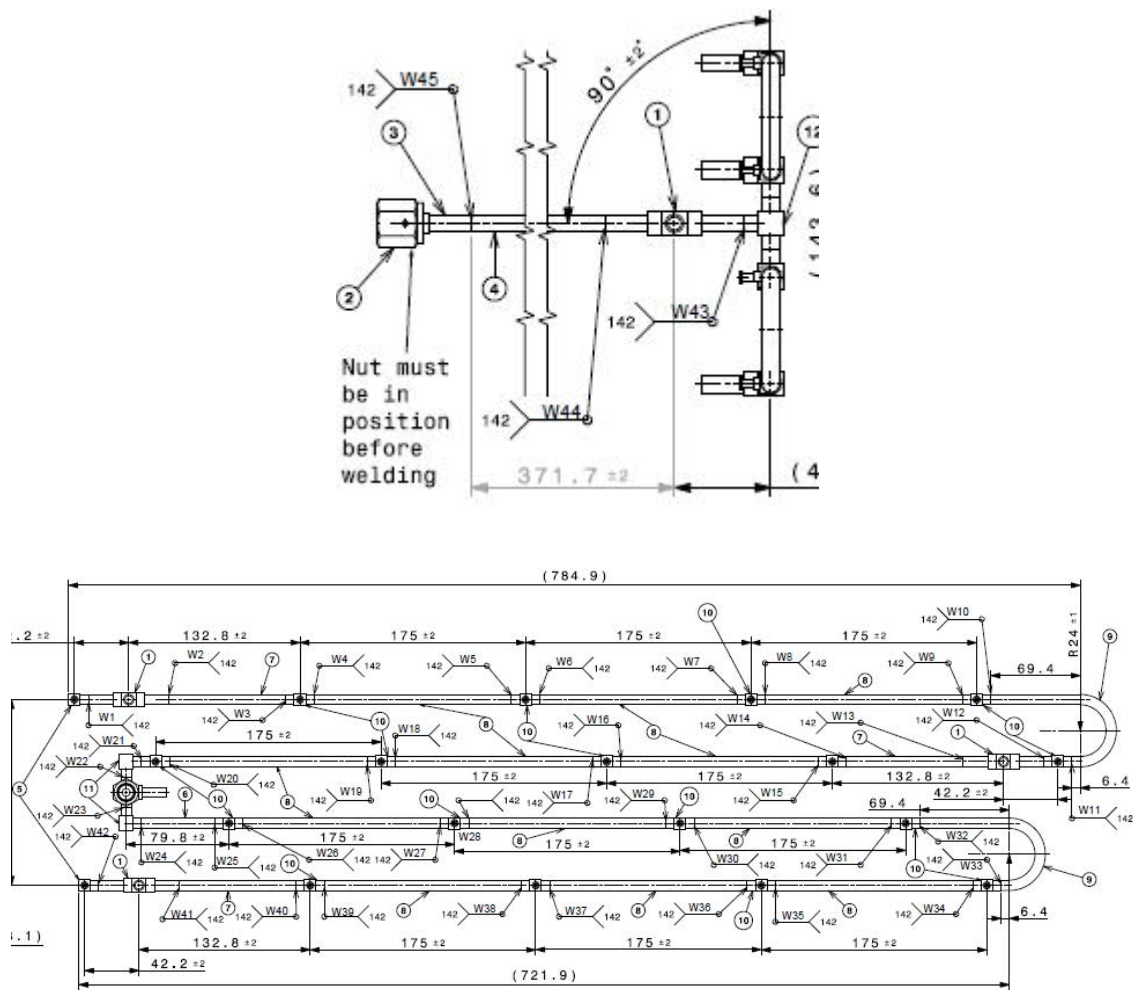


Figura 34. Materiales del colector de salida.

Cantidad	Ítem	Material
4	Unión T de soldadura de tubo a tope 8mm OD modelo Swagelok 316L-8MTB7-3	SSL316
1	Tuerca hembra VCR de ¼ pulgada	SSL316
1	Manguito adaptador de 8mm a ¼ pulgada VCR	SSL316
1	Tubería de salida de 8mm OD y 6mm ID de 340,5 mm de longitud	SSL316
2	Codo de soldadura de 90° de tubo a tope de 8mm OD y 2,5mm OD	SSL316
1	Tubería de 8mm OD y 6mm ID de 56,9 mm de longitud	SSL316
3	Tubería de 8mm OD y 6mm ID de 90,6 mm de longitud	SSL316
12	Tubería de 8mm OD y 6mm ID de 153 mm de longitud	SSL316

2	Tubería de 8mm OD y 6mm ID de 153 mm de longitud y 24 mm de radio de curvatura	SSL316
17	Unión T de soldadura de tubo a tope de 8mm OD y 2,5mm OD	SSL316
2	Codo de soldadura de 90° de tubo a tope de 8mm OD modelo Swagelok 6LV-8MMW-9	SSL316
1	Unión T de soldadura de tubo a tope de 8mm OD modelo Swagelok 6LV-8MMW-9	SSL316

Tabla 5. Lista de materiales del subconjunto “Colector de salida”.

Se muestra en modelo de Catia una vista simplificada del resultado final del subconjunto:

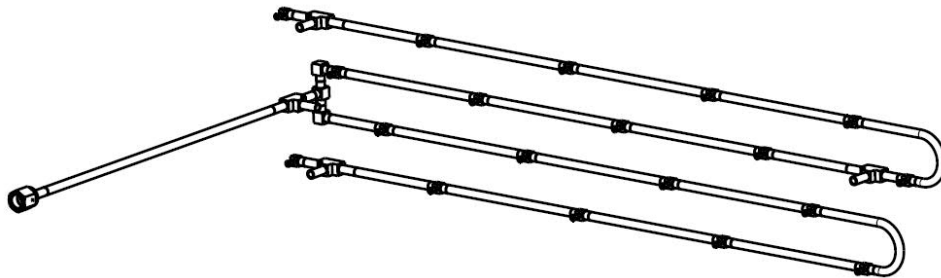


Figura 35. Modelo del subconjunto colector de salida.

Como anteriormente se mencionaba, los materiales son los mismos que se utilizaron para la tubería de entrada. Estos tubos fueron trabajados con los mismos métodos.

Se cortaron los tramos de tubería necesarios con la herramienta de la Figura 17. Después se utilizó la herramienta de la siguiente figura para conseguir los dos tramos circulares de 180°.



Figura 36. Herramienta para doblar tubos de 8mm.

Los tramos de tubería son soldados mediante una soldadura orbital, como la dada en la tubería de entrada. Los tramos son conectados a 17 uniones “T” de 8mm con un manguito adaptador a tubos de 2,5mm.

Estas conexiones de 2,5mm son para conectar la salida de los 19 pares de evaporadores posteriormente con unos tubos de conexión intermedios.

De la misma forma, se han soldado 4 uniones “T” de 8mm para conectar 4 sensores de presión en 4 puntos estratégicos del experimento. De ese modo, se pretende medir la presión en la tubería de salida, y a la salida del evaporador inicial, final y uno entre estos dos.

El resultado final de los trabajos de soldadura puede verse en la siguiente imagen:



Figura 37. Resultado final del colector de salida.

En el Anexo A se adjuntan los planos correspondientes al colector de salida, al igual que ocurriera con el subconjunto anterior.

La fabricación del colector de retorno se finaliza en este momento. Más adelante se procede a la verificación mediante pruebas de fuga de la conformidad de esta parte del experimento. Las pruebas de fuga serán explicadas posteriormente en este trabajo cuando la fabricación de los tres subconjuntos quede descrita.

3.3. Evaporadores

La fabricación de los evaporadores es considerada como el tercer subconjunto de este proyecto.

El fabricante entregó los tubos con longitudes de entre 2,5 metros y 2,7 metros como se especificaba. Los tubos debían tener al final del proceso una longitud de 2482 milímetros siguiendo la forma de U mostrada en el plano del Anexo A ^[14].

Después del proceso de doblado, la longitud será superior a la deseada, por lo que se someterán a un proceso de corte por EDM para darle la longitud final.

La forma de los tubos se consiguió con una herramienta de doblado personalizada para el diámetro externo y el radio de curvatura final a dar.

Se realizaron pruebas de doblado con y sin material de relleno. El resultado fue claro. El material de relleno era necesario, ya que, en caso contrario, el tubo doblado sufre una estriación en la cara interna de la curva. Además, la forma interna se ve ovalada, cambiando de esta forma la pérdida de carga que el fluido debería tener de forma teórica.

Se realizó un proceso de relleno de los tubos, que consistía en cerrar uno de los extremos del tubo mediante un simple pellizco con unos alicates. Después, este tubo era colocado en posición vertical, en el set up que se observa en la siguiente figura. Se diseñó específicamente para tener la posibilidad de introducir mediante una jeringa la arena de vidrio. El montaje se puede ver en la siguiente figura:

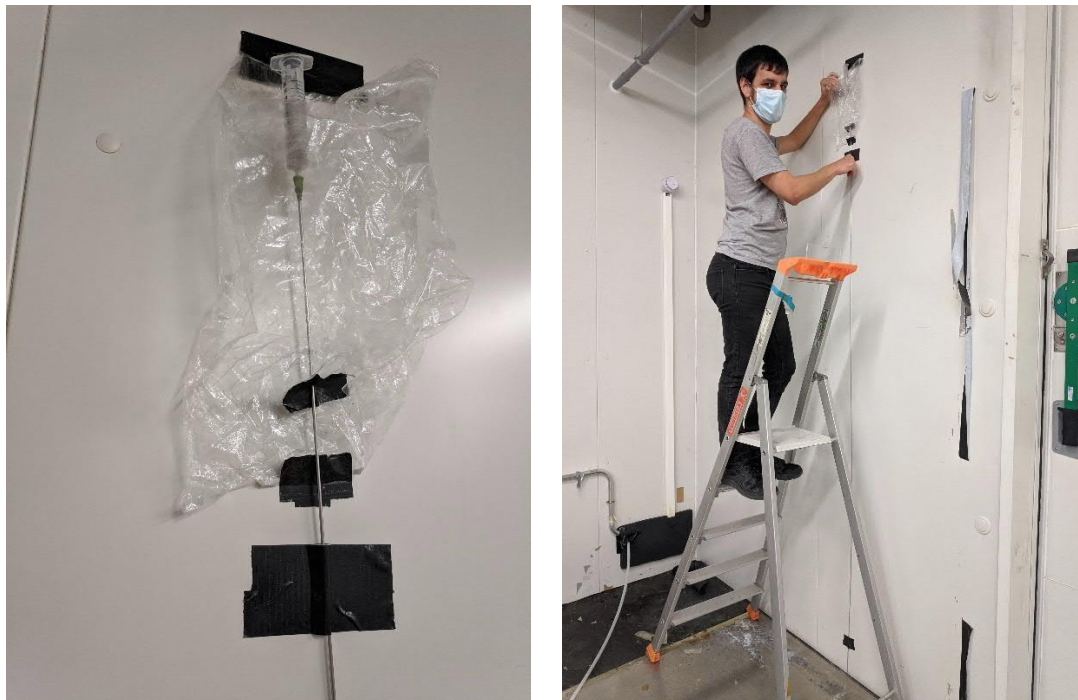


Figura 38. Montaje para el relleno de los tubos.

A continuación, se procede de la misma forma que con el extremo inferior. Se cierra con los alicates la parte superior y se continúa con el doblado del tubo. El doblado se puede ver en las siguientes figuras.

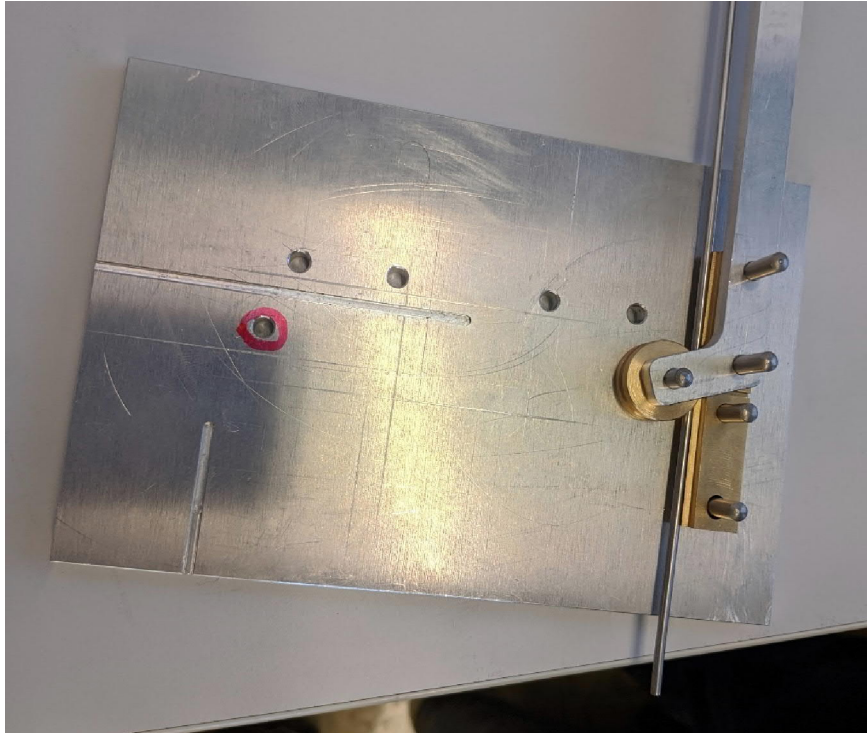


Figura 39. Primera posición del doblado de los evaporadores.

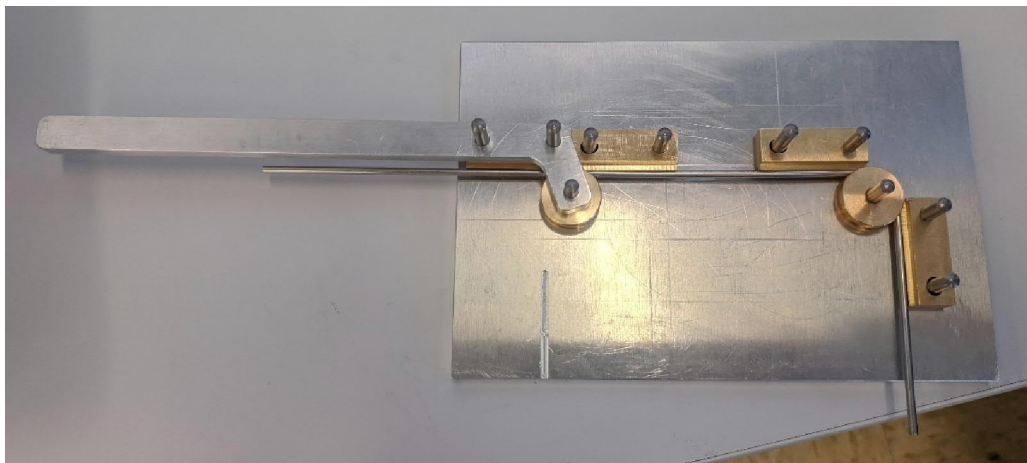


Figura 40. Segunda posición del doblado de los evaporadores.

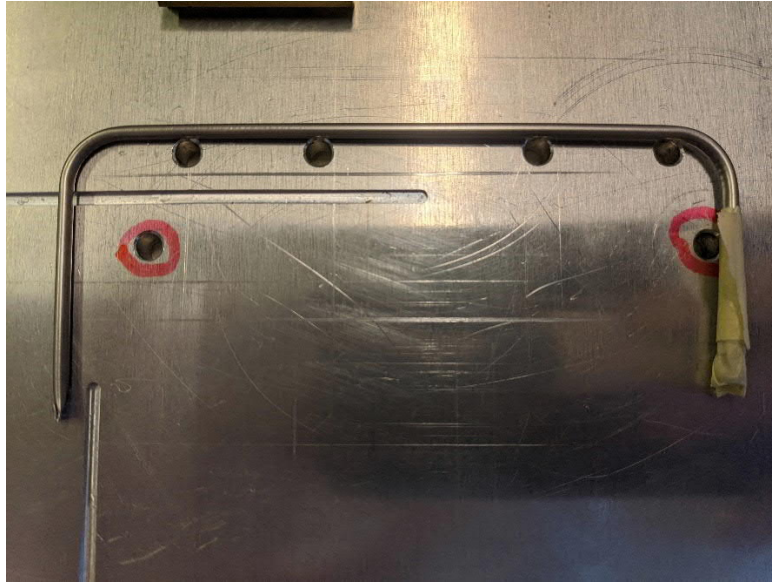


Figura 41. Resultado final del doblado de los evaporadores.

Este proceso se repitió para los 38 evaporadores. A continuación, éstos estaban preparados para someterse a una soldadura al vacío en ambos, que los uniera a los adaptadores de 2,2mm x 2,5mm.



Figura 42. Adaptadores 2,2mm x 2,5mm.

Estos adaptadores permiten conectar los evaporadores con los tubos de conexión que se ven en el círculo amarillo de la Figura 14.

Después de la soldadura al vacío de los adaptadores, los evaporadores están terminados y preparados para ser testados.

3.4. Tubos de conexión

Los tubos de conexión que enlazan los tres subconjuntos son de Cobre-Níquel 70/30. El diámetro interior es de 2,0 milímetros y el exterior de 2,5 milímetros.

Se considera que estos tubos no tienen entidad suficiente para considerarse un subconjunto como los anteriores.

Como se puede observar en la Figura 14, hay tres tipos de tubos de conexión diferentes:

- El primer tubo conecta los capilares con los evaporadores.

- El segundo tipo une la salida de un evaporador con la entrada de su pareja.
- El tercer tipo de tubo conecta la salida del segundo evaporador de cada pareja con el colector de salida.

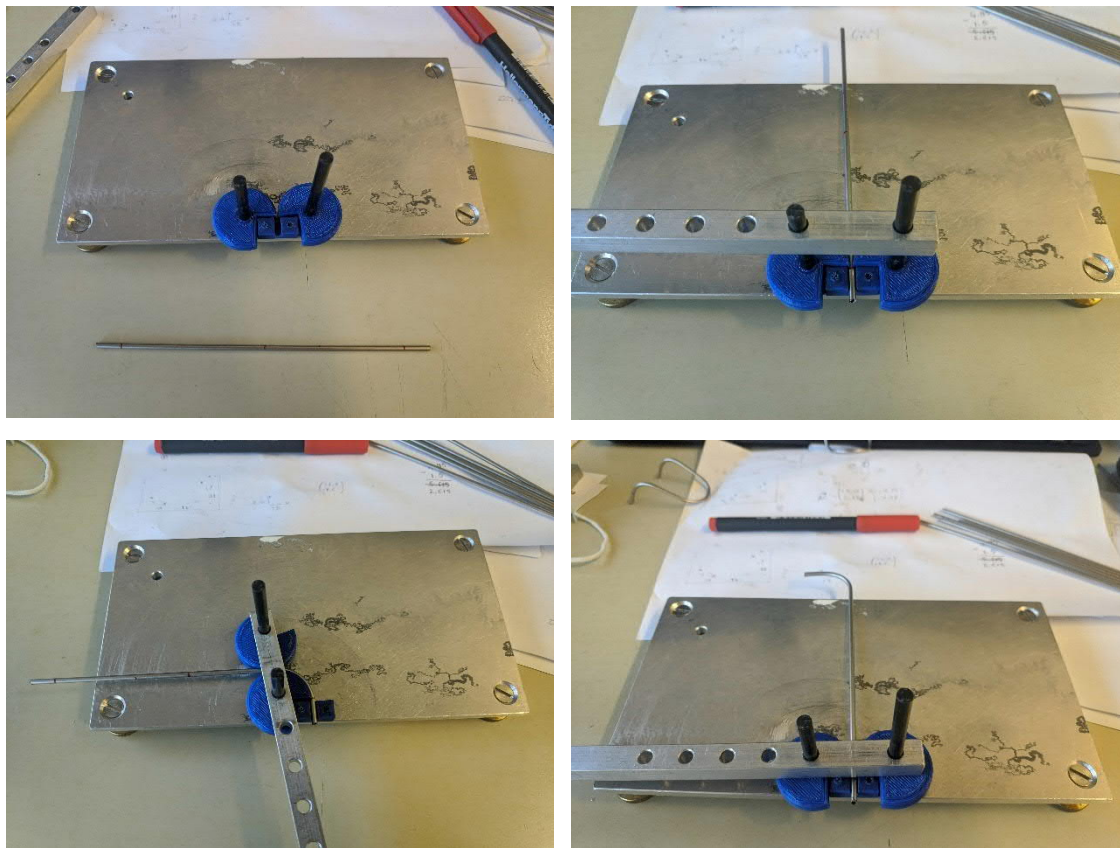
Los tubos se cortaron con una herramienta dremel y un accesorio de disco. A continuación, se limpian ambos extremos. Cuando el tubo está cortado a la longitud necesaria, se realiza el doblado con una herramienta personalizada compuesta por un plato metálico y unas ruedas impresas en 3D.

El primer tubo, que conecta los capilares con los evaporadores se detalla en los apartados de pruebas de fugas de los subconjuntos y ensamblaje, ya que son el último paso que realizar. Por facilidad se sueldan los tubos a la salida de los capilares antes de este proceso de doblado.

El tubo que conecta cada pareja de evaporadores entre sí debe fabricarse antes del ensamblaje y siguiendo el proceso que se describe a continuación.

En primer lugar, se realiza el doblado de 90° en los dos extremos. Después se continúa con un doblado en el punto central del tubo. Con esta forma se consigue conectar ambos evaporadores, y en caso de alguna pequeña desviación, éstos son tubos fácilmente maleables, debido al material y a que son tubos de pared delgada.

En la siguiente figura se puede ver el proceso completo de doblado del segundo tipo de tubo:



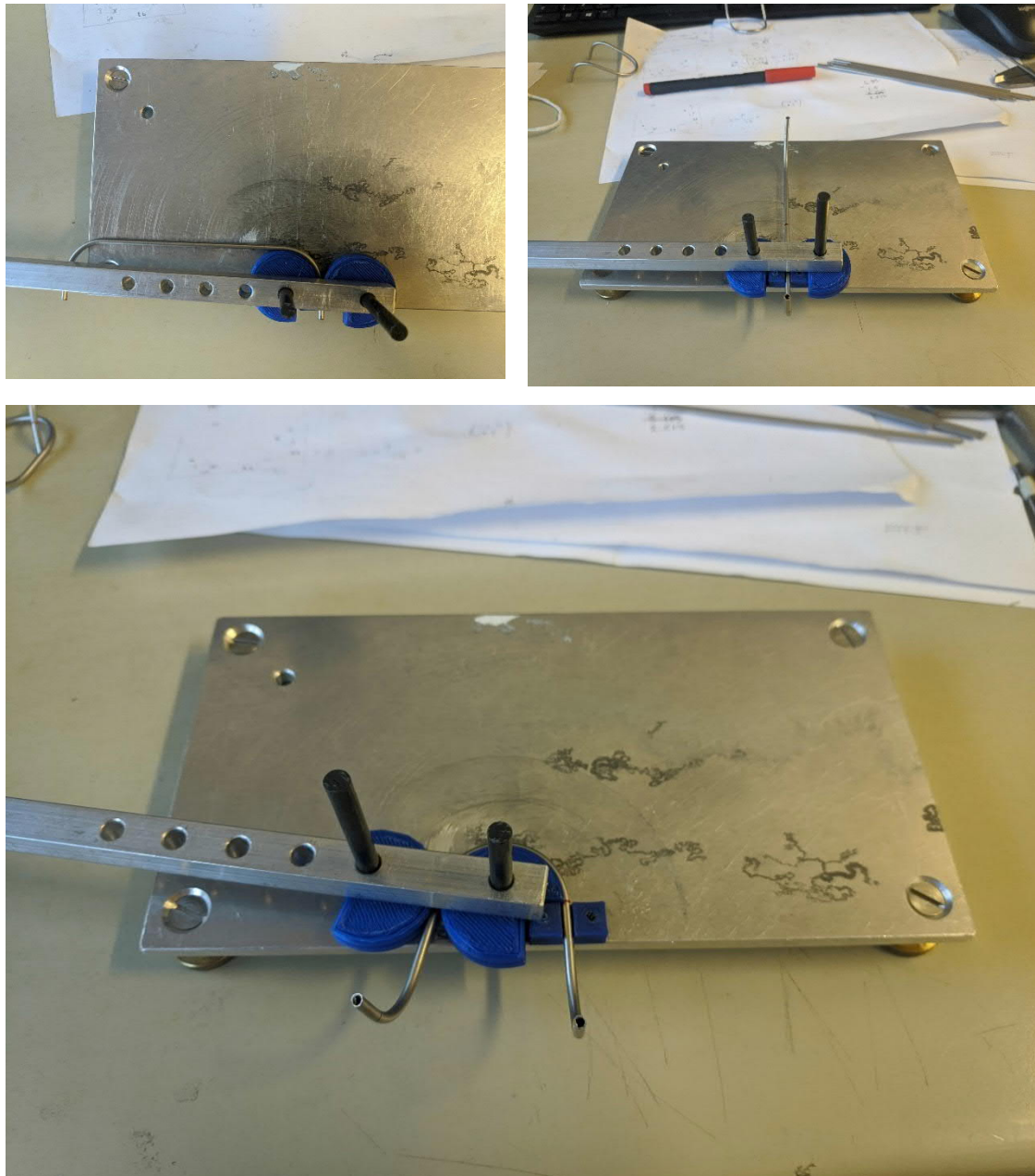
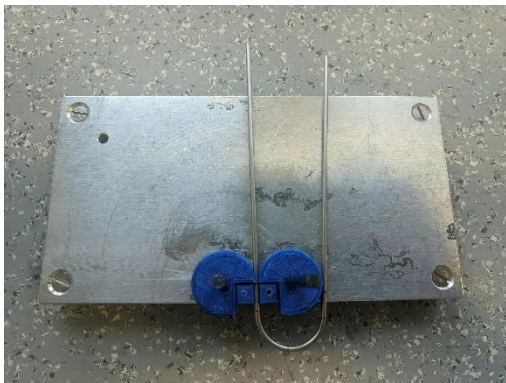
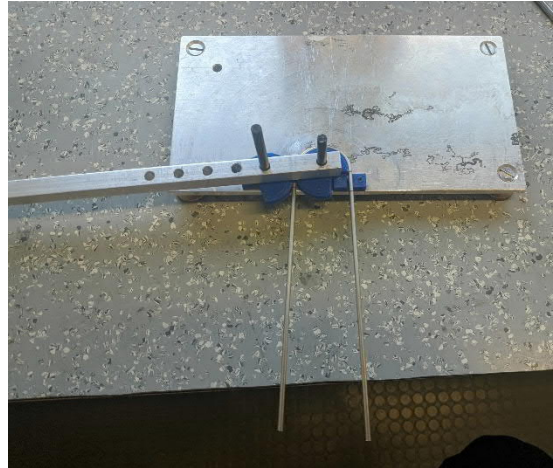
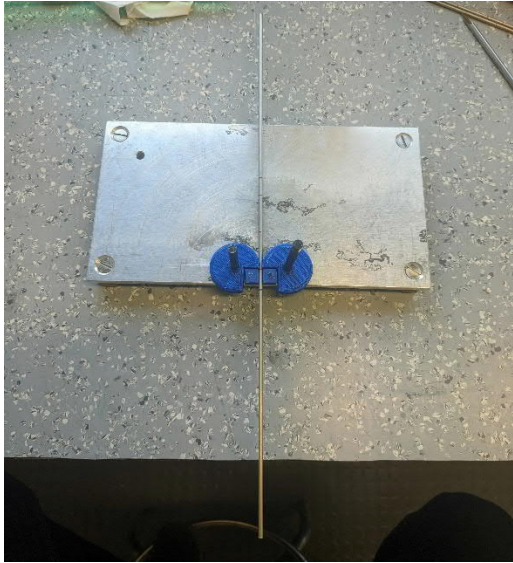


Figura 43. Proceso de doblado del tubo de conexión entre evaporadores.

El tubo que conecta la salida de los evaporadores con el colector de salida tiene un proceso de doblado algo más complejo que el anterior.

En primer lugar, se realiza un doblado de 180° en el punto central del tubo. Se continúa con dos doblados de 90° a ambos lados de la media circunferencia. En este momento el tubo debe ser girado 90° , de forma que la sección de 180° quede perpendicular a la tabla el doblado de 90° en los dos extremos. Después se continúa con un doblado en el punto central del tubo. Con esta forma se consigue conectar ambos evaporadores, y en caso de alguna pequeña desviación, éstos son tubos fácilmente maleables, debido al material y a que son tubos de pared delgada.

El proceso del tercer tipo de tubo se puede ver en la siguiente Figura:



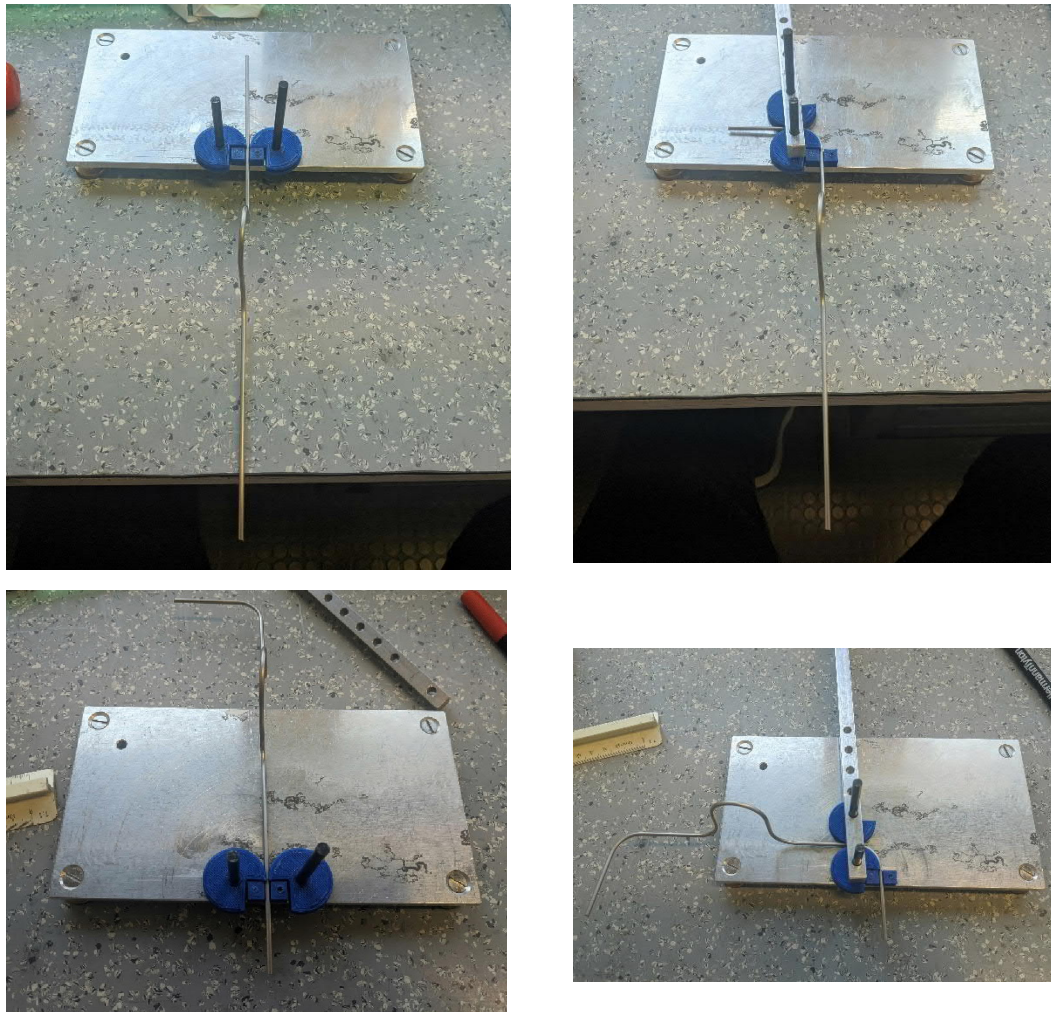


Figura 44. Proceso de doblado del tubo de conexión entre evaporadores y colector de salida.

Este apartado está ampliado en mayor medida en el Anexo C, el cual se compone del paper oficial que escribí para el CERN “Work procedure for CMS Outer Tracker CO2 Cooling – TB2S Manifold Test – Tubes Bending”.

3.5. Pruebas de fugas de los subconjuntos

En este apartado se continúan describiendo las pruebas de fuga de los diferentes subconjuntos del experimento. Estas pruebas componen los objetivos específicos de fabricación 1.1. y 1.2.

La prueba de fuga de helio se realiza con la siguiente máquina:



Figura 45. Máquina de detección de fugas por helio.

La máquina utilizada es una adixen ASM142. Es una máquina muy sensible, capaz de detectar fugas de 10^{-8} mbar·l/s.

El principio de funcionamiento es simple. En el detector se encuentra una bomba de vacío. La tubería se conecta por un extremo al detector de helio, y las otras salidas que tuviera el subconjunto se bloquean. Para el bloqueo se utilizan tapones en las uniones roscadas, y tapones de latón soldados en las uniones que luego serán soldadas en el proceso de ensamblaje.

El detector genera vacío en la tubería. A continuación, se distribuye helio a lo largo de la tubería. En caso de una grieta existente, la máquina succionará ese helio y por tanto lo detectará. En la siguiente figura se esquematiza el proceso.

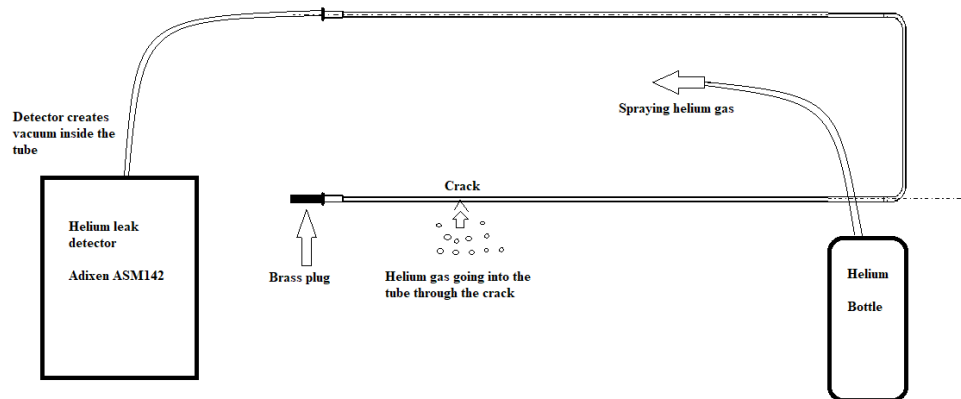


Figura 46. Proceso de detección de fugas con helio.

Se realiza este test de fuga de helio a los diferentes subconjuntos del proyecto:

- Los evaporadores fueron probados en el montaje que se ve en la siguiente figura:



Figura 47. Prueba de fuga de helio de los evaporadores.

Es una caja hecha con perfiles Bosch, con varios soportes diseñados en impresora 3D para albergar los tubos de uno en uno. Estos se conectan a la manguera mediante unos conectores de compresión de 4mm de Swagelok. En el otro extremo de los tubos se conecta un tapón metálico de 6mm también de Swagelok. Todo esto se puede observar en la siguiente figura:



Figura 48. Detalle del montaje para la prueba de fuga de helio de los evaporadores.

Para el colector de entrada se procede de una forma distinta. En primer lugar, se le conecta la tubería de entrada con su conexión VCR. Posteriormente se han cortado los tubos de conexión de Cu-Ni que se convertirán en los tubos de conexión de los precalentadores (preheaters).

Este tubo de conexión es soldado a la salida de cada uno de los capilares. Es una soldadura blanda, que se explica con más detalle en el apartado de ensamblaje. Al final de estos tubos se suelda también un tapón de latón, de unos 2 centímetros de largo y unos 4 milímetros de diámetro externo. De esta forma, los tubos quedan bloqueados y el test puede llevarse a cabo. En las siguientes imágenes se aprecia mejor el set up de la prueba:



Figura 49. Montaje para la prueba de fuga de helio del colector de entrada.

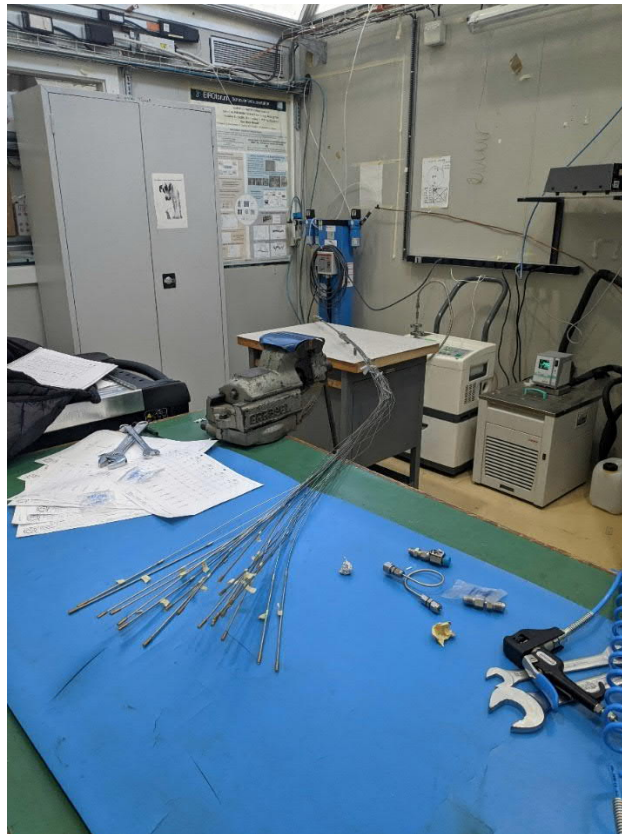


Figura 50. Detalle de los tubos de conexión y tapones de latón para la prueba de fuga de helio del colector de entrada.

El colector de retorno es el último subconjunto que debe pasar la prueba de fugas. Este tubo de 8x6mm de diámetro tiene 17 uniones T de soldadura de tubo a tope de 8mm OD y 2,5mm OD, así como 4 uniones T de soldadura de tubo a tope 8mm OD modelo Swagelok 316L-8MTB7-3.

Estas uniones en T deben ser bloqueadas de forma estanca para proceder con el test. En el caso de las 17 uniones microfittings, se logra la estanqueidad con unos pequeños cilindros de latón, mecanizados a 2,4mm de diámetro y soldados con estaño. Para el segundo tipo de conector anteriormente mencionado, se utilizan unos tapones Swagelok metálicos de 1/8" rosca gas, que junto con unas arandelas en cobre logran ese sellado estanco.

En la siguiente imagen se observa el montaje llevado a cabo para la prueba:

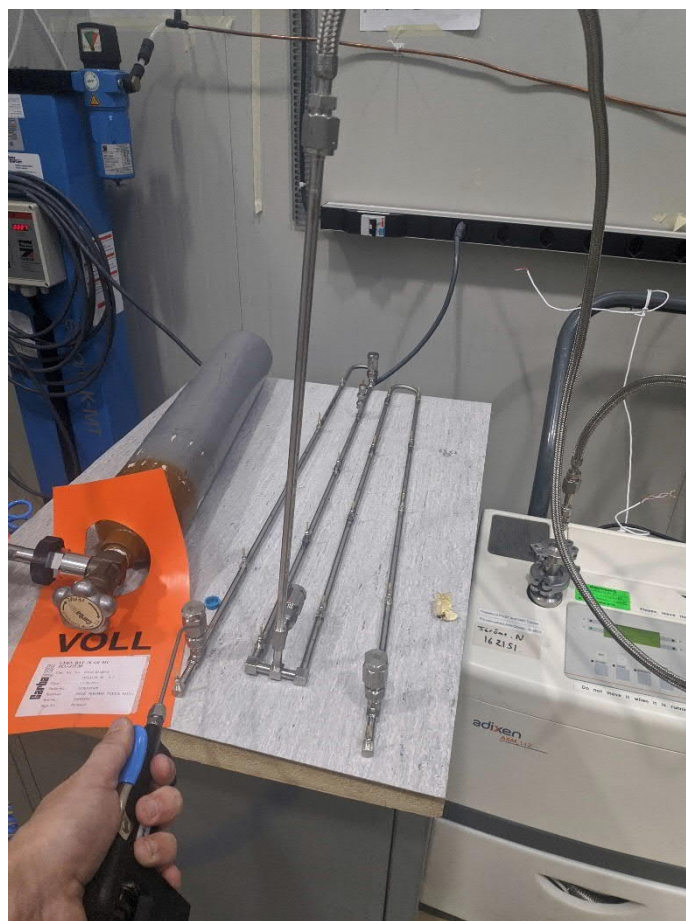


Figura 51. Montaje para la prueba de fuga de helio del colector de retorno.

3.6. Pruebas de alta presión de los subconjuntos

Estas pruebas son llevadas a cabo por un equipo específico del CERN, encargado de la seguridad.

Se realizan en un búnker destinado a ello con aire comprimido, de acuerdo con el siguiente procedimiento basado en la norma EN 13445:

Etapas	Tiempo (mins)	Porcentaje	Bares
Periodo de vigilancia mantenida para detección visual de fugas	10	25% PS	32.5
Periodo de vigilancia mantenida con el manómetro desde una distancia/posición segura	5	50% PT	93
Periodo de vigilancia mantenida con el manómetro desde una distancia/posición segura	5	60% PT	111.6
Periodo de vigilancia mantenida con el manómetro desde una distancia/posición segura	5	70% PT	130.2
Periodo de vigilancia mantenida con el manómetro desde una distancia/posición segura	5	80% PT	148.8
Periodo de vigilancia mantenida con el manómetro desde una distancia/posición segura	5	90% PT	167.4
Periodo de vigilancia mantenida con el manómetro (Standard en el CERN) desde una distancia/posición segura	30	100% PT	186

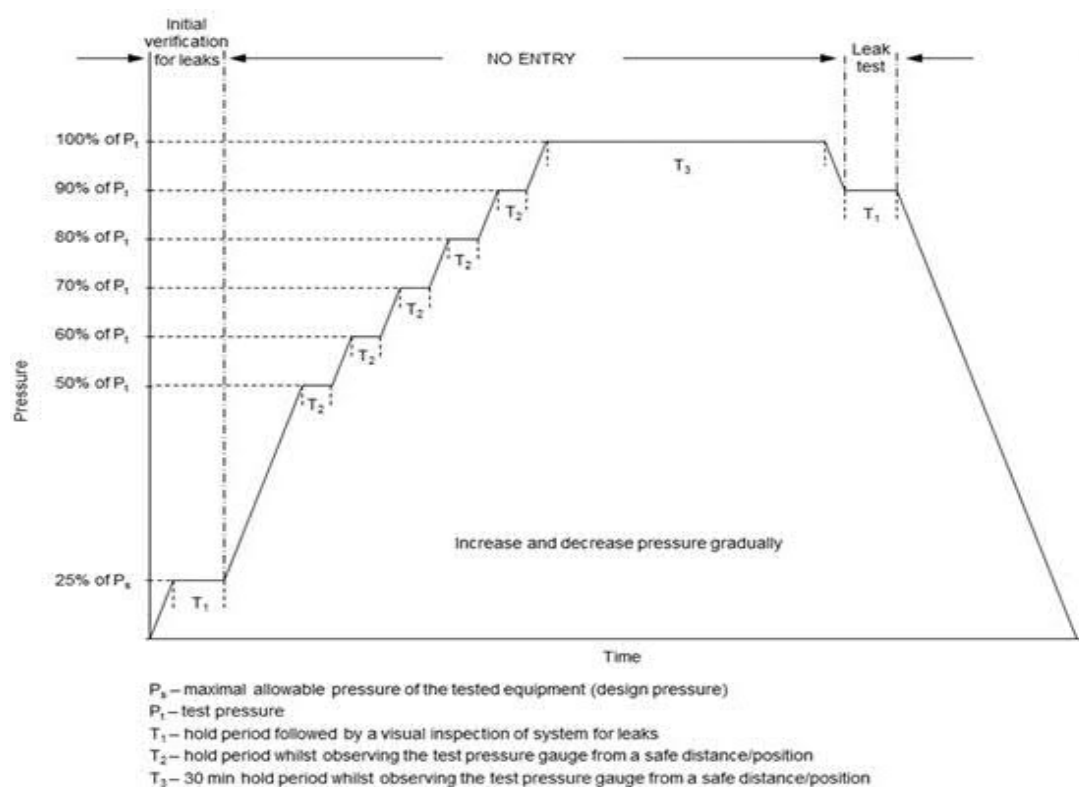


Tabla 6. Protocolo de presurización para pruebas de alta presión.

El sistema de control utilizado para estas pruebas se puede observar en la siguiente imagen:



Figura 52. Sistema de control para la prueba de resistencia a alta presión.

Mediante este sistema se realizan las pruebas a los subconjuntos desde una habitación contigua al bunker.

Durante la primera etapa del protocolo, el subconjunto se presuriza al 25% de la presión de diseño, y se efectúa un control visual de fugas. Para asegurar la estanqueidad de conjunto de tubos se utiliza un líquido detector de fugas.

Este líquido genera unas burbujas en presencia de una fuga, permitiendo así apretar cualquier unión que no sea estanca, como se puede ver en la siguiente imagen del colector de entrada:

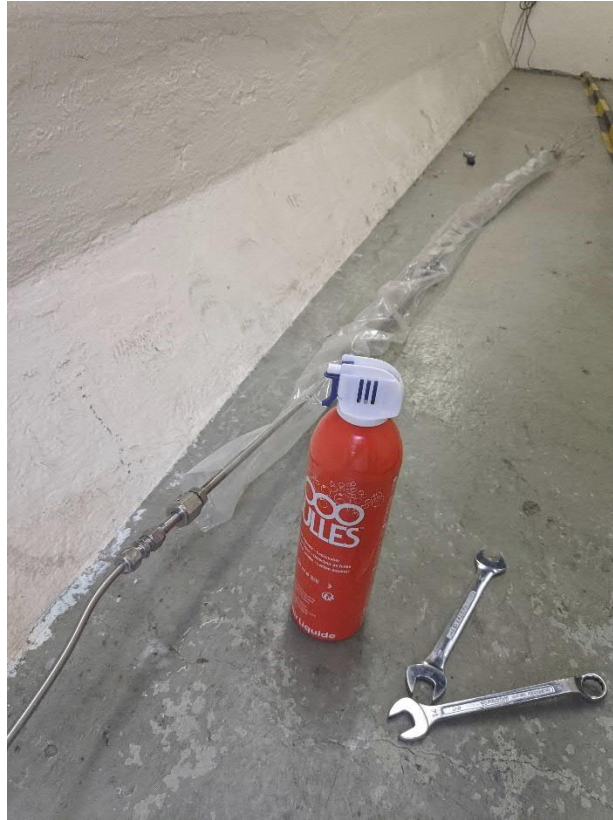


Figura 53. Prueba a alta presión del colector de entrada.

Los resultados de estas pruebas se detallarán más adelante en la sección “Resultados” de este TFM.

3.7. Ensamblaje

En este momento se pasa al ensamblaje del conjunto experimental. Éste comienza con el montaje de la estructura.

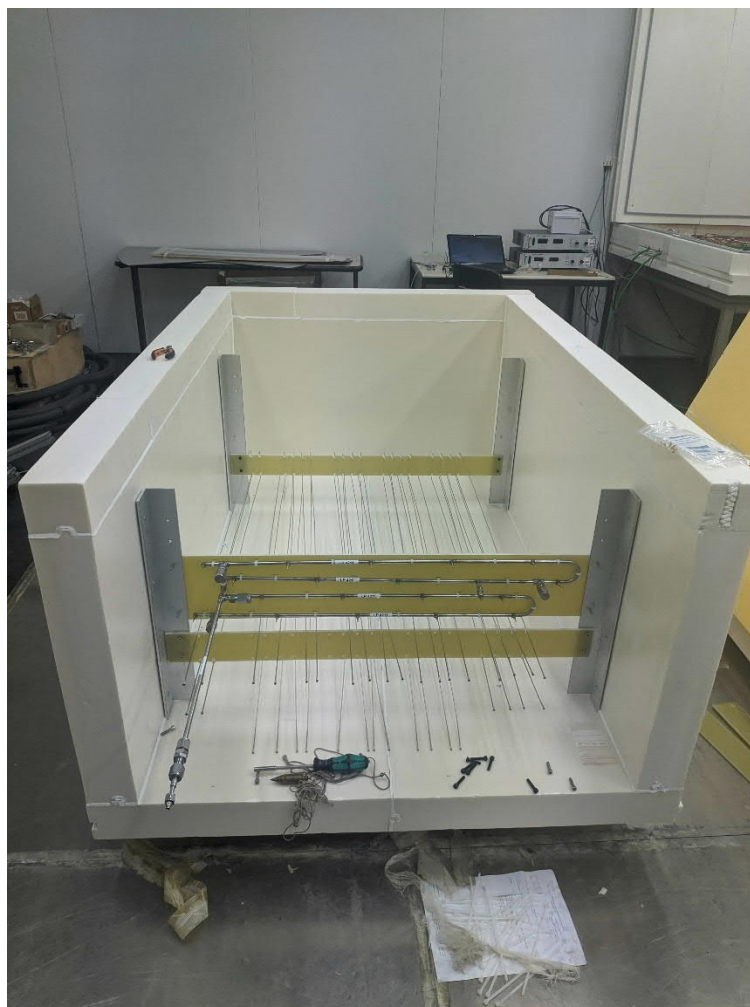


Figura 54. Montaje de la estructura del conjunto experimental.

La estructura se compone de una caja de espuma de fibra de vidrio Swisspor XPS 300. Se pretende crear un espacio totalmente aislado y adiabático con respecto al exterior, de ahí la selección de este material.

A esa caja se le añaden 4 perfiles en L de aluminio atornillados. Los perfiles se atornillan utilizando unos tacos autorroscantes de nylon de la marca DeWalt (DFM4120000).

Estos tacos son atornillados a la espuma de la caja y retirados a continuación. De esa forma el agujero es rellenado con pegamento epoxy y el taco vuelve a introducirse. Tras un día de secado el taco está totalmente adherido al interior de la espuma y los perfiles pueden ser atornillados.

Anclados a los perfiles se colocan 5 placas de fibra de vidrio (G10). Se colocan tres placas delante, que sostendrán ambos colectores, así como todo el conexionado de los tubos. Las dos placas traseras se encargarán de sostener el final de los evaporadores.

El G10 es un material muy resistente y no conductor, por lo que es perfecto para realizar este trabajo.

Llegados a este punto se coloca en posición el colector de retorno. Para ello se utiliza la placa central delantera.

La forma de amarre es muy simple y efectiva. Se utilizan unas bridas para sostener con garantías a todo el colector.



Figura 55. Bridas para amarrado.

Con unos agujeros en la placa de G10 y haciendo pasar unas bridas es más que suficiente para el amarrado del colector. Las bridas deben tener un fuerte apriete, que se consigue con la siguiente herramienta:



Figura 56. Pistola para bridas.

El resultado puede observarse en la siguiente imagen:



Figura 57. Ensamblaje del colector de retorno.

A continuación, se prosigue con el montaje de la mitad inferior del conjunto, comenzando por los evaporadores. Para ello se colocan los tubos alrededor de las dos placas inferiores de G10 y nuevamente se atan con bridas.

Entonces, se comienza el soldado de los tubos de conexión. Una vez ya están doblados, se procede a la soldadura con estaño de ellos.

En la siguiente imagen se puede apreciar el método utilizado para realizar estas conexiones.



Figura 58. Soldadura blanda de los tubos de conexión.

Se desarrolla un procedimiento para este proceso de soldadura blanda. Se puede consultar en detalle en el Anexo D de este TFM.

Esta soldadura es verificada a continuación, soplando aire comprimido a través de la tubería de entrada, para ver que ninguno de los evaporadores ha quedado bloqueado.



Figura 59. Verificación de la soldadura blanda de los tubos de conexión.

Posteriormente se continúa con la instalación de los cables de potencia. Las condiciones reales del Layer 3 del TB2S del Tracker externo son que deberá disipar 160 W de energía por cada par de evaporadores. Por lo que la reproducción de esas condiciones se realizará mediante potencia eléctrica. Y para ello la propia tubería será utilizada como resistencia. Se colocarán tres pinzas de cobre al inicio, mitad y final para reproducir un circuito eléctrico que, de acuerdo con la resistencia del tubo de acero inoxidable, generará 80W por evaporador. Estos cables serán conectados a unas fuentes de alimentación que suministrarán esta potencia.

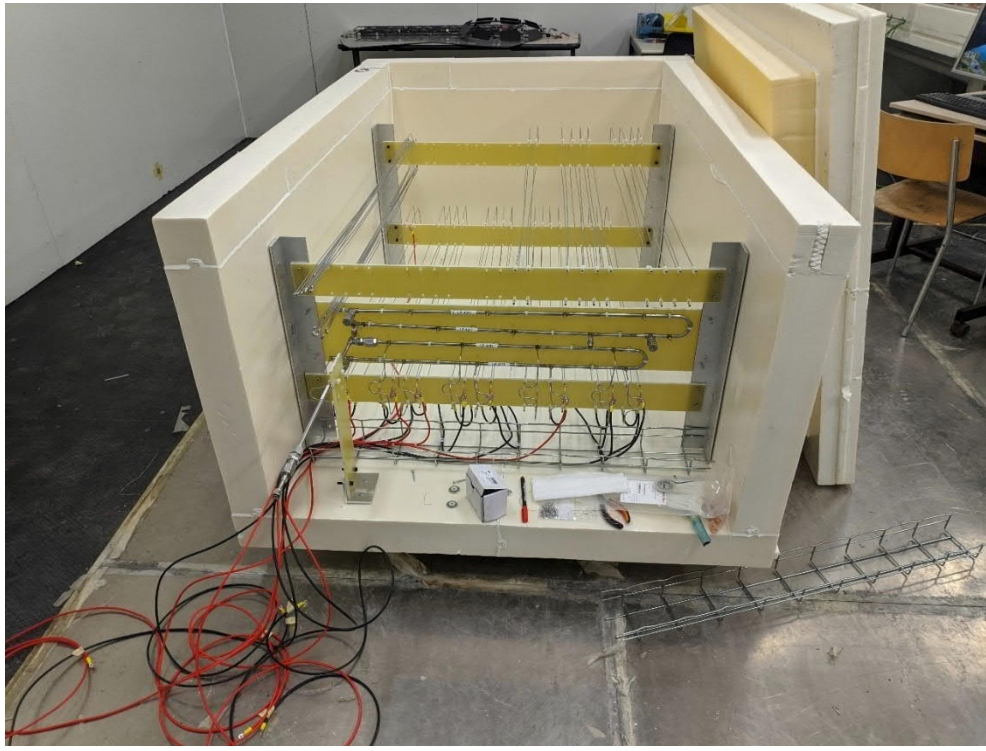


Figura 60. Instalación del cableado de potencia.

De la misma forma descrita se procede con la mitad superior hasta colocar en posición los 19 circuitos de refrigeración, ya que el procedimiento es el mismo, aunque no sean exactamente iguales (10 pares de evaporadores en la mitad superior, y 9 en la inferior).

El colector de entrada es el último subconjunto en ser montado. Esto se debe a que para este trabajo se requiere que todos los puntos de conexión estén definidos. Los capilares, debido a su geometría pueden enrollarse para alcanzar cada uno de esos puntos con exactitud.

Para tomar esas referencias se realizó un mapa de todos los puntos de conexión con tres folios en formato A3 como su puede observar en la siguiente imagen:

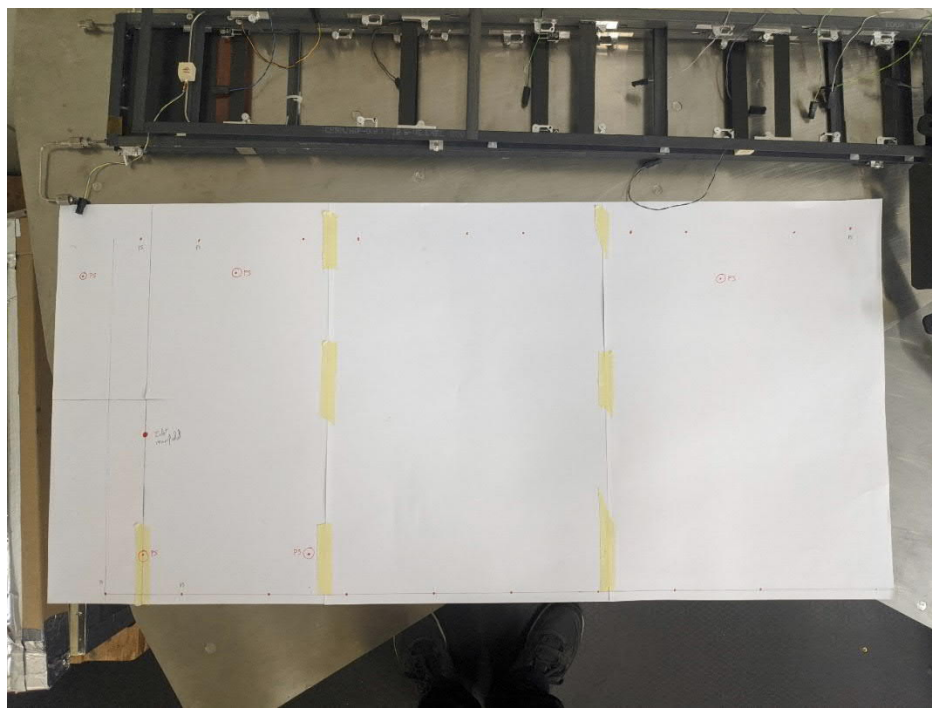


Figura 61. Mapa de conexiones del colector de entrada.

El plano de las conexiones es perpendicular al de la tubería de entrada. Por lo que el primer paso es un doblado a 90° de los 19 capilares, como se ve en la siguiente imagen.



Figura 62. Primer doblado de los capilares.

A continuación, se utiliza una herramienta diseñada específicamente para el enrollado de los capilares. La herramienta está formada por dos discos metálicos que deslizan uno sobre otro dando la forma circular al tubo. El giro se realiza con un brazo que incorpora

un muelle, por lo que por cada vuelta que se realiza el diámetro se incrementa, permitiendo que la siguiente vuelta vaya a continuación de la anterior.

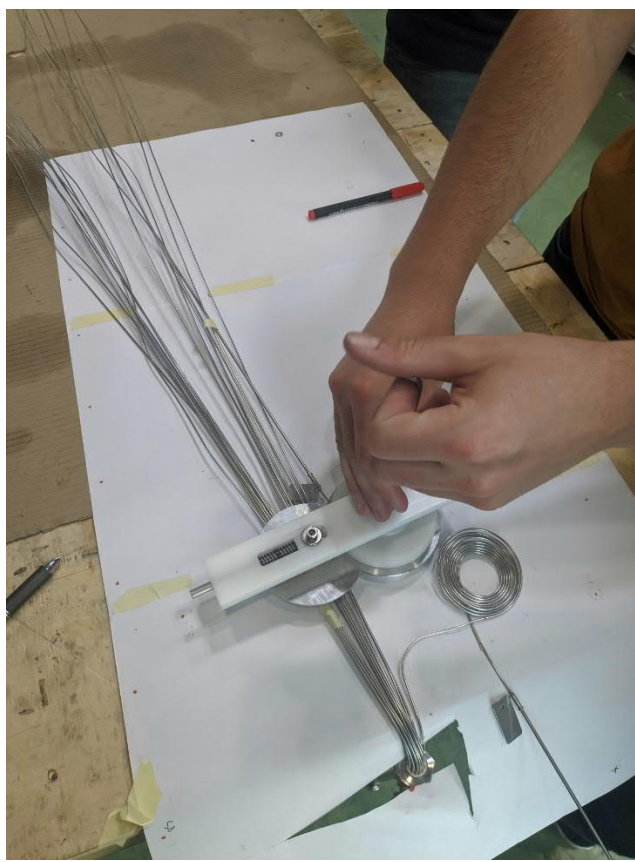


Figura 63. Enrollado de los capilares.

Cada capilar es enrollado a una distancia específica. De esta forma, cada tubo de conexión puede alcanzar el punto de conexión con los evaporadores correctamente. Este tubo de conexión deberá ser doblado a 90° posteriormente para seguir la misma dirección que los evaporadores.

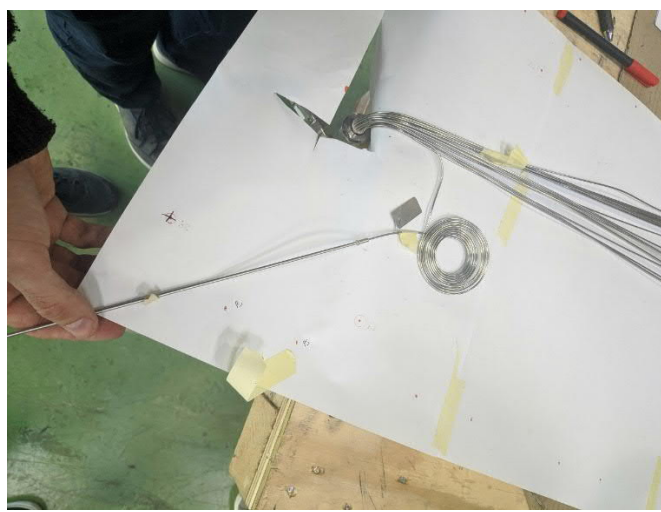


Figura 64. Resultado final del enrollado.

En la siguiente imagen se muestra el resultado final de los 19 capilares. Este apartado se encuentra más detallado en el Anexo C de este TFM, “Work procedure for CMS Outer Tracker CO2 Cooling – TB2S Manifold Test – Tubes Bending”.



Figura 65. Enrollado de los 19 capilares.

Después se realiza el doblado a 90° con la herramienta anteriormente utilizada para los otros tubos de conexión.

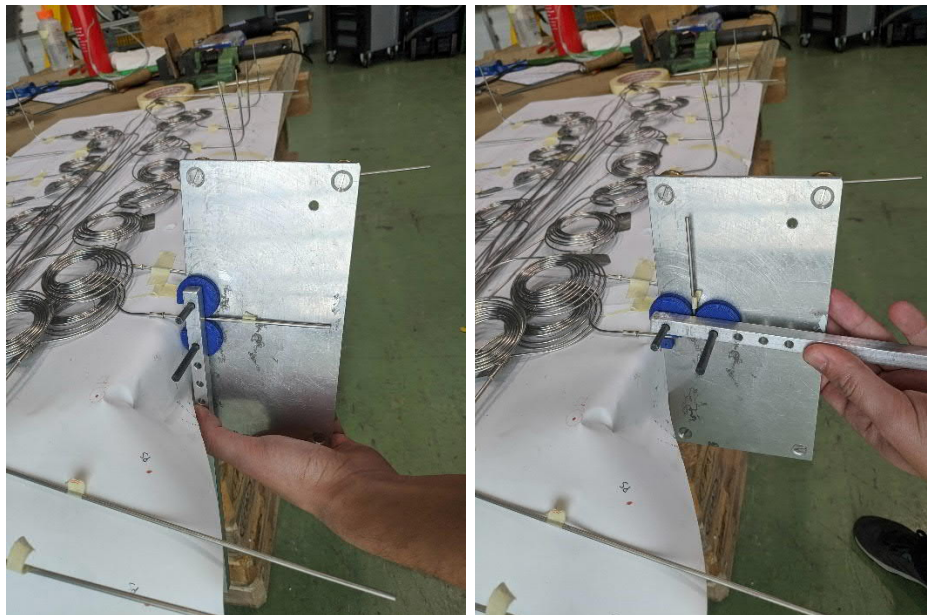


Figura 66. Doblado de los tubos para los preheaters.

El resultado final del subconjunto puede apreciarse en la siguiente imagen:

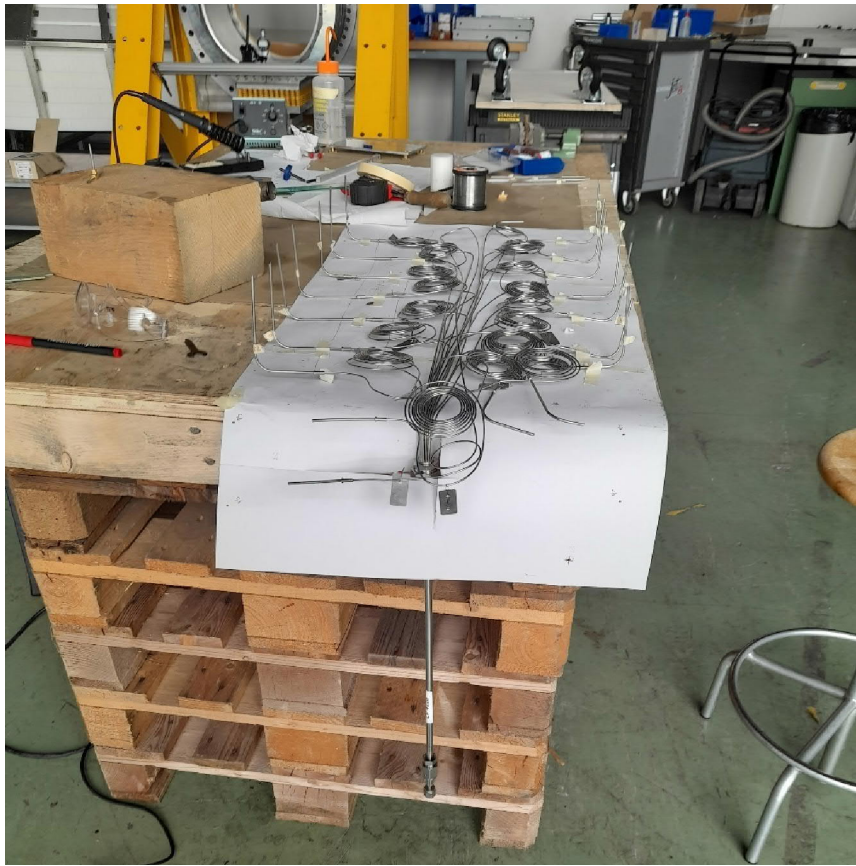


Figura 67. Resultado final del doblado de los tubos para los preheaters.

Se incorporarán sensores de presión en 5 evaporadores concretos. Esto es importante, ya que nos permitirá medir la presión en los evaporadores que están al comienzo y al final del colector de retorno, para así comprobar si existe alguna diferencia entre ellos.

Los datos recogidos con estos sensores se utilizarán para la consecución de los objetivos de este TFM.

Para la instalación de estos sensores, se suelda un conector de latón en T que permite la entrada del CO₂, la salida hacia el evaporador, y otra salida al sensor de presión.

Para ello se idea un sistema como el que se aprecia en la siguiente imagen:



Figura 68. Instalación de los conectores en T.

De una forma similar se incorpora un adaptador para un conector de compresión que sostenga el sensor de presión.

En la imagen mostrada a continuación se puede observar el proceso de soldadura del adaptador, y también un ejemplo ya terminado:



Figura 69. Instalación del adaptador para el sensor de presión.

Para terminar, se coloca el colector de entrada en su posición final en el conjunto experimental. Se sujeta al soporte de G10 con bridas, y se terminan de realizar las soldaduras de los tubos de conexión.

Se comprueba mediante aire comprimido que ninguno de los tubos está bloqueado, y se procede al cierre de las salidas de los sensores de presión.

Se deben bloquear para así realizar el último test de fugas y el test final de presión a 186 bares, que nos asegurará que los procesos utilizados son válidos para la producción real.

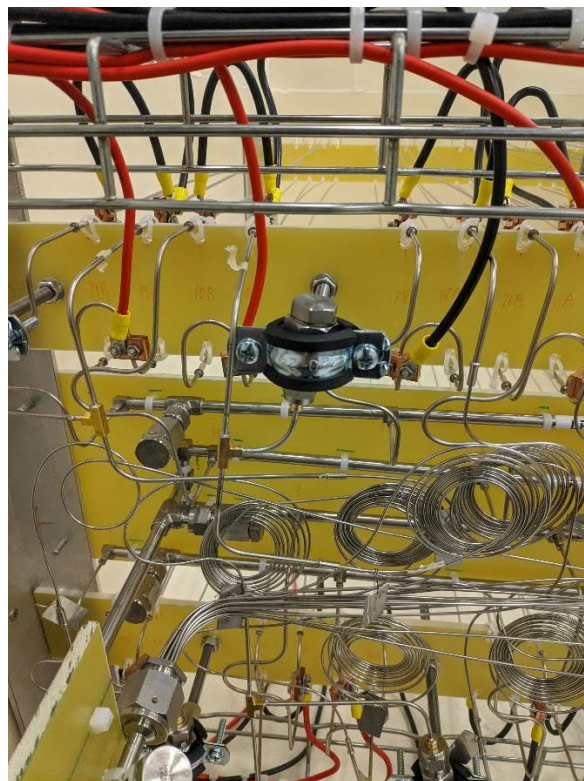


Figura 70. Detalle de los conectores para los sensores de presión.

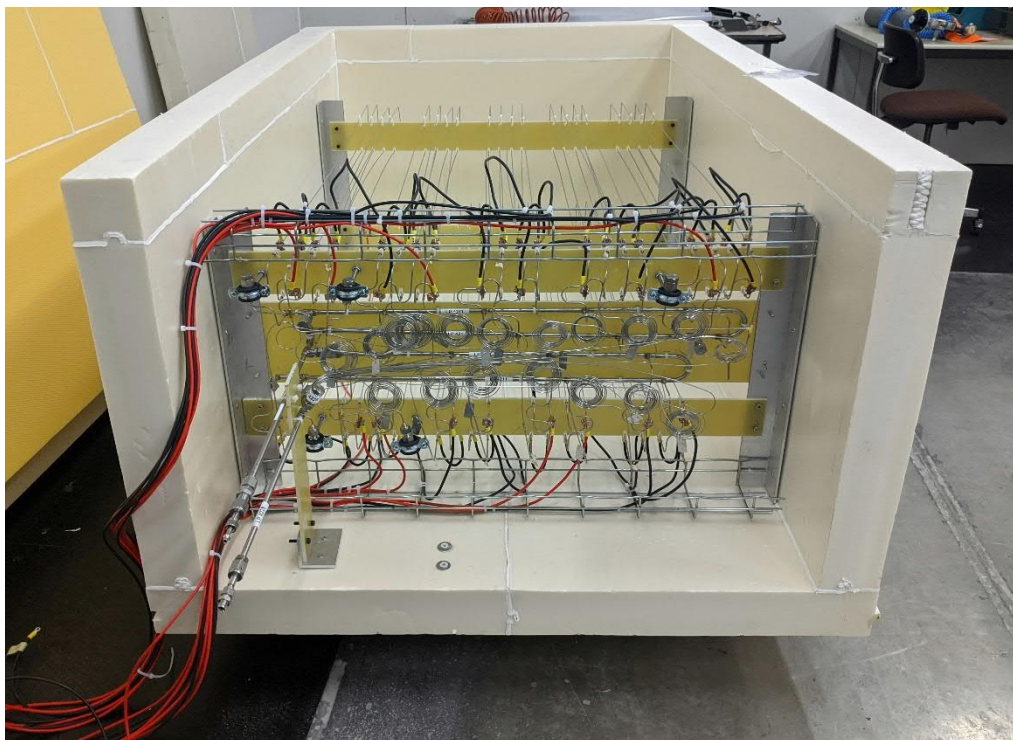


Figura 71. Resultado final del conjunto experimental.

Paralelamente se ha construido el panel frontal de la caja del conjunto. Se le realizan los agujeros pertinentes para que permita el paso de las tuberías de entrada y salida, así como el cableado.

Además, este panel se divide en dos mitades. La inferior es fija y la superior desplazable, para de esta forma poder acceder al conjunto experimental si fuera necesario.

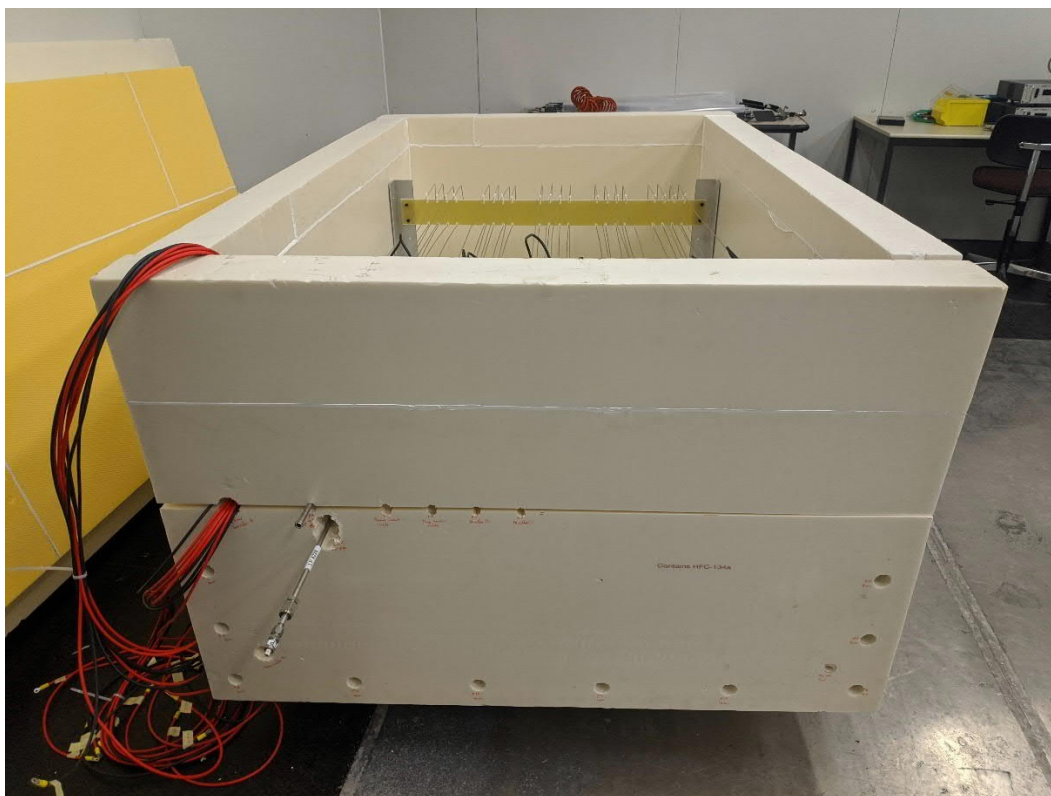


Figura 72. Conjunto experimental con panel frontal montado.

3.8. Prueba de fugas del conjunto final

Las dos últimas acciones por realizar para dar por concluida la fabricación del test son las pruebas de fugas.

En primer lugar, se lleva a cabo la prueba de fugas con helio. Se realiza de la misma manera que las pruebas de los subconjuntos.

Utilizando el mismo detector se conecta a la tubería de entrada, produciendo el vacío en todo el sistema. Este paso es el más crítico para la validación del sistema, ya que hay que generar vacío en todo el volumen del test. A mayor volumen, mayor dificultad para generarlo, ya que cualquier mínima fuga o no estanqueidad impedirá que el detector pueda provocar el vacío en todo el sistema.



Figura 73. Prueba de fuga con helio del conjunto experimental.

El último paso para completar el montaje del experimento es la prueba de fugas a alta presión de todo el conjunto.

Por el tamaño del conjunto experimental, la prueba no puede ser llevada a cabo en el búnker, por lo que se realiza en la cámara frigorífica donde se han llevado a cabo los trabajos de montaje y por seguridad, fuera del horario laboral.

Se sigue el mismo protocolo de presurización que con las pruebas de los subconjuntos (véase Tabla 6).

En este caso la prueba se lleva a cabo con un gas inerte como el Argón. Por lo que se conecta una botella de Argón comprimido de 200 bares al conjunto experimental, como se observa en las siguientes imágenes:



Figura 74. Prueba de fugas a alta presión del conjunto experimental.



Figura 75. Detalle de la conexión entre la botella de Argón y el conjunto experimental.

Los resultados de esta prueba, al igual que los de la anterior, se detallan en el siguiente apartado de Resultados de este TFM.

3.9. Instrumentación y toma de medidas

Debido a la finalización de mi estancia en el CERN, este conjunto experimental y test fue instrumentado y operado por los compañeros Thomas French (CERN), Francesco Bianchi (Universita e INFN, Perugia) y Dominik Jakub Golyzniak (Cracow University of Technology).

Se describirá brevemente la continuación del experimento, mencionando en la bibliografía la fuente para consultar de forma más detallada esta última parte.

Para la adquisición de datos, se instala un sistema MTRS, que automatiza esta adquisición con un software específico y un sistema de buses.

Por otro lado, utilizando el cableado de potencia previamente instalado, se conectan 5 fuentes de alimentación que proveen las condiciones de potencia reales al conjunto experimental. Este reparto se realiza de forma que 4 de ellas se conectan a los evaporadores y la restante alimenta a los preheaters.

También se instala un “interlock” o mecanismo de seguridad, que cortará toda alimentación en caso de un dry-out.

El dry-out ocurre cuando el CO₂ no tiene capacidad para continuar refrigerando el sistema, y pasa de un estado de dos fases a gas. En ese momento la temperatura seguirá aumentando en todo el circuito, y el interlock actuará a los 70°C para proteger al conjunto experimental.

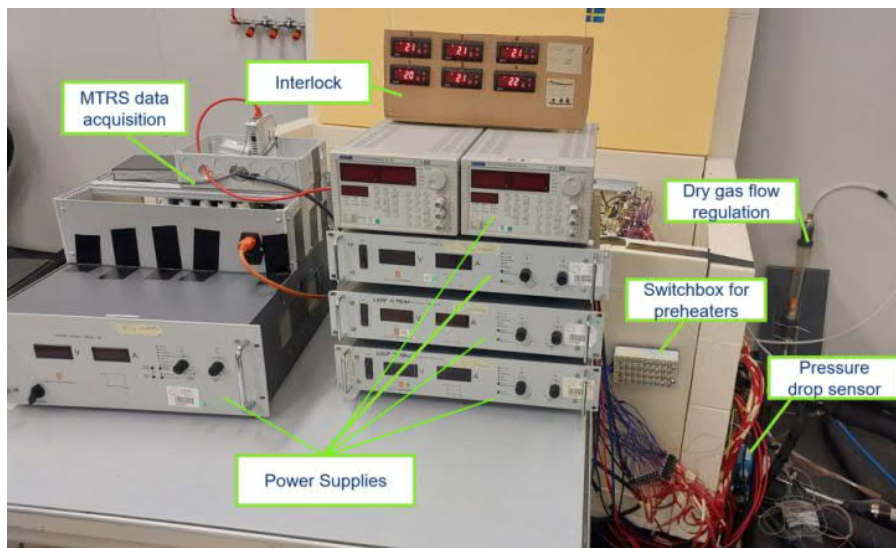


Figura 76. Equipo para la toma de datos del conjunto experimental. ^[16]

La toma de temperaturas se realiza mediante unos sensores PT1000 en los evaporadores. Se colocan 7 en cada par de evaporadores a unas distancias específicas y constantes, para así poder comparar cada uno de los circuitos con un mismo estándar.

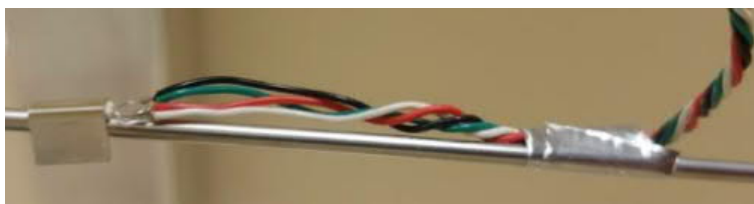


Figura 77. Sensores de temperatura PT1000 sobre los evaporadores. ^[17]

En la siguiente imagen se puede observar el estado final de la instrumentación, con todos los PT1000 conectados a los buses, así como los sensores de presión.

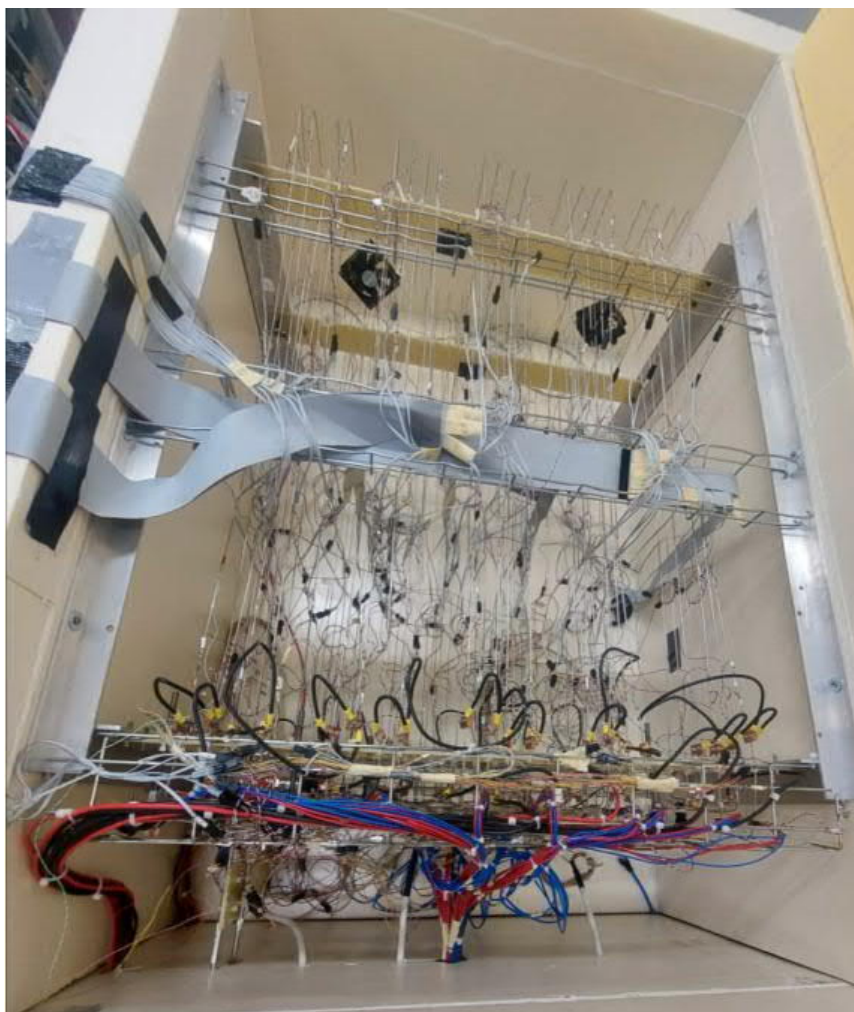


Figura 78. Instrumentación del conjunto experimental. ^[18]

De igual manera, se adjunta a continuación se adjunta el mapa de alimentación y sensorística para todo el conjunto experimental.

TB2S manifold test setup sensors and power scheme

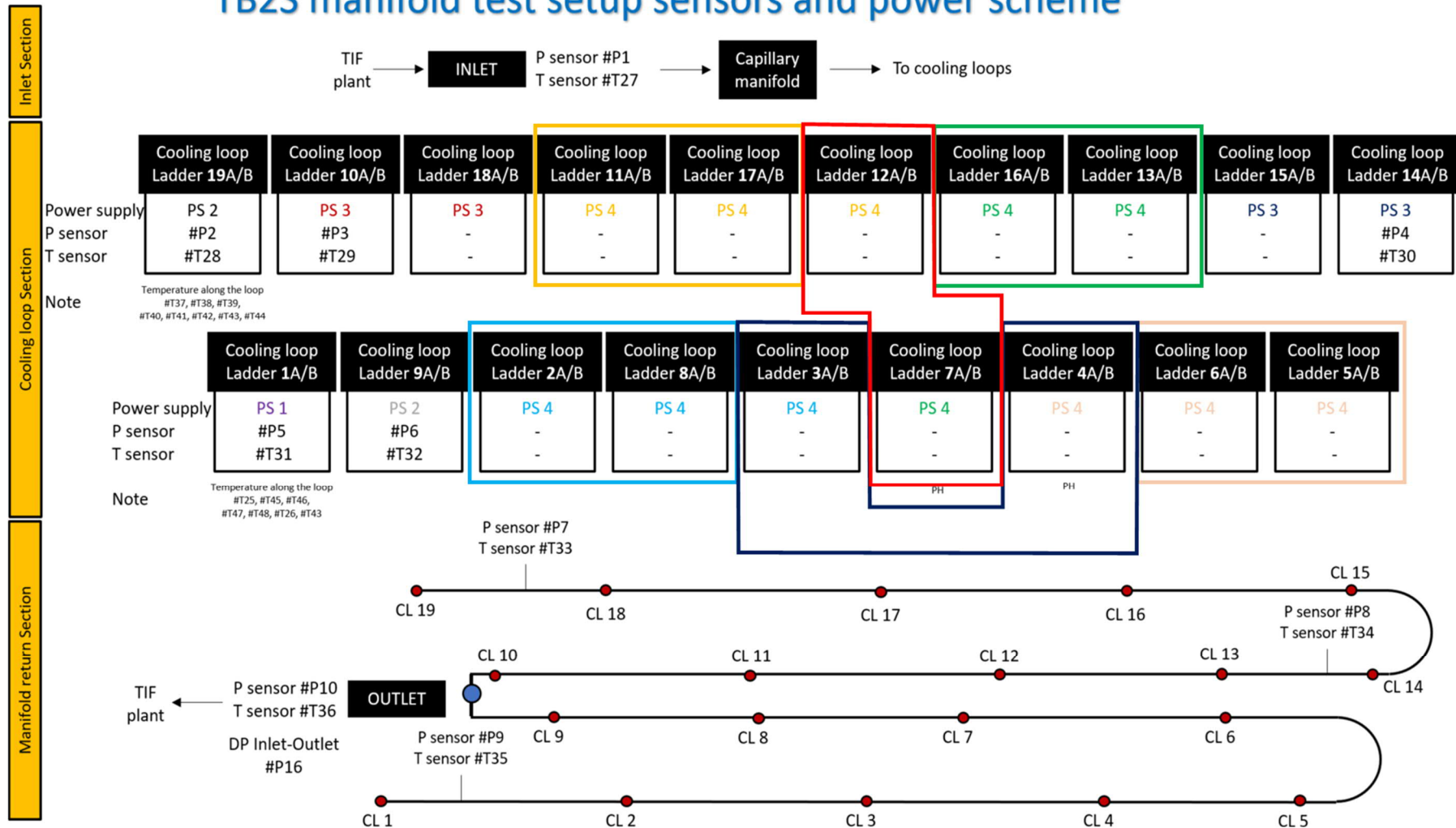


Figura 79. Esquema de alimentación y sensorística del conjunto experimental. [19]

El esquema de alimentación se detalla en mayor medida en la siguiente figura:

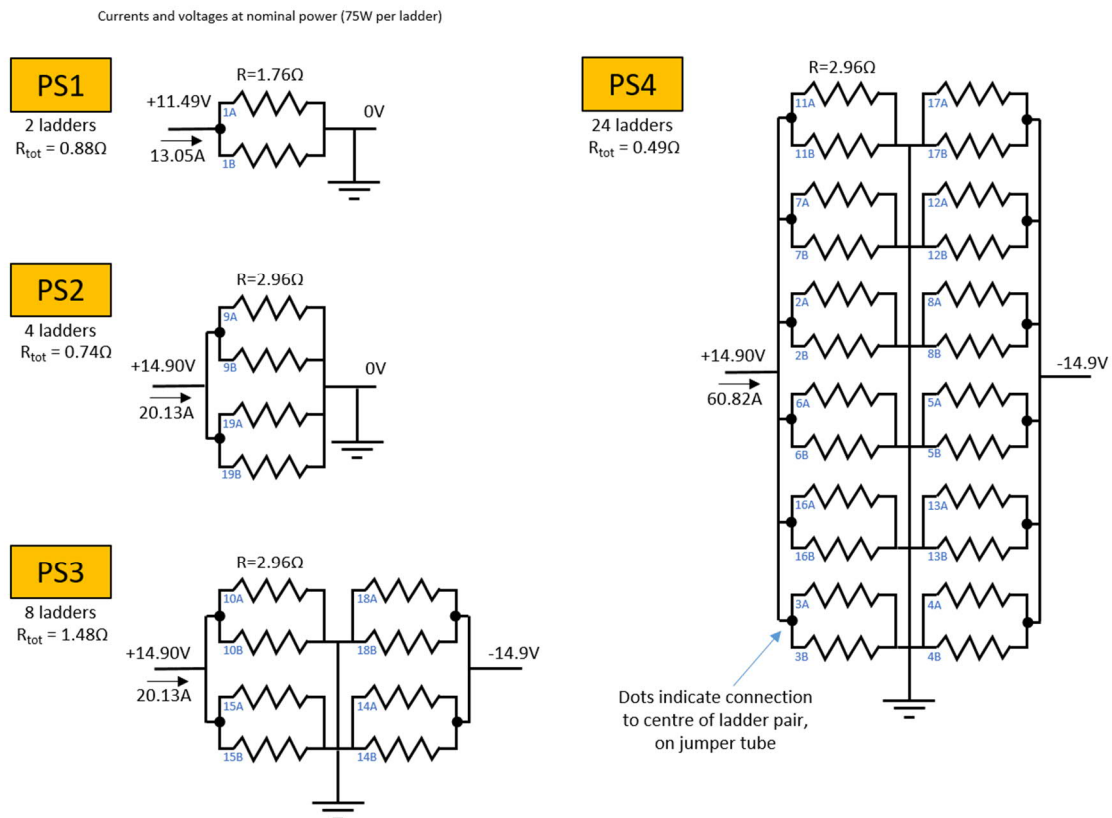


Figura 80. Esquema de alimentación del conjunto experimental. ^[20]

Como se observa en la figura 80, en todos los casos se ha calculado la tensión y la intensidad circulante para que la potencia disipada por cada par de evaporadores sea de aproximadamente los 160W nominales.

4. Resultados

4.1. Objetivos específicos de fabricación

4.1.1. Prueba de fugas de helio de los subconjuntos

El primero de los objetivos específicos de fabricación de este TFM se compone de las pruebas de fuga de helio de los tres subconjuntos (colector de entrada, de salida y evaporadores).

Comenzando por los evaporadores, el resultado de ellos fue positivo. Para el proyecto se necesitaban 38 evaporadores (19 circuitos de dos evaporadores cada uno).

Se doblaron 40 tubos para este propósito, y 38 pasaron los requerimientos. El límite admisible para cualquier tubo o sistema en CMS es de $10^{-8} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$. ^[21]

Esta prueba permitió rechazar dos tubos, los cuales tenían fugas en la propia sección recta del tubo. Por otro lado, los restantes 38 pasaron el test, con resultados como el visible en la siguiente imagen.

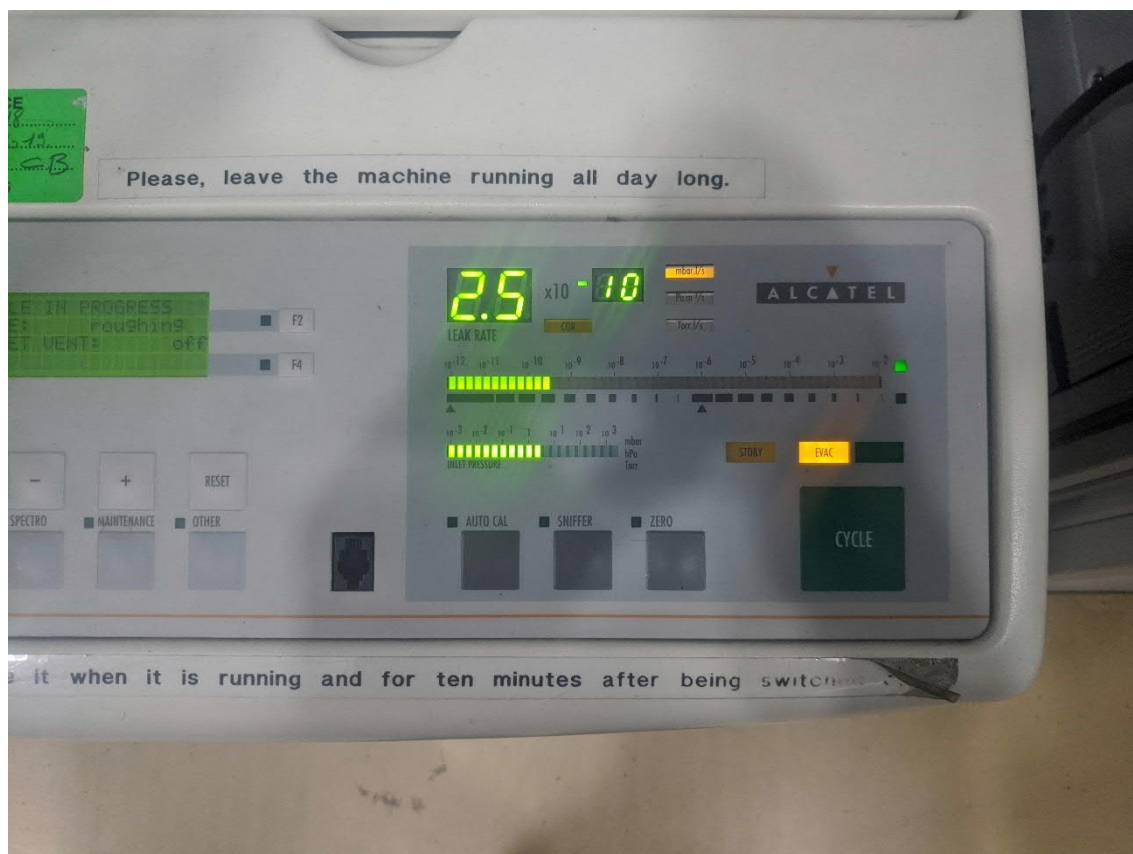


Figura 79. Resultado de la prueba de fugas de helio de los evaporadores.

El segundo resultado es el de la prueba del colector de entrada. Este también superó la prueba al mostrar un nivel bastante inferior al límite, como se puede observar en la siguiente imagen.



Figura 80. Resultado de la prueba de fugas de helio del colector de entrada.

Por último, el colector de salida superó igualmente la prueba de fugas con el resultado mostrado a continuación.



Figura 81. Resultado de la prueba de fugas de helio del colector de salida.

4.1.2. Prueba de fugas de alta presión de los subconjuntos

Como se detalló en el punto 3.6., los subconjuntos se sometieron a pruebas de fuga a una presión de 186 bares, para su validación en CMS. ^[21]

Esta prueba se llevó a cabo únicamente en los colectores de salida y entrada. Los evaporadores no se probaron por la imposibilidad de realizar 38 pruebas de 2 horas cada una.

Ambos subconjuntos pasaron la prueba de forma satisfactoria. El colector de entrada arrojó la siguiente gráfica:

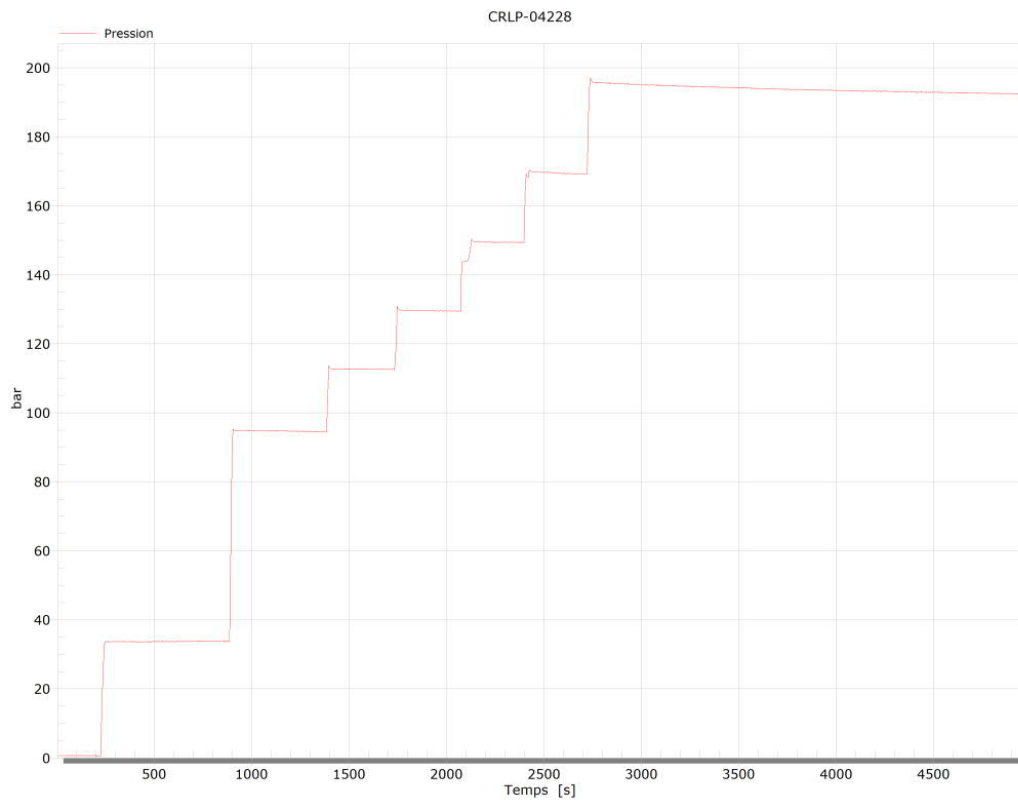


Figura 82. Resultado de la prueba de fugas de alta presión del colector de entrada.

Y durante la prueba del colector de salida se recogieron los siguientes resultados:

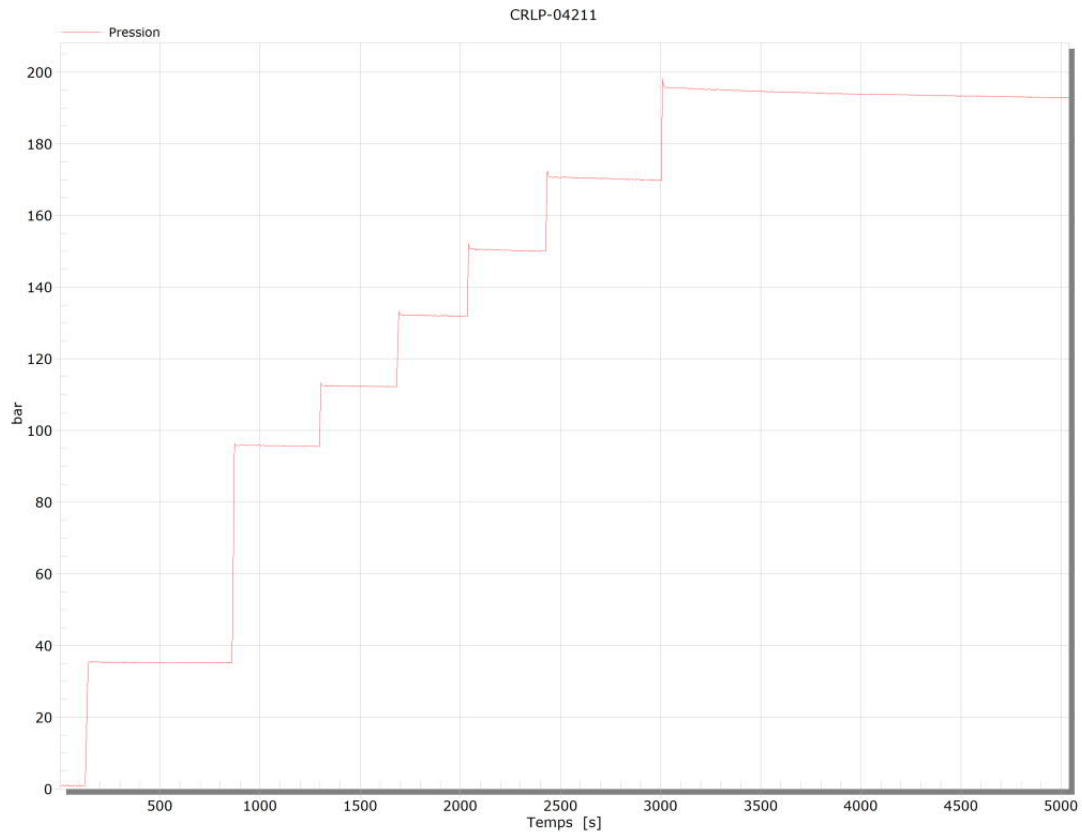


Figura 83. Resultado de la prueba de fugas de alta presión del colector de salida.

En ambos casos se observa que, en el último tramo a 186 bares, ninguno de los colectores muestra fuga alguna mediante una caída en la presión manométrica.

Ambos reportes se adjuntan en el Anexo E de este TFM. ^{[22 [23]}

4.1.3. Prueba de fugas de helio del conjunto experimental

El conjunto experimental completo fue sometido a una prueba de fuga de helio después del ensamblaje final, tal y como se ha descrito en el apartado 3.8.

El resultado de la prueba fue positiva también. El valor de la prueba puede observarse en la siguiente imagen:



Figura 84. Resultado de la prueba de fugas de helio del conjunto experimental.

4.1.4. Prueba de fugas de CO₂ del conjunto experimental

Debido a que esta prueba es menos sensible que la prueba de fuga de helio y a la cercana finalización de mi contrato se decidió no llevar a cabo esta prueba.

4.1.5. Prueba de fugas de alta presión del conjunto experimental

Por último, el conjunto experimental superó la prueba de fugas de alta presión llevada a cabo in-situ.

El reporte oficial de la prueba es adjuntado de igual forma en el Anexo E. ^[24]

4.2. Objetivos específicos térmicos

Las pruebas con el conjunto experimental se llevaron a cabo entre el 28 de noviembre de 2022 y el 09 de diciembre del mismo año.

En total se generaron más de 48800 líneas de datos que han permitido dar respuesta a los objetivos planteados al inicio de este TFM.

4.2.1. Caída de presión entre entrada y colector de salida

El primer objetivo térmico del presente trabajo quería comprobar que la caída de presión total del sistema se encuentra en los 10 bares de presión, como se observa en la siguiente imagen.

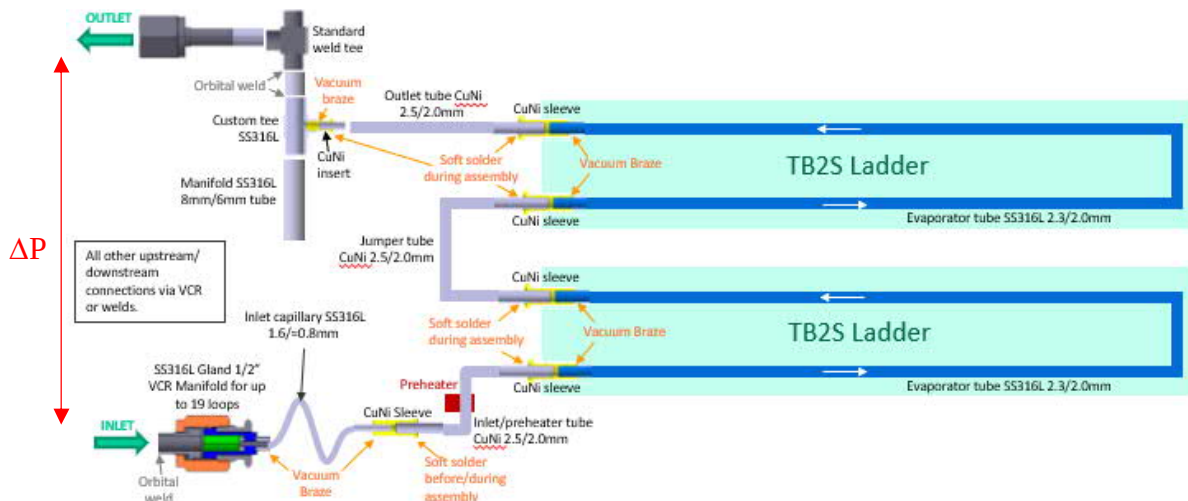
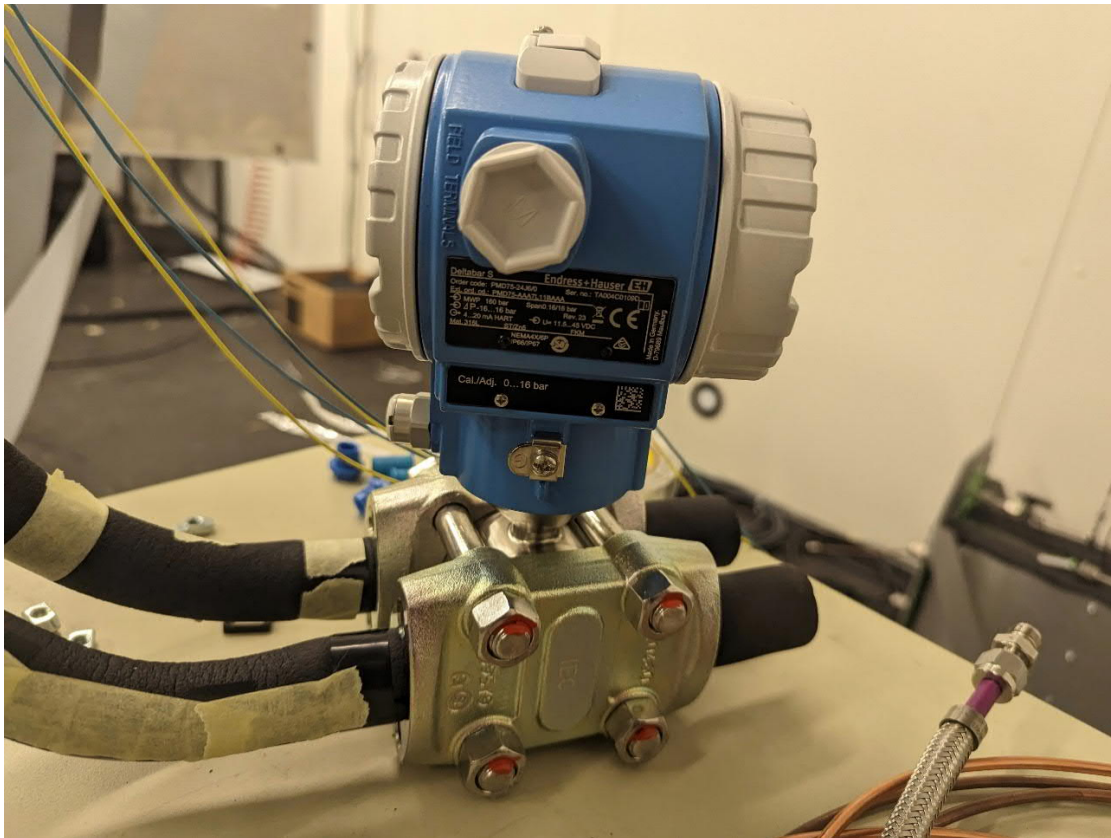


Figura 85. Esquema del primer objetivo térmico.

Para ello en el diseño del conjunto experimental se situó un sensor de presión en la tubería de entrada, y otro en la tubería de salida. Estos sensores están nombrados como #P1 y #P10 de acuerdo con el esquema de sensores de la Figura 79. De esta forma, podía determinarse la diferencia de presión entre ambos puntos.

Además, también se utilizó un sensor diferencial de presión como el mostrado en la siguiente imagen:



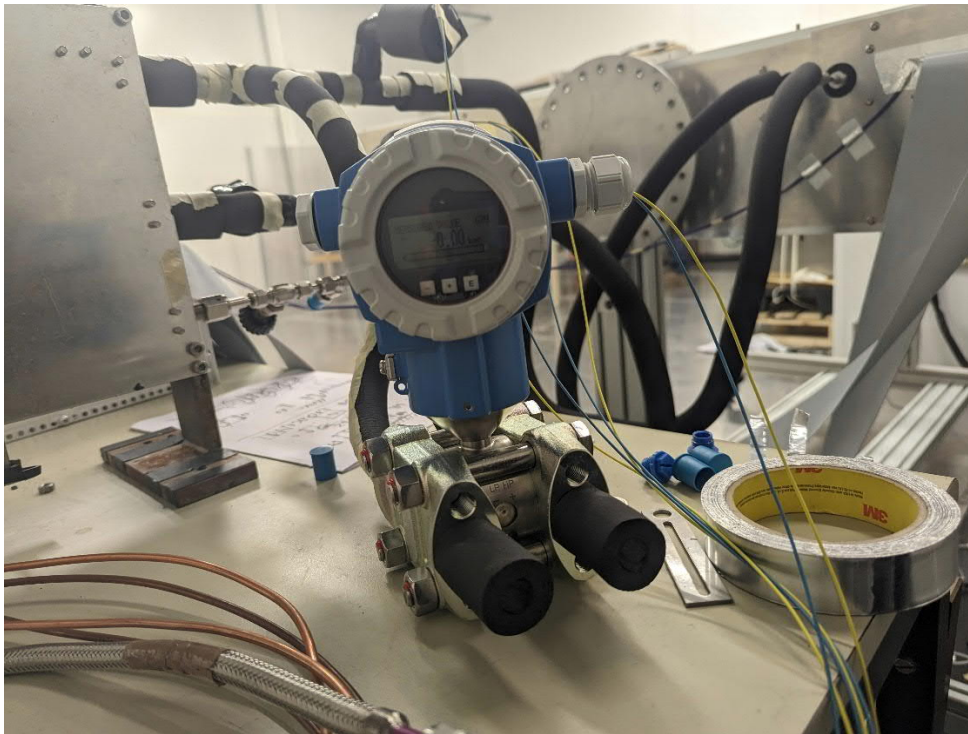


Figura 86. Sensor diferencial de presión utilizado durante el experimento.

El valor obtenido mediante el sensor diferencial de presión fue de 10,63 bares.

Las presiones obtenidas con los sensores de presión a lo largo de los puntos del circuito se pueden resumir en la siguiente tabla e imagen:

Pressures over the whole segment				
Cooling loop	Inlet (bar)	After capillary (bar)	Return Manifold (bar)	Outlet (bar)
CL1	24,21	15,05	13,95	13,75
CL9	24,21	14,81	13,75	13,75
CL10	24,21	14,94	13,75	13,75
CL14	24,21	14,84	13,82	13,75
CL19	24,21	14,83	13,92	13,75

Tabla 7. Tabla resumen de presiones a lo largo de los 5 cooling loops estudiados.

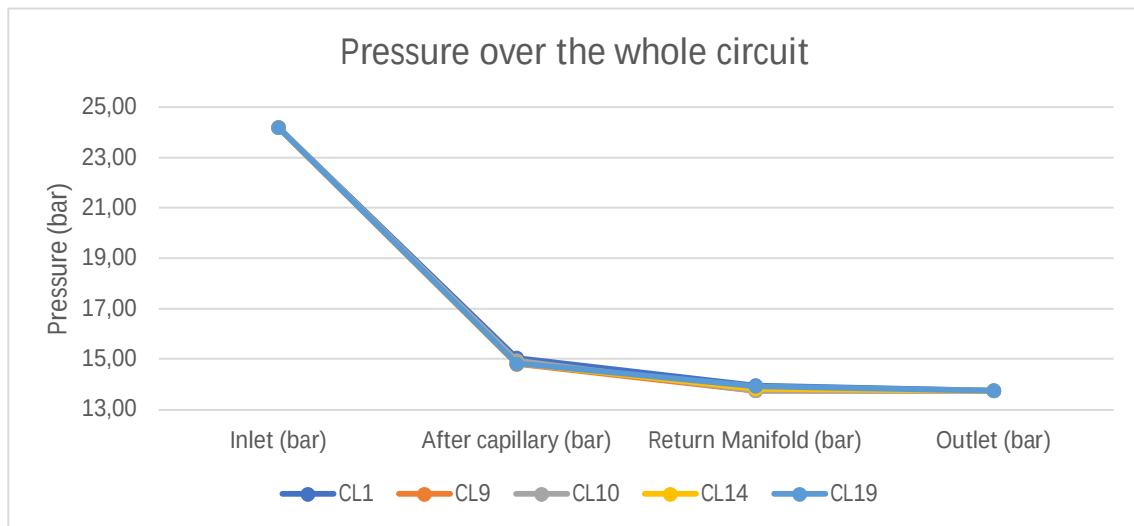


Figura 87. Presiones a lo largo de los cooling loops estudiados.

Tal como se muestra anteriormente el sensor de presión de la entrada registró un valor de 24,21 bares, mientras que en la salida fue de 13,75 bares.

$$\Delta P = 24,21 - 13,75 = 10,46 \text{ bares}$$

Ecuación 7. Caída de presión entre entrada y salida.

4.2.2. Título de vapor al comienzo del evaporador

El segundo objetivo térmico del presente trabajo está destinado a comprobar que el CO₂ ingresa en el evaporador en estado líquido. De esta forma, el CO₂ comenzaría como líquido subenfriado y en el momento que este alcanza el preheater se genera una ebullición para la creación de burbujas. Así, el CO₂ podrá desarrollar sus propiedades refrigerantes en su estado óptimo (2 fases).

De acuerdo con las figuras 71 y 79, se pueden observar que cinco capilares cuentan con un sensor de presión a la salida de ellos. Por lo que, con los datos de presión y temperatura de esos cinco puntos se puede determinar el estado del CO₂ (y título de vapor diferente a cero en caso de encontrarse en estado gaseoso).

Los datos tomados en los 5 cooling loops son los de la siguiente tabla:

Inlet vapour quality parameters		
Cooling loop	Pressure (bar)	Temperature (°C)
CL1	15,05	-29,63
CL9	14,81	-29,58
CL10	14,94	-30,90
CL14	14,84	-30,46
CL19	14,83	-32,13

Tabla 8. Tabla resumen de presiones y temperatura después de los 5 capilares estudiados.

Para obtener estos resultados se utiliza un programa que contiene la base de datos con las tablas de las propiedades del CO₂ en función de la temperatura y presión.

El programa es “Coolselector 2” de la empresa danesa Danfoss, y los resultados se encuentran en la siguiente imagen, destacados en un rectángulo rojo:

Input	T	p	v	d	h	s	x	Cp	Cv	Viscosidad	Conductividad	Velocidad del sonido	Expansión isentrópica	Tensión superficial	Refrigerante
	°C	bar	m ³ /kg	kg/m ³	kJ/kg	kJ/(kg·K)		kJ/kg	kJ/kg	Pa·s	W/(m·K)	m/s		N/m	
Líquido	T, p	-29,6	15,05	0,0009308	1074	134,1	0,7527	0,00	2,076	0,9419	0,000163	0,1443	-	0,0104	R744
Líquido	T, p	-29,6	14,81	0,000931	1074	134,2	0,7532	0,00	2,076	0,9418	0,0001629	0,1442	-	0,01039	R744
Líquido	T, p	-30,9	14,94	0,000926	1080	131,5	0,7419	0,00	2,067	0,9432	0,0001664	0,1458	-	0,01068	R744
Líquido	T, p	-30,5	14,84	0,0009277	1078	132,4	0,7457	0,00	2,07	0,9427	0,0001652	0,1453	-	0,01058	R744
Líquido	T, p	-32,1	14,83	0,0009215	1085	128,9	0,7315	0,00	2,059	0,9445	0,0001697	0,1473	-	0,01094	R744

Figura 88. Título de vapor a la entrada de los evaporadores.

4.2.3. Título de vapor máximo al final del evaporador

El tercer objetivo térmico del presente trabajo es crucial para la validación del sistema en el detector.

El título de vapor a la salida del evaporador es clave para saber si el sistema de refrigeración funcionará o no.

El sistema de refrigeración funciona debido a que el CO₂ se encuentra en estado bifásico, con un título de vapor dentro de un rango determinado. Este rango es $0 < x < 0,80$.

Por un lado, nos encontraríamos con un problema si el CO₂ se encontrase en estado líquido, ya que no tendría las mismas capacidades refrigerantes al no producirse esas burbujas e inestabilidad en el flujo.

Por otro lado, tendríamos otro tipo de problema si el título de vapor supera el 0,80, ya que estaríamos muy cerca del efecto llamado “dryout”. Este efecto ocurre cuando flujo refrigerante es gas en casi su totalidad. Llegado a ese punto de “no retorno” el título de vapor continuará aumentando hasta que todo el flujo se componga de gas, perdiendo por completo toda capacidad refrigerante.

Para el cálculo del título de vapor a la salida de los evaporadores se tomarán los datos de los cooling loops 1, 14 y 19.

Esto se debe a que un sensor de presión y temperatura se encuentra justo a la salida de estos tres circuitos.

El título de vapor es el porcentaje de vapor dentro del flujo másico de CO₂ circulante. Para el cálculo de esta variable, se utilizará la entalpía del sistema y la entalpía de vaporización del CO₂.

La fórmula general del título de vapor para el cálculo con las entalpías es la siguiente:

$$x = \frac{h_x - h_l}{h_v - h_l}$$

Ecuación 8. Ecuación del título de vapor.

Donde h_x es la entalpía del punto estudiado, h_v y h_l son las entalpías de vapor y líquido saturado respectivamente, a una presión determinada.

Sin embargo, nos encontramos con el problema de que el punto x es indeterminable con la presión y temperatura. Esto es debido a que dentro de la campana la temperatura y presión se mantienen constantes.

Por otro lado, se conoce la energía que se está introduciendo en todo el conjunto experimental. En total son 3001 W (19 cooling loops por sus 150W nominales, además de 38 preheaters a 4W cada uno).

Como dato también se tiene que el flujo másico total del experimento es de 30,38 g/s para las condiciones de -35°C, y 27,93 g/s para la operación a +15°C).

De esta forma se puede calcular la entalpía introducida en cada cooling loop:

$$h_{nom} = \frac{P}{\dot{m}} = \frac{3001 \frac{J}{s}}{30,38 \frac{g}{s}} = 98,78 \frac{J}{g}$$

Ecuación 9. Entalpía nominal para -35°C.

$$h_{nom} = \frac{P}{\dot{m}} = \frac{3001 \frac{J}{s}}{27,93 \frac{g}{s}} = 107,45 \frac{J}{g}$$

Ecuación 10. Entalpía nominal para +15°C.

Al mismo tiempo se toman los siguientes datos de temperatura y presión del experimento. Para la consulta de datos en las tablas se utilizarán las presiones, ya que son datos más precisos que las temperaturas, debido a que los sensores de temperatura se colocan sobre las paredes de las tuberías.

Outlet vapour quality parameters (-35°C)		
Cooling loop	Pressure (bar)	Temperature (°C)
CL1	13,73	-30,33
CL14	13,78	-30,64
CL19	13,78	-30,08

Tabla 9. Tabla resumen de presiones y temperatura a la salida de los evaporadores (-35°C).

Outlet vapour quality parameters (+15°C)		
Cooling loop	Pressure (bar)	Temperature (°C)
CL1	51,17	14,74
CL14	51,18	14,51
CL19	51,18	14,96

Tabla 10. Tabla resumen de presiones y temperatura a la salida de los evaporadores (+15°C).

Con las tablas del CO₂ se pueden determinar las entalpías de vaporización en los diferentes circuitos. Dado que la pequeña variación existente en la presión de los 3 cooling loops estudiados, se consideran únicamente dos casos (-35°C y +15°C).

Por lo que, de acuerdo con las tablas de CO₂ (R744) se obtiene que la entalpía de vaporización para el CO₂ a una presión de 13,75 bares es de 305,7 J/g. Y la entalpía de vaporización del CO₂ a +15°C es de 175,6 J/g.

Con estos datos se puede calcular el título de vapor a la salida de los evaporadores. Para ello se muestra el siguiente diagrama, donde se puede observar las entalpías introducidas en el sistema y las entalpías de vaporización.

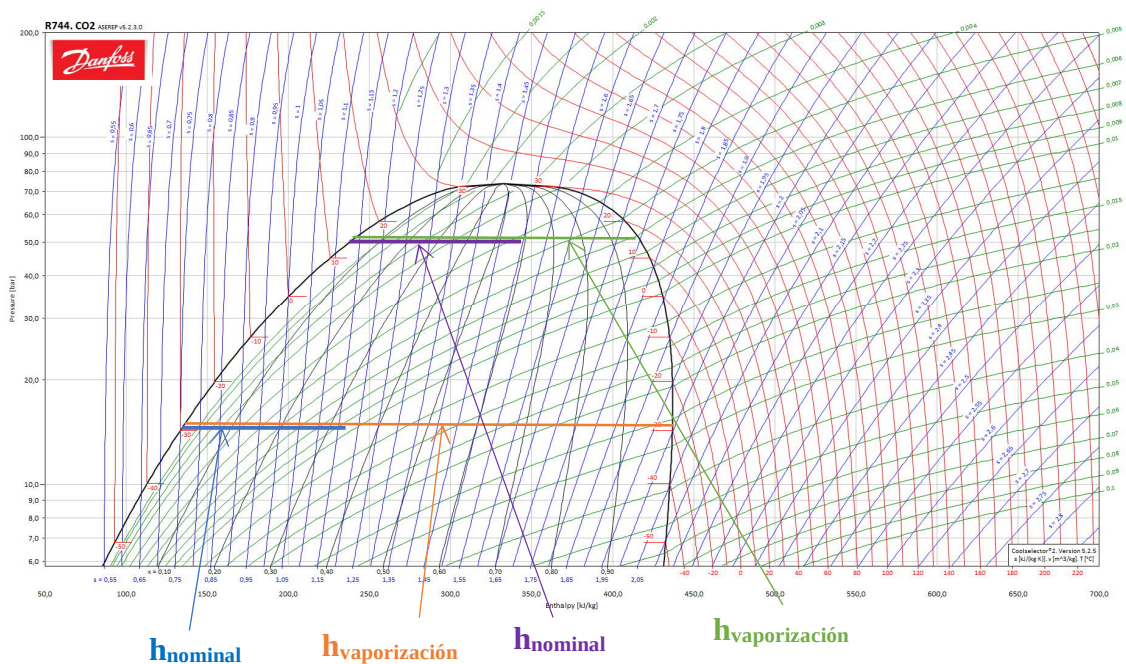


Figura 89. Entalpías nominales y de vaporización.

Por lo que el título de vapor se podrá calcular con la siguiente fórmula:

$$x = \frac{h_{nom}}{h_{vap}}$$

Ecuación 11. Fórmula para el título de vapor.

De lo que se deducen los siguientes resultados para ambas situaciones:

$$x_{-35^{\circ}\text{C}} = \frac{h_{nom}}{h_{vap}} = \frac{98,78 \frac{\text{J}}{\text{g}}}{305,7 \frac{\text{J}}{\text{g}}} = 0,323$$

Ecuación 12. Título de vapor para condiciones de -35°C.

$$x_{+15^{\circ}C} = \frac{h_{nom}}{h_{vap}} = \frac{107,45 \frac{J}{g}}{175,6 \frac{J}{g}} = 0,612$$

Ecuación 13. Título de vapor para condiciones +15°C.

4.2.4. Caída de presión en capilares

El cuarto objetivo térmico del presente trabajo estaba orientado a la determinación de la caída de presión en los capilares, tal y como se muestra en la siguiente imagen.

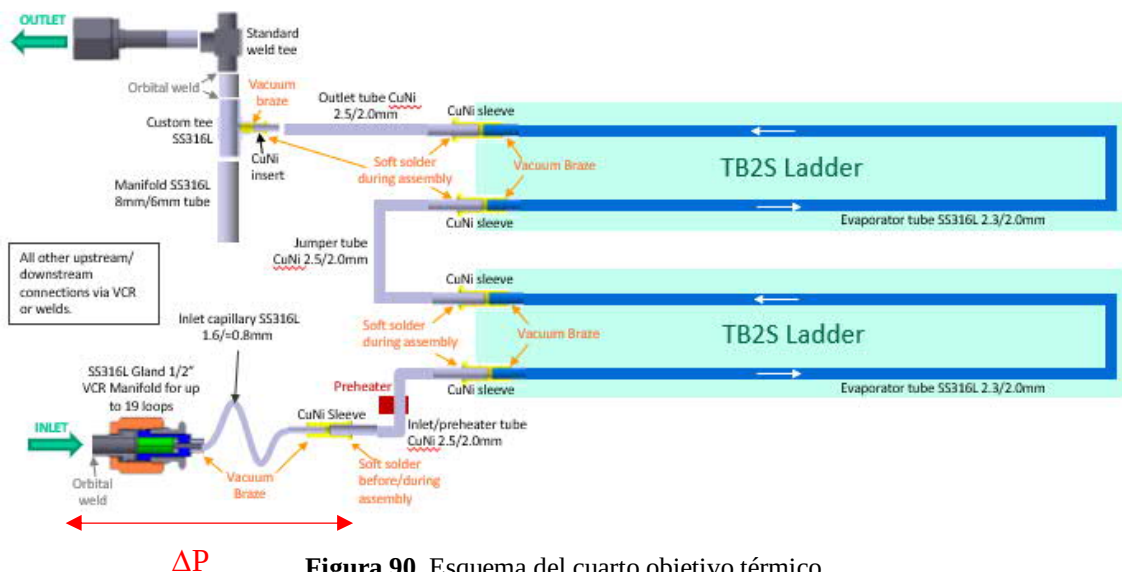


Figura 90. Esquema del cuarto objetivo térmico.

De acuerdo con las figuras 71 y 79, se pueden observar que 5 pares de evaporadores cuentan con un sensor de presión a la entrada de ellos, o lo que es lo mismo, justo después del capilar.

Son los circuitos que se localizan en las posiciones más alejadas del colector de salida (cooling loop 1 y 19) y en las posiciones más cercanas (cooling loop 9 y 10). Además, se coloca otro sensor en el cooling loop número 14, en una posición intermedia.

Por lo que, con este sistema se puede determinar la caída de presión en cada uno de estos 5 capilares restando el valor obtenido por este sensor de presión al valor obtenido en la entrada del sistema.

La presión a la entrada del sistema es de 24,21 bares, como se ha descrito en el primer apartado de esta sección. Los valores obtenidos en estos cooling loops son, consecutivamente: 15,05 bares, 14,81 bares, 14,94 bares, 14,84 bares y 14,83 bares, tal y como se muestran en la Tabla 7.

Por lo que la caída de presión en estos capilares será:

$$\Delta P_{cap1} = 24,21 - 15,05 = 9,16 \text{ bares}$$

$$\Delta P_{cap9} = 24,21 - 14,81 = 9,40 \text{ bares}$$

$$\Delta P_{cap10} = 24,21 - 14,94 = 9,26 \text{ bares}$$

$$\Delta P_{cap14} = 24,21 - 14,84 = 9,37 \text{ bares}$$

$$\Delta P_{cap19} = 24,21 - 14,83 = 9,38 \text{ bares}$$

Ecuación 14. Caída de presión en los capilares.

4.2.5. Caída de presión en el evaporador y en la línea de retorno al colector

El último objetivo térmico del presente proyecto se compone de dos parámetros (diferencia de presión y diferencia de temperatura).

Se propone calcular la caída de presión existente entre el comienzo del evaporador y el final del tubo de conexión, tal y como se muestra en la siguiente imagen.

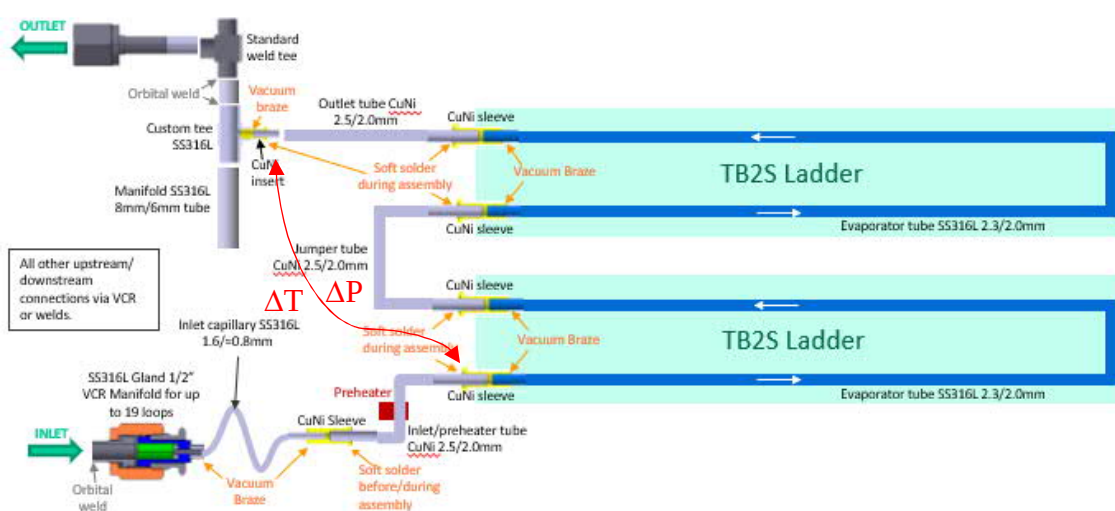


Figura 91. Esquema del quinto objetivo térmico.

En el conjunto experimental los sensores de presión se encuentran en el colector de retorno, y no justamente a la salida del tubo de conexión a la salida de los evaporadores. Sin embargo, esa distancia es muy pequeña y se considera que se encuentra a la salida del tubo de conexión. De los 5 cooling loops estudiados, tres de ellos fueron sensorizados de esta forma (cooling loop 1, 14 y 19), mientras que el cooling loop 9 y 10 no se consideraron. Esto se debe a que la salida de estos cooling loops se encuentran justo al final del colector de retorno, por lo que no existía espacio suficiente.

Los resultados se resumen en la siguiente tabla y gráficos:

Pressure and temperature before and after evaporators				
Cooling loop	After capillary (bar)	Return Manifold (bar)	After capillary (°C)	Return Manifold (°C)
CL1	15,05	13,95	-29,63	-30,33
CL14	14,84	13,82	-30,46	-30,64
CL19	14,83	13,92	-32,13	-30,08

Tabla 11. Tabla resumen de presiones a lo largo de los 5 cooling loops estudiados.

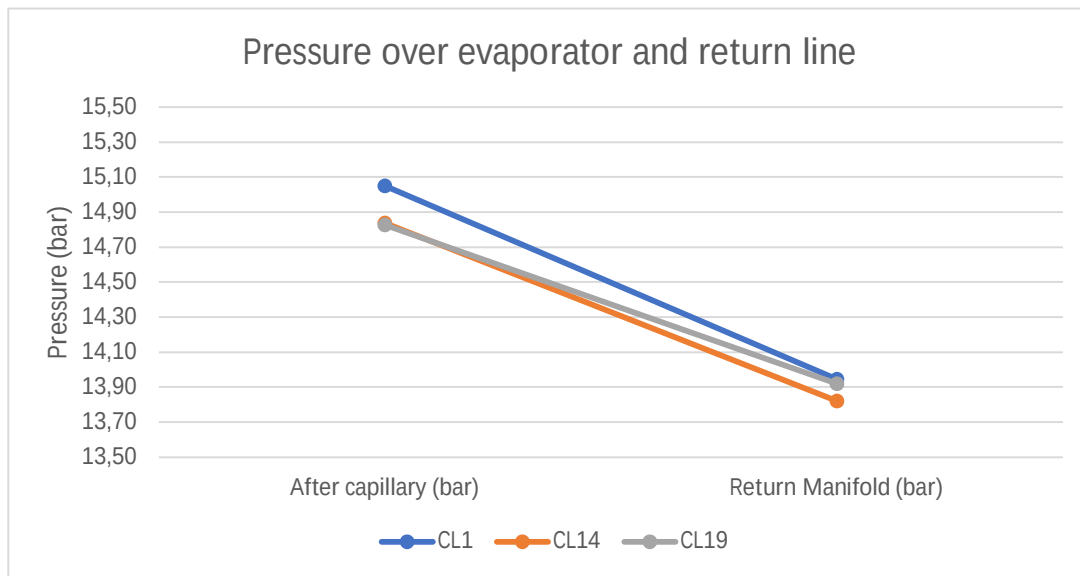


Figura 92. Presión antes y después de los evaporadores.

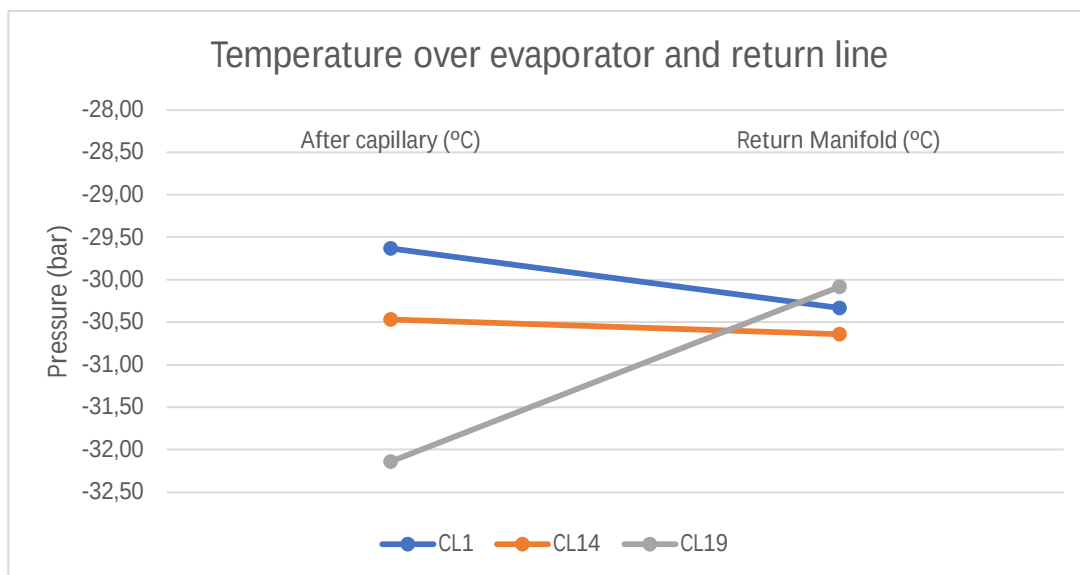


Figura 93. Temperaturas antes y después de los evaporadores.

Por lo que de la misma forma que en el apartado anterior se calcula la diferencia entre la presión a la entrada de los evaporadores y a la salida de la línea de retorno al colector:

$$\Delta P_1 = 15,05 - 13,95 = 1,10 \text{ bares}$$

$$\Delta P_{14} = 14,84 - 13,82 = 1,02 \text{ bares}$$

$$\Delta P_{19} = 14,83 - 13,92 = 0,91 \text{ bares}$$

Ecuación 15. Caída de presión en los evaporadores y línea de retorno al colector.

Y la diferencia de temperatura es:

$$\Delta T_1 = -29,63 - (-30,33) = 0,70^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{14} = -30,46 - (-30,64) = 0,18^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{19} = -32,13 - (-30,08) = -2,05^{\circ}\text{C}$$

Ecuación 16. Diferencia de temperatura entre la entrada de los evaporadores y línea de retorno al colector.

5. Discusión y conclusiones

En primer lugar, se tienen en cuenta los resultados relacionados con los objetivos de fabricación.

Estos resultados son completamente satisfactorios. Todas las pruebas mecánicas y de fuga llevadas a cabo han sido superadas.

Es importante remarcar que las pruebas mecánicas de presión se realizaron a 186 bares, cuando la presión de operación más elevada será de alrededor de 50 bares (tal y como se puede ver en los resultados térmicos a +15°C).

Este resultado permite validar los procesos de fabricación y producción del sistema de refrigeración del TB2S en el Tracker de CMS.

Por otro lado, estos resultados permiten la creación de procedimientos/manuales de fabricación y producción como los aportados en este TFM.

Esos procesos de doblado de tubos y de soldadura “blanda” han sido validados. En un futuro próximo serán modificados para mejorarlos y optimizarlos.

Por ejemplo, en el proceso de doblado de tubos, los tubos de conexión (de Cobre-Níquel) serán doblados con una nueva herramienta que está bajo desarrollo actualmente, ya que el anterior útil es mejorable para evitar errores en el proceso y mejorar el trabajo del operario.

De igual forma, la herramienta para el doblado de capilares se mantendrá, ya que ha sido un diseño reciente, funciona a la perfección, y es totalmente aplicable al proceso final de montaje.

En lo referente a los procesos de uniones, el resultado también es satisfactorio. La soldadura al vacío realizada se mantendrá tal y como se ha llevado a cabo. Tanto el material de aporte como el proceso en sí (tiempos, temperaturas, etc.) son correctos.

La soldadura blanda entre los conectores y tubos de Cobre-Níquel, funciona correctamente. El procedimiento también será modificado, ya que se ha ideado una nueva pinza de soldadura para este proceso.

Los resultados con esta pinza son incluso mejores, pero ocupa un mayor espacio, por lo que, solamente podrá ser utilizada cuando las circunstancias lo permitan. Es por ello que el proceso con la pinza será añadido y no sustituirá el procedimiento actual. El proceso actual, por el contrario, es más indicado para soldaduras con un acceso más limitado o dificultoso.

Cabe añadir que las conexiones de los sensores de presión con esos conectores en “T” de latón no serán producidas para el detector, ya que no se realizarán medidas a esa escala en la operación real del detector. Por lo que el objetivo de ellas estaba limitado a su funcionamiento en este proyecto.

También es satisfactoria la soldadura orbital llevada a cabo en el colector de retorno. Este colector tendrá una forma diferente, pero el proceso de soldadura aplicado para la unión de los diferentes tramos es absolutamente igual.

Pasando en este momento a comentar los resultados térmicos del experimento, tenemos que en líneas generales el resultado es exitoso y se ajusta a las previsiones inicialmente realizadas en los objetivos.

El punto más crítico para la validación del sistema es el título de vapor a la salida de los evaporadores. Un título de vapor muy alto (0,8 o mayor) indicaría que el CO₂ está cerca de ser totalmente gas, perdiendo de esta forma, su capacidad refrigerante.

A partir de ese punto se puede dar el fenómeno de “dryout”, en el cual el título de vapor del CO₂ aumenta hasta convertirse en gas, y la temperatura por tanto aumentaría sin nada que lo evitara. Llegando a estropear y dejar fuera de servicio los módulos (e incluso quemar su electrónica) y, por tanto, parando la operación de todo el detector finalmente.

Por lo que, particularizando sobre el primer objetivo, se puede observar que la caída de presión total es del entorno de 10,5 bares entre la entrada y salida del sistema. El objetivo planteado al inicio de este proyecto era de 10 bares. Esto quiere decir que nos encontramos con una caída de presión un 5% más alta de lo esperado.

Esta diferencia en la caída de presión de por sí, no es un punto tan crítico para el sistema. Es más bien un indicador de que el sistema está dentro de un entorno seguro de funcionamiento, y que, por tanto, se prevé que los siguientes resultados estarán en el entorno de los valores esperables.

Los resultados del segundo punto aseguran que el estado del CO₂ a la entrada de los módulos es el correcto. El sistema se ha diseñado para que el CO₂ entre en estado líquido a los evaporadores. A continuación, el CO₂ absorberá el calor disipado por los módulos y se encontrará en un estado bifásico durante el tramo de los dos evaporadores en serie (cooling loop).

El tercer punto de estos objetivos es el punto más importante para saber si el sistema de refrigeración cumplirá con el diseño del detector en condiciones reales de operación.

Las condiciones de diseño definen un título de vapor a la salida de los evaporadores de 0,32 en condiciones de operación a -35°C y de 0,57 bajo condiciones de +15°C (temperatura de CO₂).

Como se puede ver en el apartado anterior, el título de vapor en condiciones frías es de 0,323. Es exactamente el mismo valor de diseño, por lo que las condiciones de -35°C quedan totalmente validadas con un resultado como este.

A continuación, se observa que el título de vapor a la salida de los evaporadores es de 0,61 en condiciones de +15°C. Es un 0,04 superior, pero aún así queda lejos de la zona de riesgo de “dryout”, la cual se encuentra en el entorno del 0,8.

Con este resultado también queda validada la operación del sistema con CO₂ a +15°C.

El cuarto punto de los objetivos pretendía comprobar la función de los capilares, ya que estos actúan para igualar los flujos máxicos entre los diferentes cooling loops. Éstos se comprobaron antes en el test de capilares que se puede ver en el apartado de metodología y en el anexo B de este TFM.

Aunque fueran probados individualmente, se quería comprobar que se comportaban de igual forma o similar dentro de todo el conjunto en funcionamiento.

Como se puede observar, todas las caídas de presión se encuentran entre 9,16 y 9,40 bares. Un gap de aproximadamente 0,3 bares, el cuál es despreciable para su función general dentro del sistema.

Una línea futura de desarrollo estará relacionada con los capilares. Se estima que la necesidad para la actualización CMS es de unos 1000 capilares.

Por lo que se está llevando a cabo el proyecto de una “fábrica de capilares”. Esta “fábrica” es un set-up en el cual se podrán medir la caída de presión de 4 capilares al mismo tiempo (siguiendo el mismo principio que se ha descrito en este TFM), de forma que se acorten los tiempos globales para este proceso.

El quinto y último punto de los resultados térmicos está destinado de igual forma a comprobar que la caída de presión total entre la entrada y la salida del sistema esta balanceada según la función de cada equipo.

Los 10 bares de caída de presión se habían diseñado con la intención de que el reparto fuera de unos 9 bares en el capilar más 1 bar entre evaporadores y colector de retorno. De esta forma si el reparto coincide, tendremos que cada sección del sistema está funcionando correctamente.

La caída de presión en los evaporadores y líneas de retorno oscilan entre los 0,91 bares y 1,10 bares, cumpliendo así con lo previamente diseñado.

Este proyecto ha permitido verificar las condiciones de diseño del sistema de refrigeración del TB2S del Tracker Externo en el detector CMS del CERN. El trabajo llevado a cabo también ha permitido abrir nuevas líneas de investigación y desarrollo, aportando así un gran valor al mayor proyecto de investigación de la física de partículas en uno de los laboratorios de investigación y desarrollo más importantes en el mundo.

6. Referencias

- [1]: European Organization for Nuclear Research. (n.d.). *The Synchrocyclotron* | CERN. Retrieved July 12, 2022, from <https://home.cern/science/accelerators/synchrocyclotron>
- [2]: European Organization for Nuclear Research. (n.d.). *The Proton Synchrotron* | CERN. Retrieved July 12, 2022, from <https://home.cern/science/accelerators/proton-synchrotron>
- [3]: European Organization for Nuclear Research. (n.d.). *The Super Proton Synchrotron* | CERN. Retrieved July 12, 2022, from <https://home.cern/science/accelerators/super-proton-synchrotron>
- [4]: European Organization for Nuclear Research. (n.d.). *The Large Electron-Positron Collider* | CERN. Retrieved July 12, 2022, from <https://home.cern/science/accelerators/large-electron-positron-collider>
- [5]: European Organization for Nuclear Research. (n.d.). *Facts and figures about the LHC* | CERN. Retrieved July 12, 2022, from <https://home.cern/resources/faqs/facts-and-figures-about-lhc>
- [6]: The CMS Collaboration (2008). The CMS experiment at the CERN LHC. *Journal of Instrumentation*, 3(08), S08004. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08004>
- [7]: European Organization for Nuclear Research. (2017). *The Phase-2 Upgrade of the CMS Tracker. Technical Design Report*.
- [8]: French, T. A. (2019). *Test Report for CMS Outer Tracker CO₂ Cooling-Geometry Representative of TB2S Ladders with Pre-Heaters*.
- [9]: Lenoir, P. (2020). “CO₂ distribution for TB2S Z minus. Doc: ST1226434_01”.
- [10]: French, T. A., Cichy K. (2020). “Outer Tracker TB2S Manifold Test Setup”, Forum on tracking detector mechanics.
- [11]: French, T. A. (2021). “Assembly of Inlet Manifold 19x1.6mm Simplified. Doc: ST1492920_02”.
- [12]: French, T. A. (2020). “1/2" VCR Manifold 19x1.6mm. Doc: ST1371942_02”.
- [13]: Pressure Drop Online Calculator, “Calculation of pressure drops of flowing liquids and gases in pipes and pipe elements (laminar and turbulent flow)”, <http://www.pressure-drop.com/Online-Calculator/> [accessed on 15th Jul 2022].
- [14]: Barinoff, M. (2022). “TB2S Ladder Z minus – Cooling Tube. Doc: CMSTB2S0079”.
- [15]: Motschmann, F. (2020). *Vacuum Brazing*. https://cas.web.cern.ch/sites/default/files/Vacuum%20Brazing_CAS%20MME_Dec2020_FMotschmann.pdf
- [16], [17], [18], [19], [20]: Bianchi, F., French, T.A., Golyzniak, D., Perea, F. (2023). “Outer Tracker: TB2S Segment Test”, ICS Biweekly Meeting.

[21]: Daguin, J. (2022). *CMS Phase 2 Upgrade CO2 Cooling Pipework. Pressure and Leak Tests Requirements.*

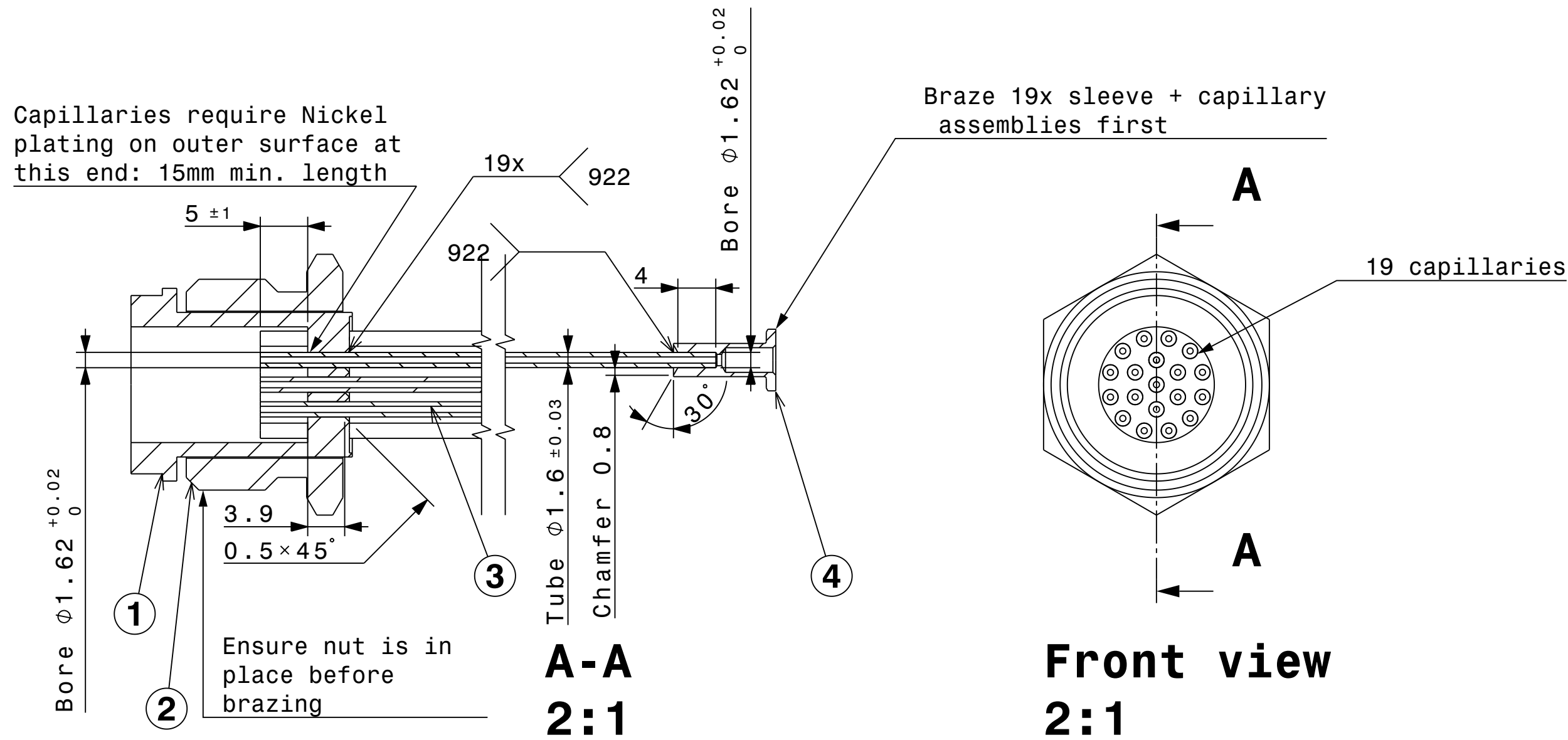
[22]: Pochet, C. (2022). *Inspection de Securite Réception sur CRLP-04228.*

[23]: Pochet, C. (2022). *Inspection de Securite Réception sur CRLP-04211.*

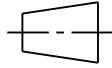
[24]: Gonnard, D. P. (2022). *Inspection de Securite Réception sur CRPEMS-00935.*

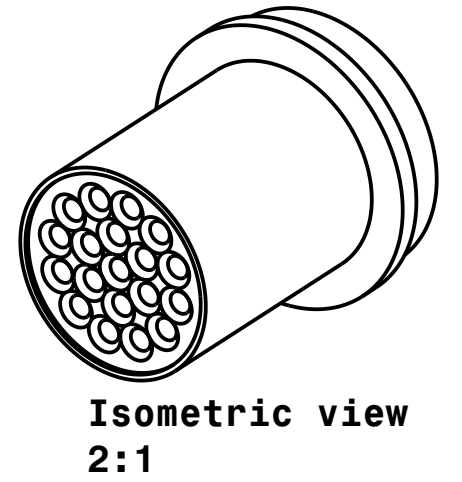
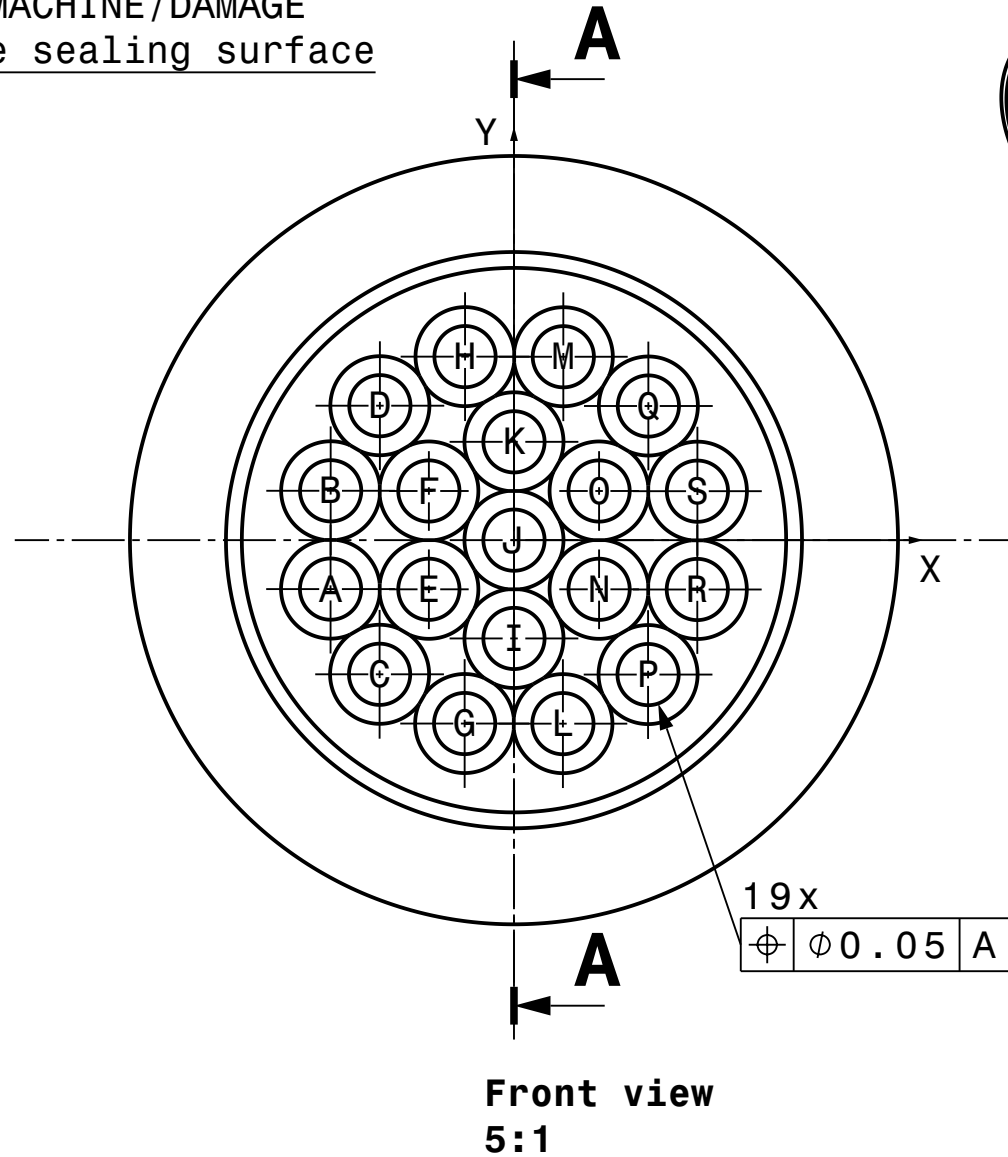
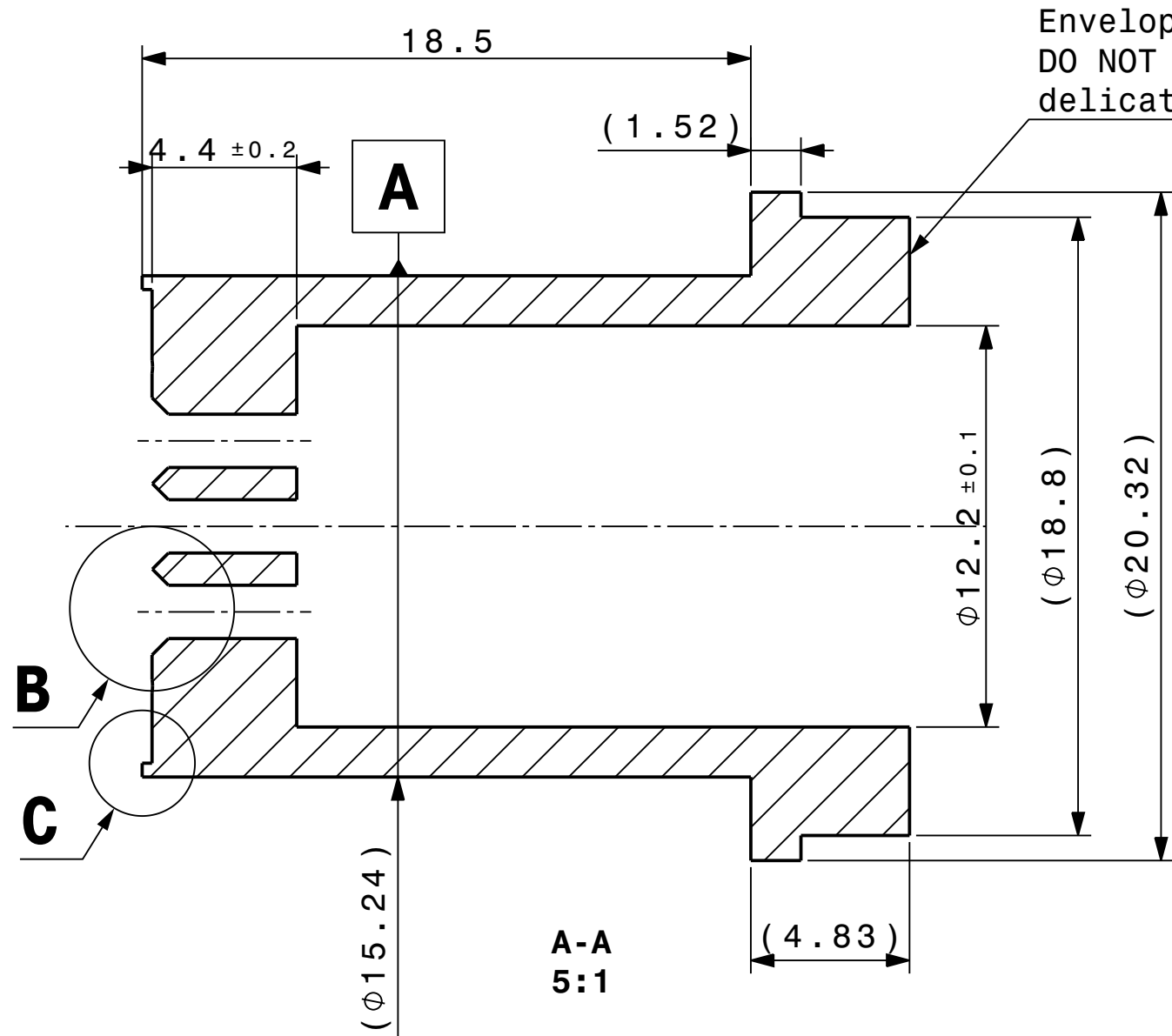
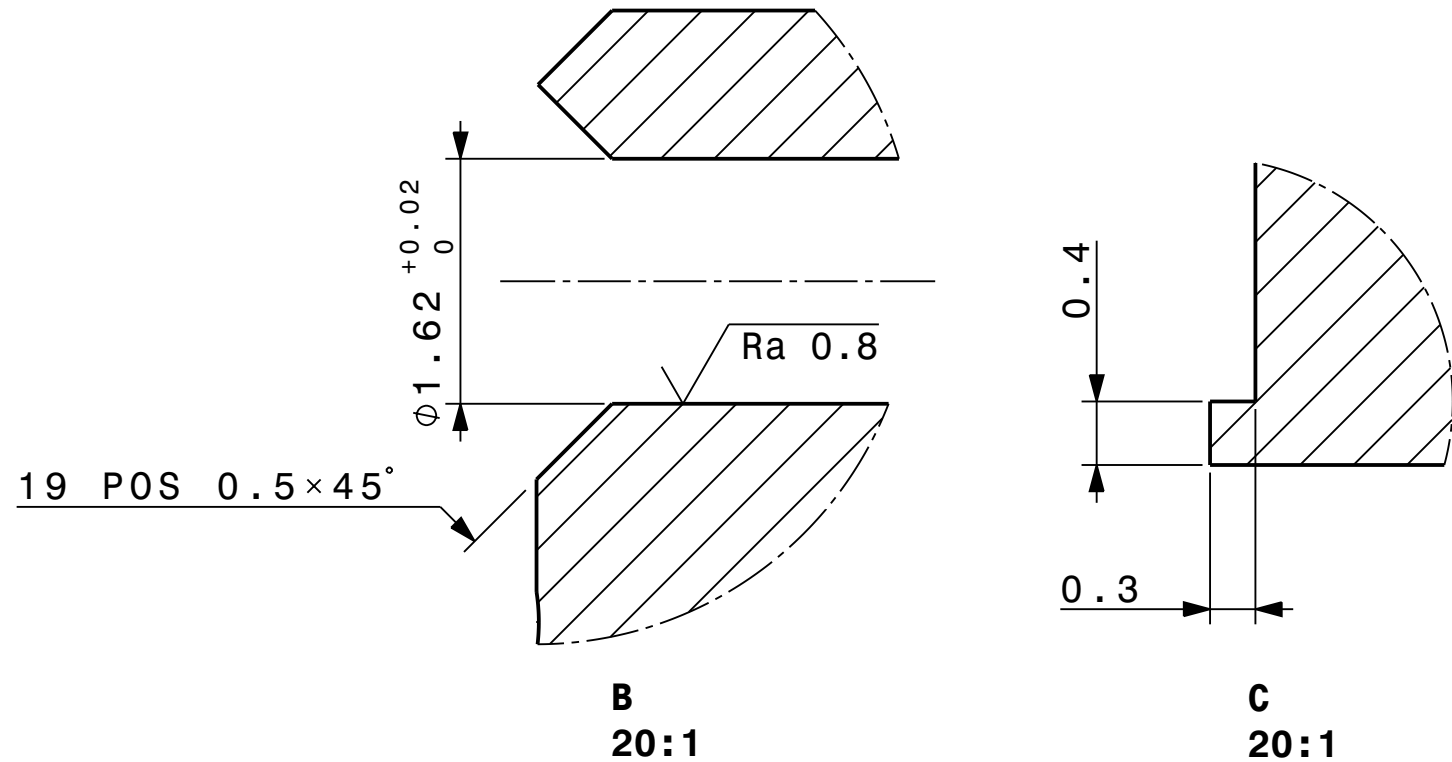
7. Anexos

7.1. Anexo A: Planos

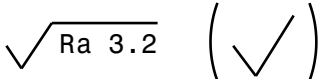


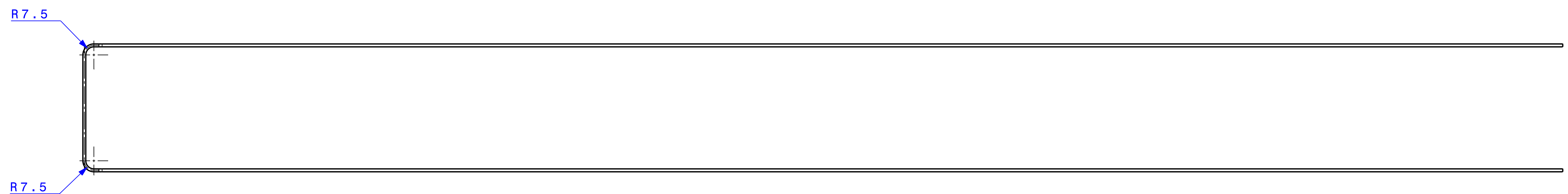
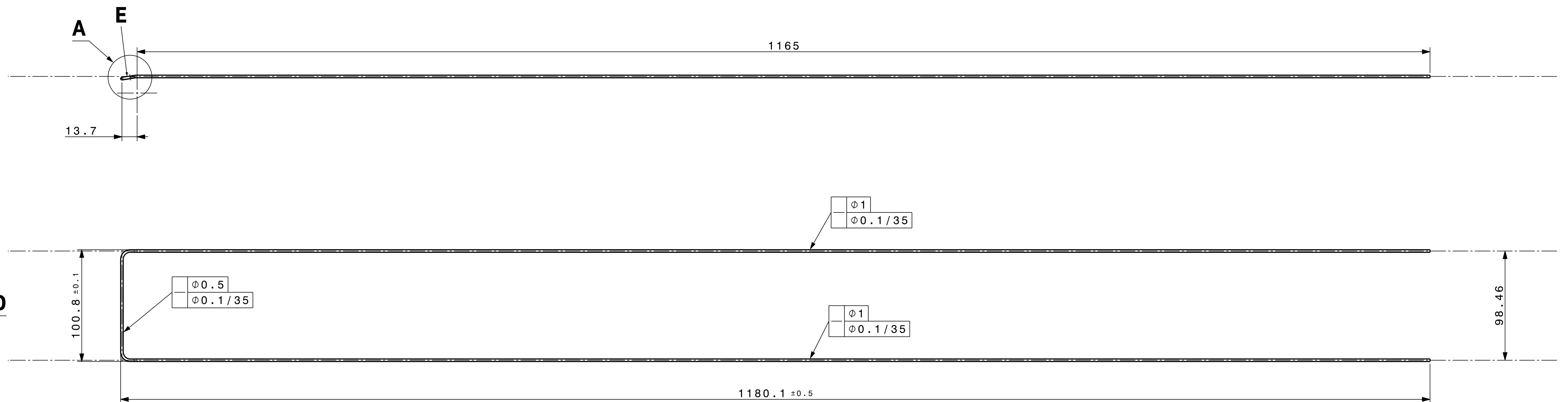
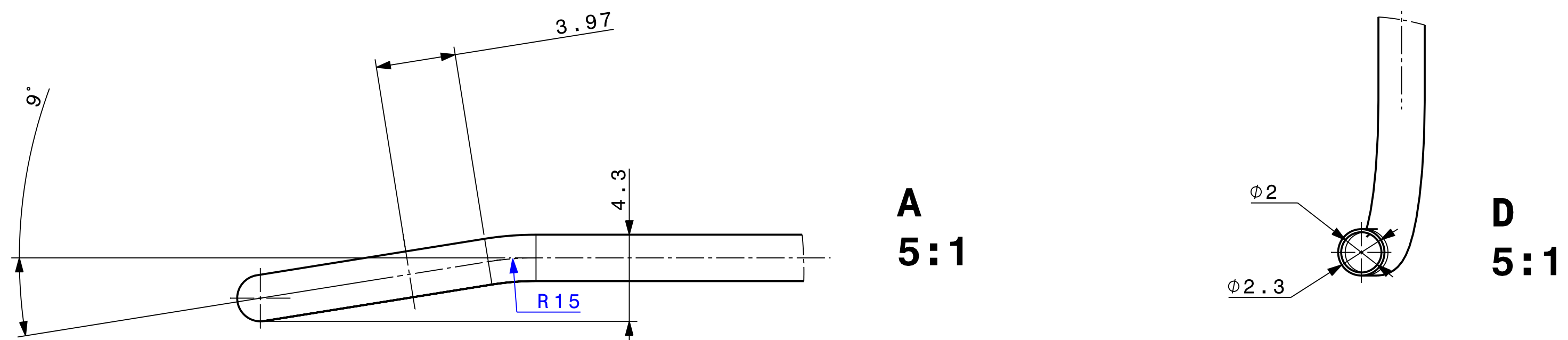
Item	Quantity	Designation	Material
01	1	Inlet Manifold 19x1.6mm	SS316L
02	1	1/2" Short Male VCR Nut	SS316L
03	19	Capillary 1.6mm OD	SS316L (require Nickel plating at end)
04	19	Sleeve 1.6mm braze to 2.5mm solder	CuNi 70/30

WHERE USED		Not Applicable		[Last checked at 2021-09-20 16:35]	
DESIGNATION Assembly of Inlet Manifold 19x1.6mm Simplified			DESIGNED	T.FRENCH	FORMAT A3
			CHECKED		
			RELEASED		SCALE 2:1
			APPROVED		
EQUIPMENT CODE			DESIGNED 2021-09-20		
REFERENCES		Doc No: ST1492920_02	INDEX	LABEL	QAC
				NOT VALID FOR EXECUTION	SHEET 1/1

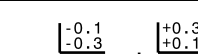


REF.	X	Y
A	-4.85	-1.29
B	-4.85	1.31
C	-3.56	-3.55
D	-3.55	3.56
E	-2.25	-1.3
F	-2.25	1.3
G	-1.31	-4.85
H	-1.29	4.85
I	0	-2.6
J	0	0
K	0	2.6
L	1.29	-4.85
M	1.31	4.85
N	2.25	-1.3
O	2.25	1.3
P	3.55	-3.56
Q	3.56	3.55
R	4.85	-1.31
S	4.85	1.29

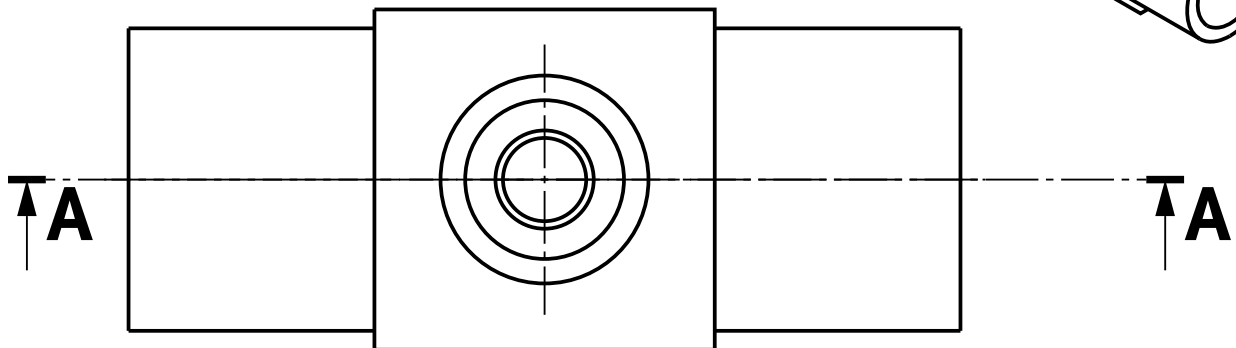
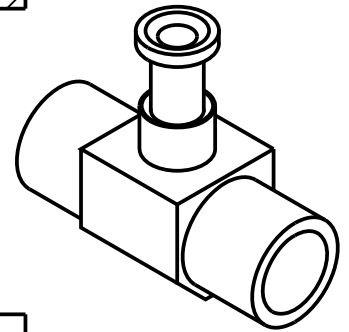
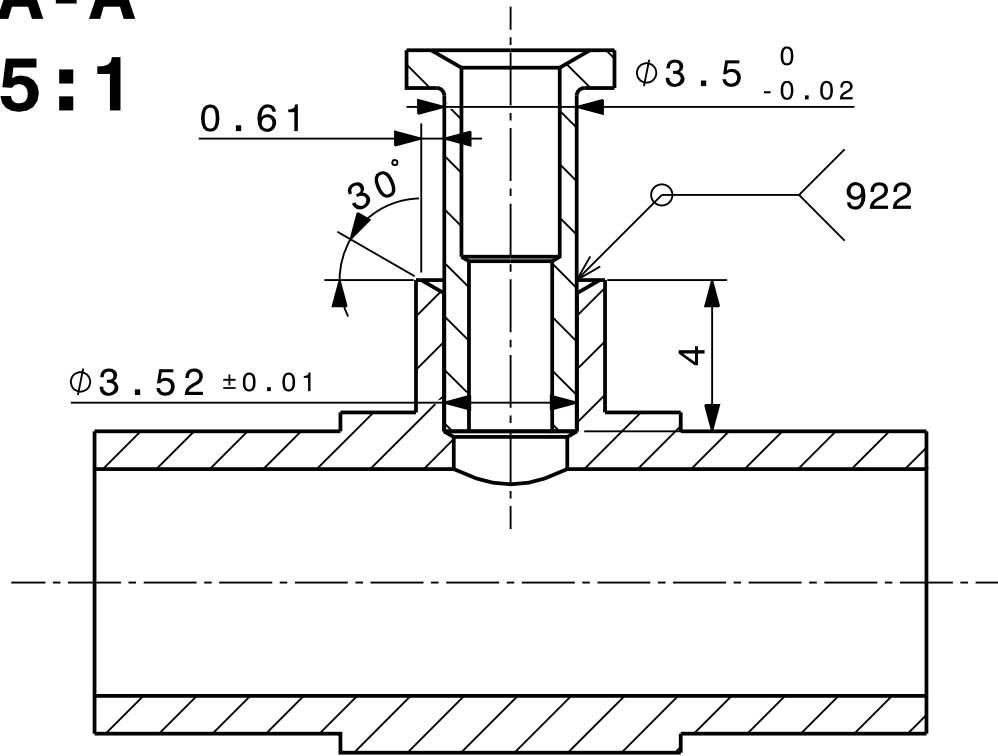
MATERIAL		INITIAL STATE		FINAL STATE					
EN 1.4404 (St. Steel 316L)		Make from Swagelok SS-8- VCR-3-BL 1/2" Blind Gland							
ISO GPS STANDARDS									
ISO 2768-mK-E				ISO 13715  					
ISO GPS standards: Tolerancing ISO 8015									
MASS 19.4 g		WHERE USED Not Applicable		[Last checked at 2020-11-03 12:38]					
DESIGNATION 1/2" VCR Manifold 19x1.6mm				DESIGNED T.FRENCH		FORMAT A3			
				CHECKED					
				RELEASED		SCALE 5:1			
				APPROVED					
EQUIPMENT CODE				DESIGNED 2020-11-03					
		REFERENCES Doc No: ST1371942_02		INDEX		LABEL NOT VALID FOR EXECUTION		QAC	SHEET 1/1



Auxiliary view E
1:2

MATERIAL		INITIAL STATE		FINAL STATE	
EN 1.4404 CERN EDMS 1380627 (316L)		Straight tube Length 2600mm			
ISO GPS STANDARDS					
ISO 2768-mK		✓ Ra 1.6		ISO 13715 	
Unless otherwise mentioned, applicable ISO GPS standards are those prior to 2010-08-01 regardless of the drawing date					
MASS 19.8 g		WHERE USED CMS2TB2S0080		[Last checked at 2022-12-02 10:39]	
DESIGNATION TB2S Ladder Z minus - Cooling Tube		DESIGNED		M. BARINOFF	
		CHECKED			
		RELEASED			
		APPROVED			
		DESIGNED 2022-12-02		 	
EQUIPMENT CODE: CMS2TB2S DMS phase 2 Tracker Barrel 2S detector and its tooling & protos					
REFERENCES Doc No: ST1348542_02		INDEX			
 CMS2TB2S0079					
NOT VALID FOR EXECUTION				GAC - SHEET 1/1	

A-A
5:1



BILL OF MATERIALS

POS	QUANT	DESIGNATION	REFERENCE	MATERIAL	EDH SCEM
01	1	Tee Sleeve Braze/Solder 2.5mm	ST1423971	CuNi 70/30 C71500	
02	1	8x6mm to 2.5 mm Adaptor Reducing Tee	ST1424588	EN 1.4404 or 1.4435 (St. Steel 316L)	

WHERE USED Not Applicable

[Last checked at 2021-03-22 17:44]

DESIGNATION

8x6 Welded to 2.5mm Soldered Tee
Assembly

DESIGNED

F.PEREALBELA

FORMAT

A4

CHECKED

RELEASED

APPROVED

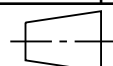
SCALE

1:1

EQUIPMENT CODE

DESIGNED

2021-03-22



REFERENCES

Doc No: ST1424587_02

INDEX

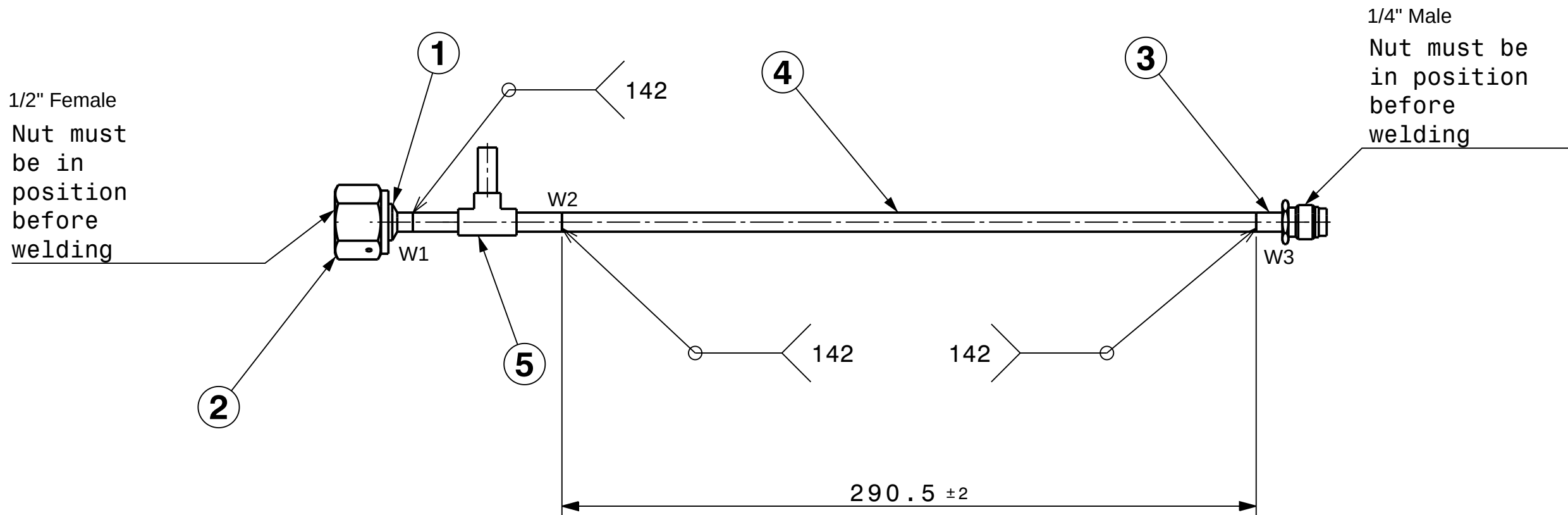
LABEL

NOT VALID FOR EXECUTION

QAC

SHEET

1/1



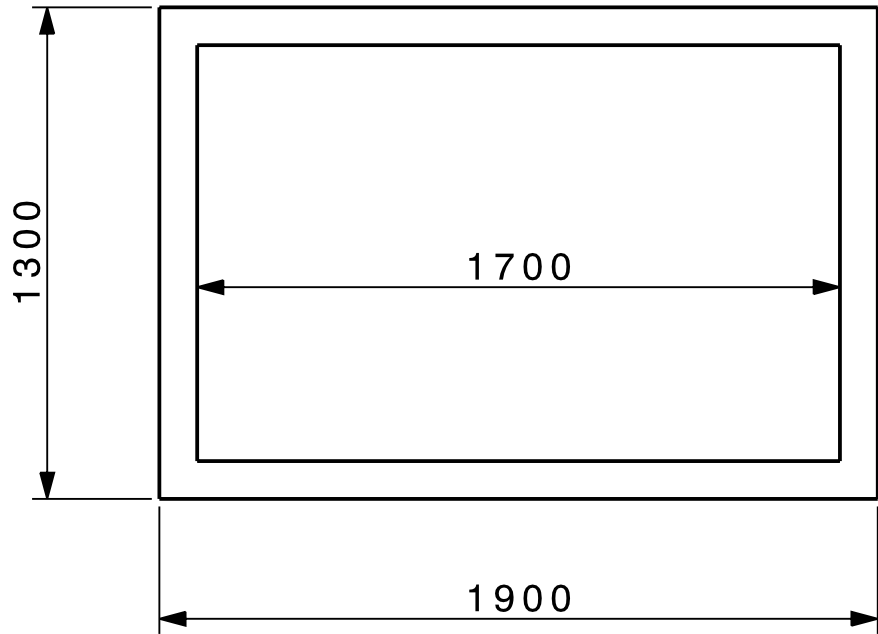
Front view
1:2

General tolerances ISO 13920-BF

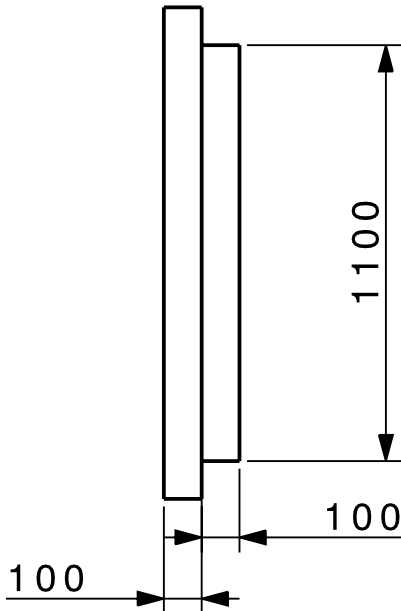
1	ST1424004_01	Part		1/2" VCR Gland Machined	1
1	ST1424008_01	Part		Female VCR Nut 1/2"	2
1	ST1424065_01	Part		1/4" VCR Gland 8mm	3
1	ST1424064_01	Part		Straight pipe 4	4
1	ST1424069_01	Part		316L-8MTB7-3 8mm Weld Tee	5
1	ST1424067_01	Part		SS-4-VCR-4-.54NC VCR 1/4" Short Male Nut	6
Qua	Part Number	Type	Material	Description	Position

Bill of Material: ST1466111_01

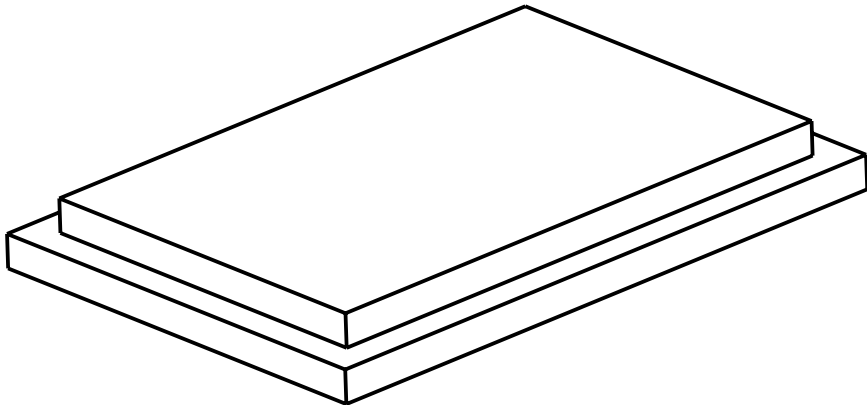
WHERE USED		Not Applicable		[Last checked at 2021-06-30 09:14]			
DESIGNATION Inlet pipe			DESIGNED	F.PEREA ALBELA		FORMAT A3	
			CHECKED				
			RELEASED			SCALE 1:2	
			APPROVED				
EQUIPMENT CODE			DESIGNED 2021-06-30				
	REFERENCES	Doc No: ST1466111_01		INDEX	LABEL	QAC	SHEET
					NOT VALID FOR EXECUTION		1/1



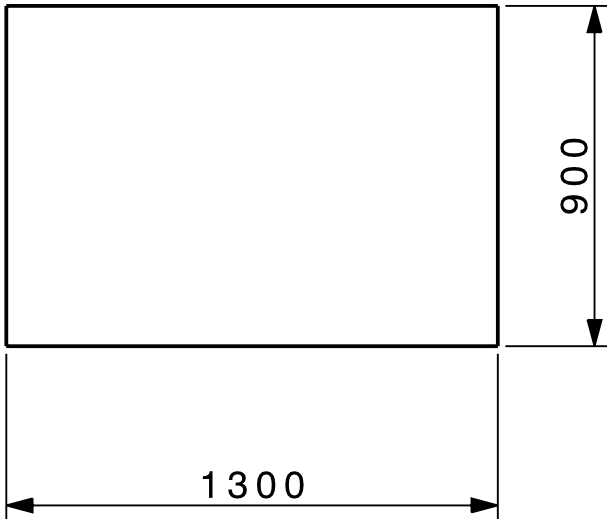
Front view



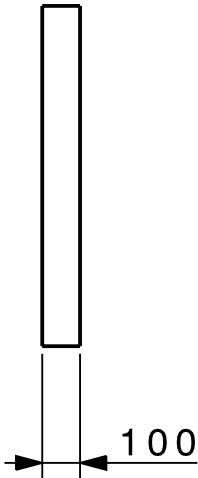
Left view



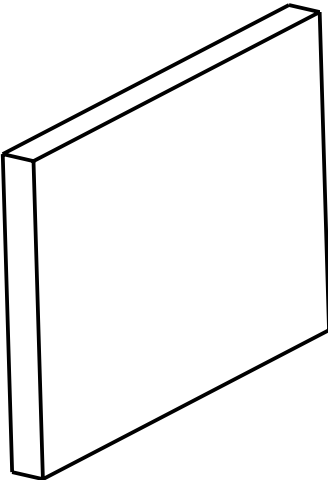
Isometric view



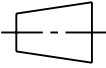
Front view

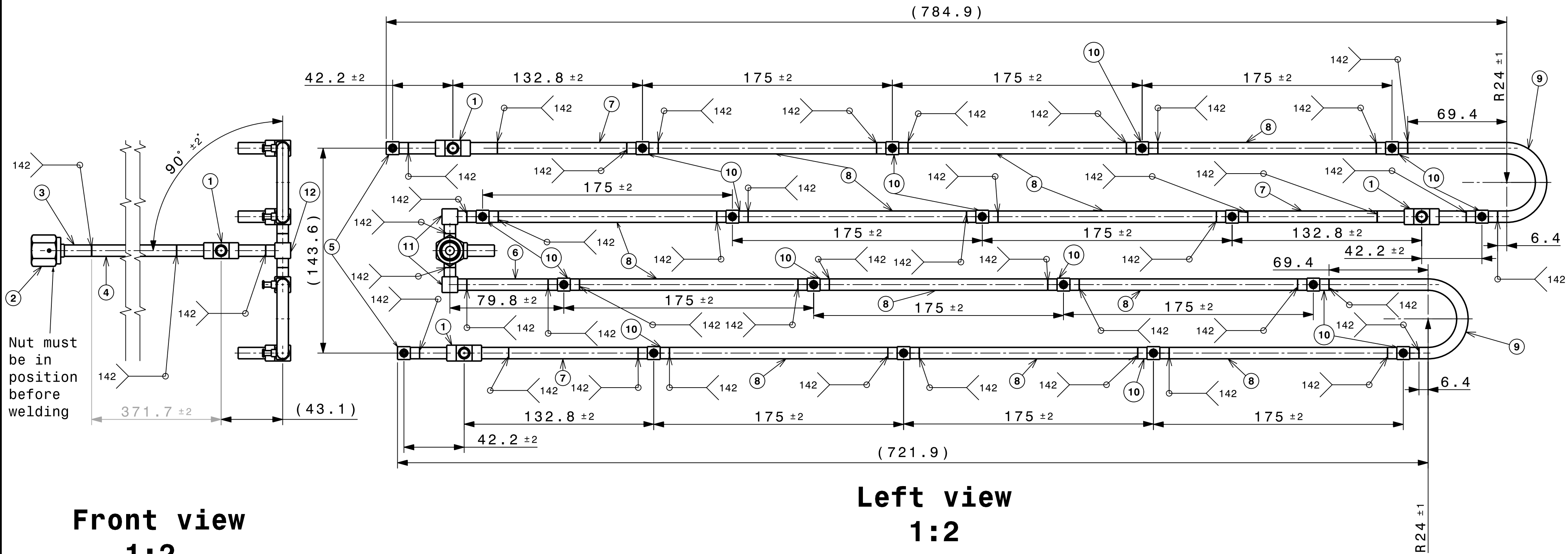


Left view



Isometric view

		WHERE USED	Not Applicable		[Last checked at 2021-05-19 16:27]	
DESIGNATION TB2S Manifold test Box				DESIGNED	F.PEREA ALBELA	FORMAT A3
				CHECKED		
				RELEASED		SCALE 1:20
				APPROVED		
EQUIPMENT CODE				DESIGNED 2021-05-19		 
	REFERENCES	Doc No: ST1439482_02		INDEX	LABEL NOT VALID FOR EXECUTION	QAC SHEET 1/1

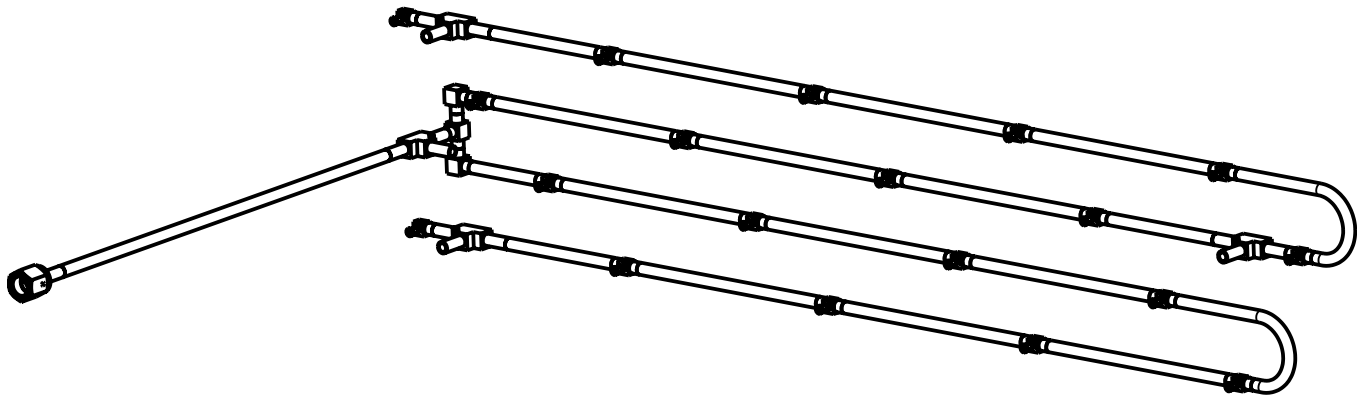


Front view
1:2

Left view
1:2

4	ST1424069_01	Part		316L-8MTB7-3 8mm Weld Tee	1
1	ST1424066_01	Part		1/4" Female VCR Nut	2
1	ST1424065_01	Part		1/4" VCR Gland 8mm	3
1	ST1424060_01	Part		Tube 8 mm OD. Length 340.5 mm	4
2	ST1423984_01	Assembly		6LV-8MMW-9 6x8 Weld Elbow	5
1	ST1423978_01	Part		Tube 8 mm OD. Length 56.9 mm	6
3	ST1423976_01	Part		Tube 8 mm OD. Length 90.6 mm	7
12	ST1423974_01	Part		Tube 8 mm OD. Length 153 mm	8
2	ST1423972_01	Part		Tube 8 mm OD. Length 153 mm. Bend radius 24 mm	9
17	ST1424587_01	Assembly		8x6 Welded to 2.5mm Soldered Tee	10
2	ST1423966_01	Part		6LV-8MMW-9 6x8 Weld Elbow	11
1	ST1423965_01	Part		6LV-8MMW-3 8x6 Weld Tee	12
Qua	Part Number	Type	Material	Description	Position

Bill of Material: ST1456942_02

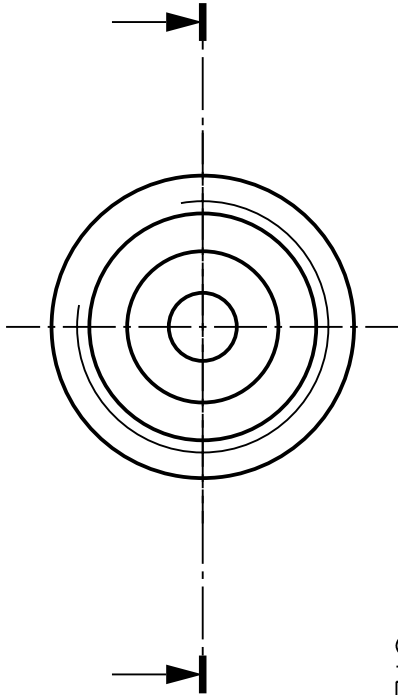


Isometric view
1:5

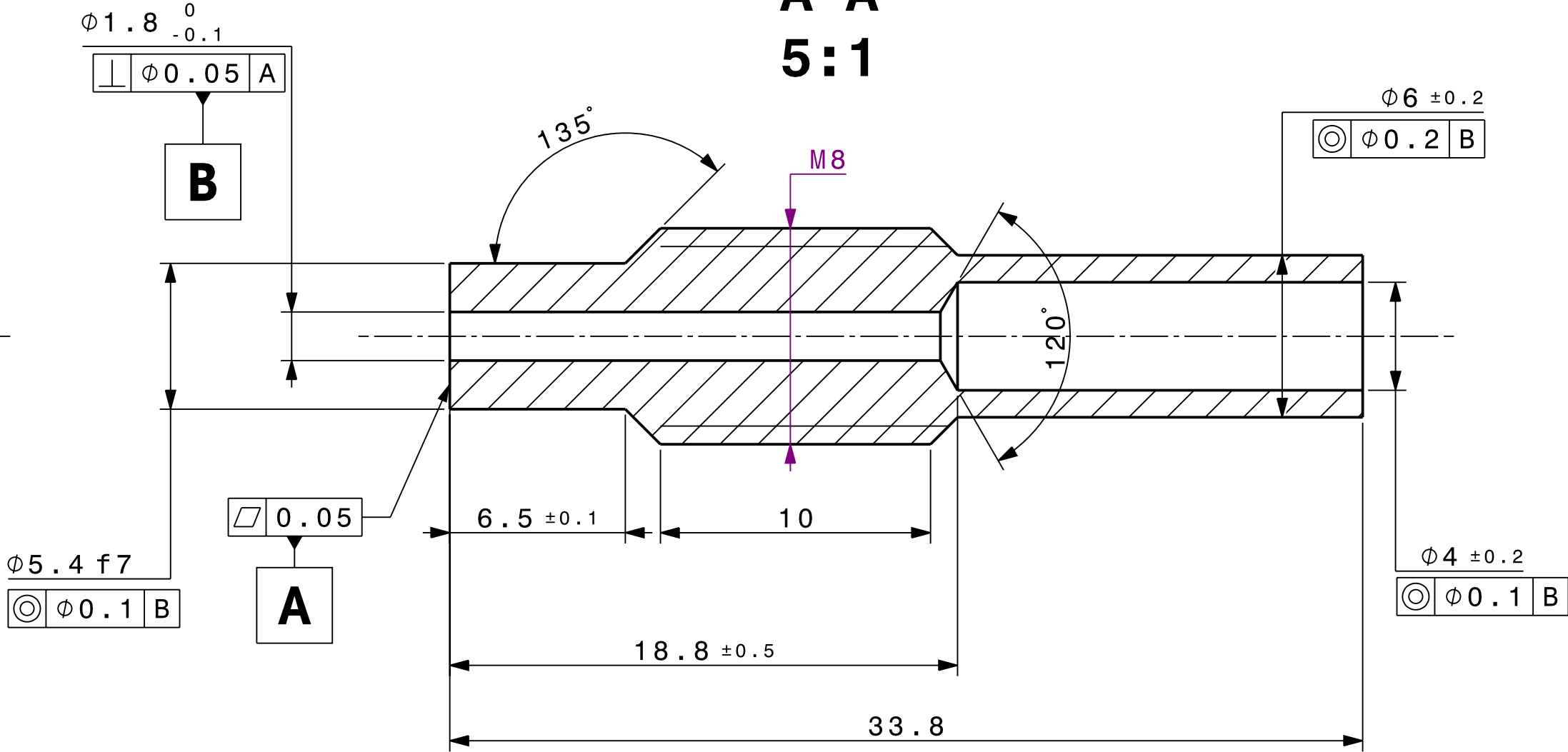
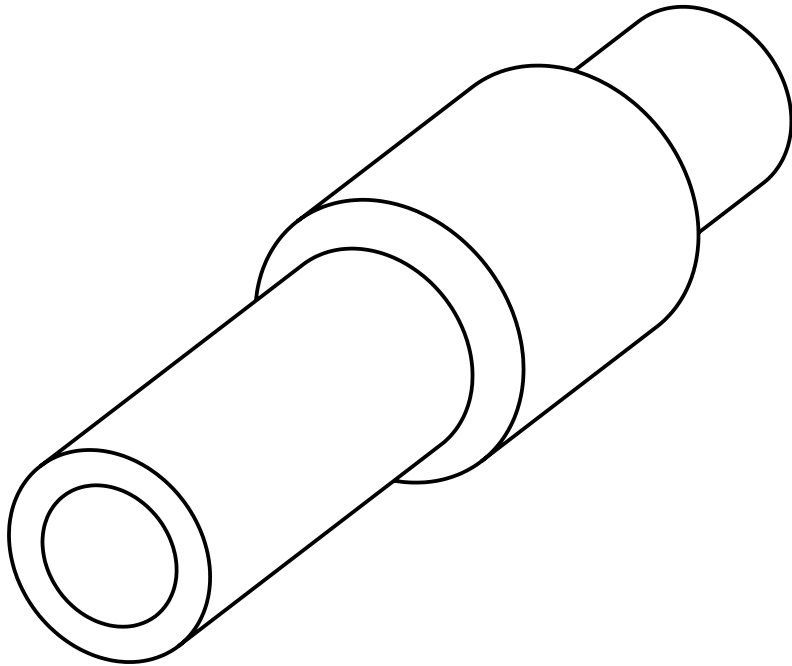
General tolerances ISO 13920-BF

		WHERE USED		Not Applicable		[Last checked at 2021-06-09 17:18]			
DESIGNATION Return manifold				DESIGNED	F.PEREA ALBELA		FORMAT A2		
				CHECKED					
				RELEASED			SCALE 1:2		
				APPROVED					
DRAWING DEFINITION Return manifold welding				DESIGNED 2021-06-09					
EQUIPMENT CODE									
	REFERENCES		Doc No: ST1456942_02		INDEX	LABEL		QAC	SHEET 1/1
						NOT VALID FOR EXECUTION			

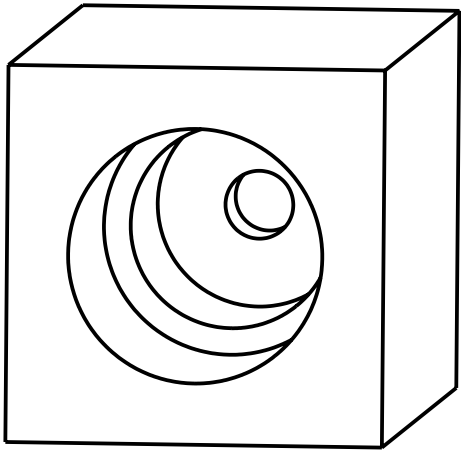
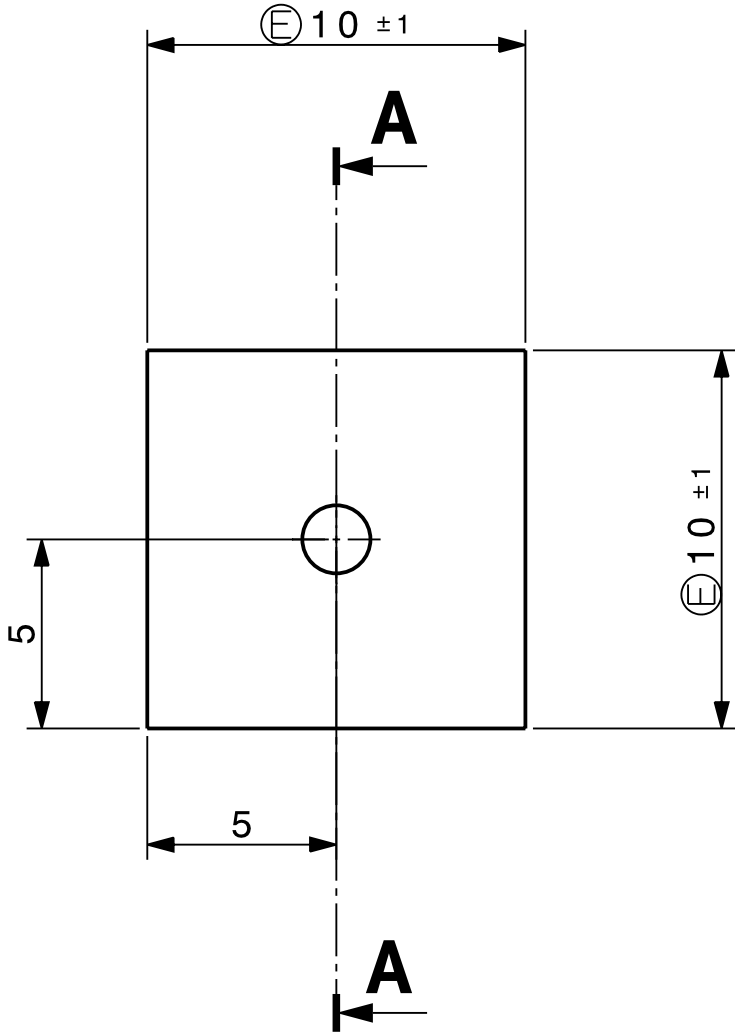
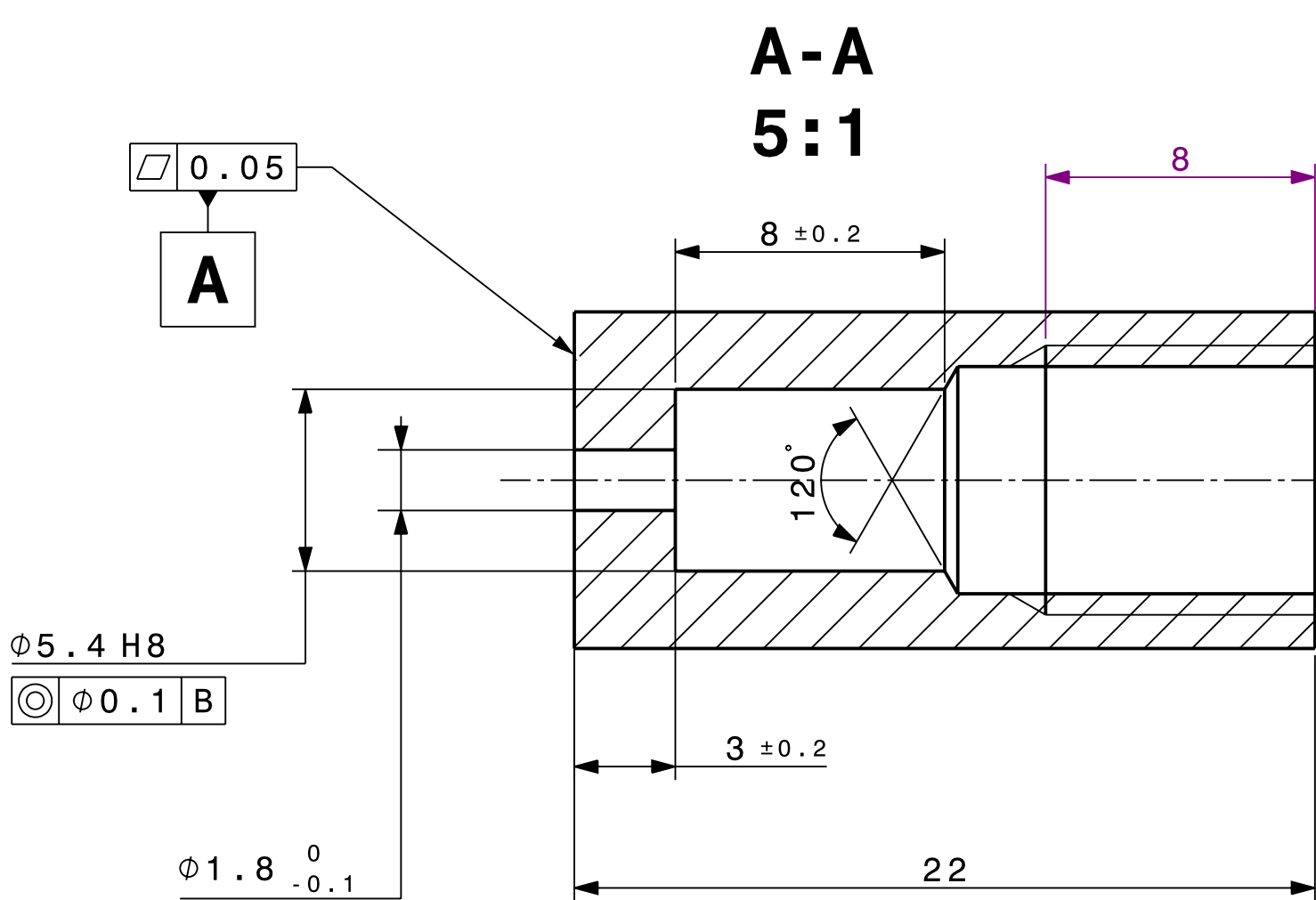
A



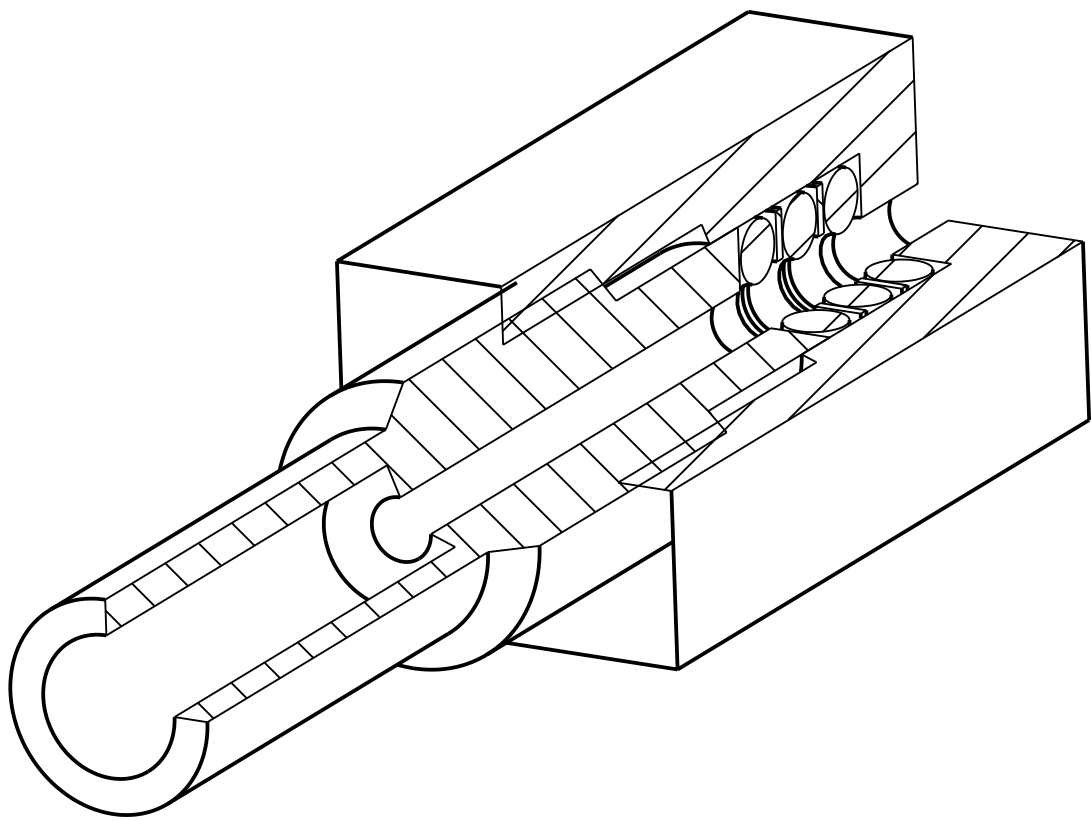
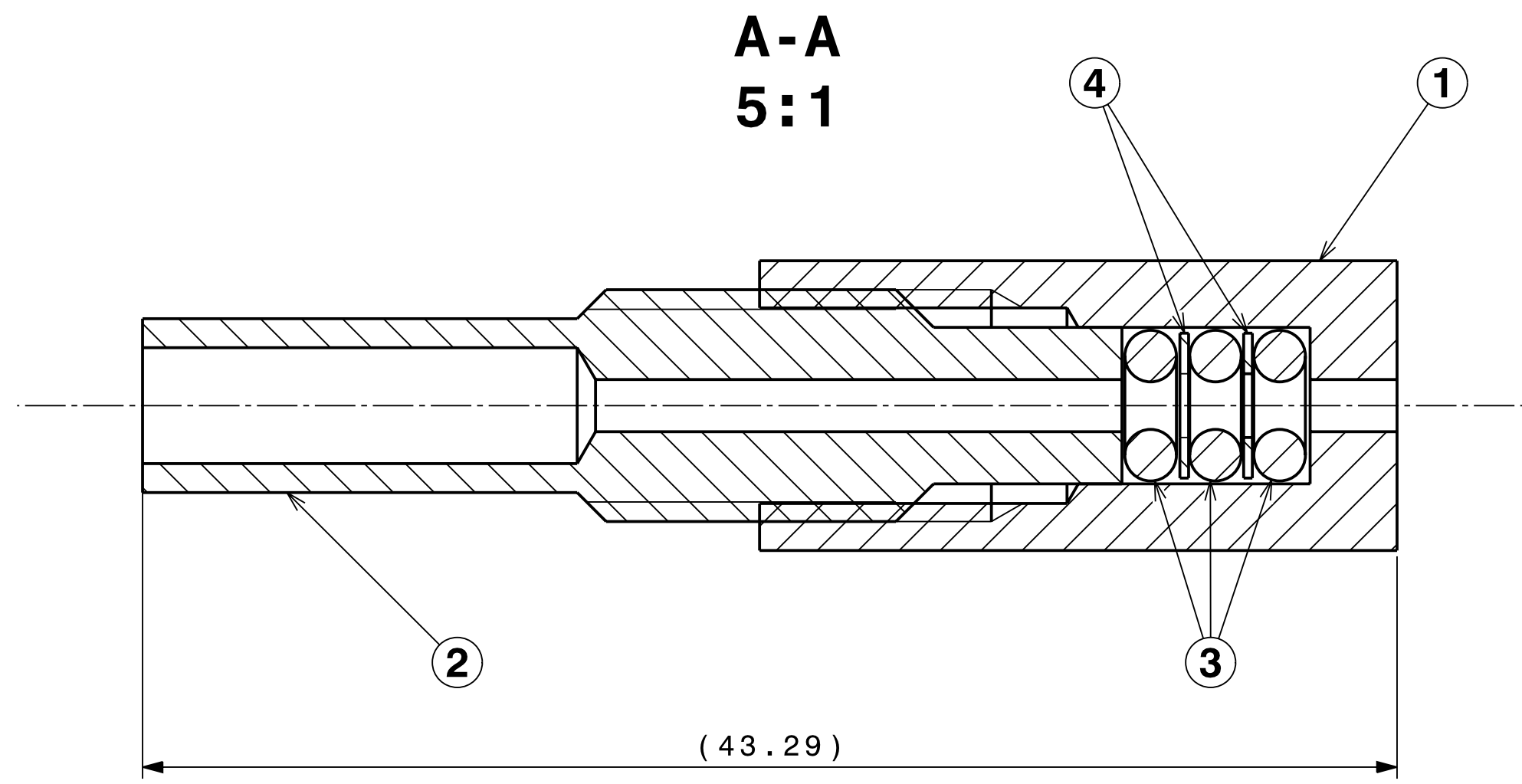
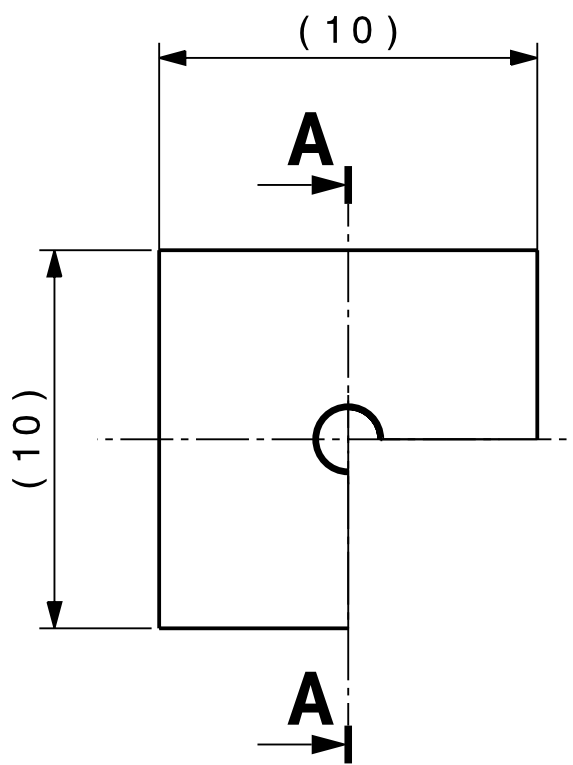
A

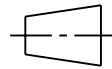


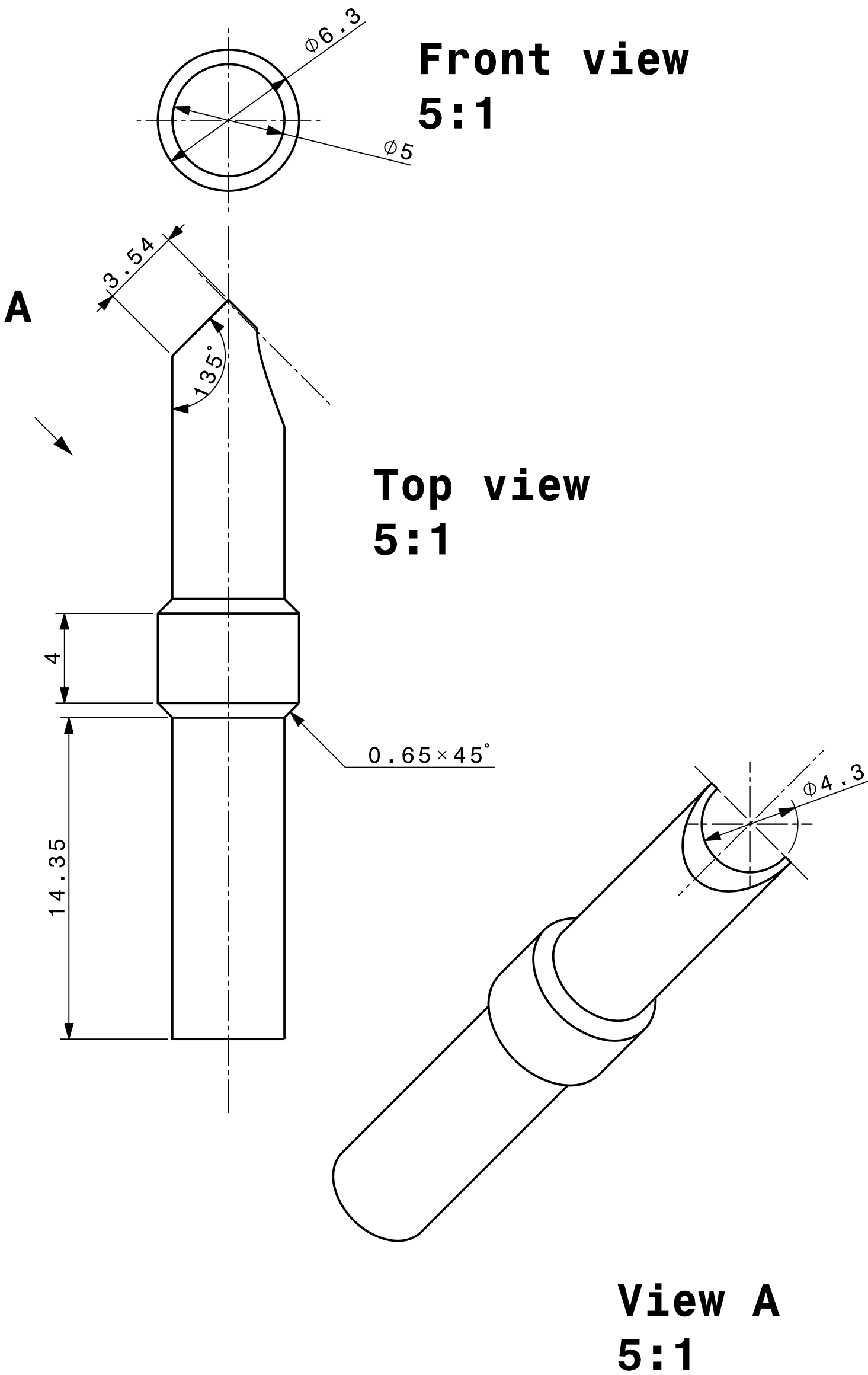
MATERIAL		INITIAL STATE	FINAL STATE	
Brass CuZn39Pb3				
ISO GPS STANDARDS				
ISO 2768-mK	Ra 3.2 ()	ISO 13715 -0.05 -1.0 +0.5 -0.1 ()		
Applicable ISO GPS standards valid on 2018-12-31 regardless of the drawing date				
MASS 7.81 g		WHERE USED Not Applicable [Last checked at 2023-04-21 11:38]		
DESIGNATION CMS Tracker Capillaries O-Ring Fitting - Male		DESIGNED		F.PEREA ALBELA
		CHECKED		
		RELEASED		
		APPROVED		
EQUIPMENT CODE CMS2TGET CMS phase 2 Tracker GEneral Tooling		DESIGNED 2023-04-21		
CERN	REFERENCES Doc No: ST1436923_02		INDEX	LABEL
	CMS2TGET0004			NOT VALID FOR EXECUTION
			QAC	SHEET
			-	1 / 1

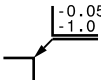


MATERIAL		INITIAL STATE	FINAL STATE
Brass CuZn39Pb3			
ISO GPS STANDARDS			
ISO 2768-mK	$\sqrt{Ra\ 3.2}$	ISO 13715	$\begin{smallmatrix} -0.05 \\ -1.0 \end{smallmatrix}$ $\begin{smallmatrix} +0.5 \\ -0.1 \end{smallmatrix}$
Applicable ISO GPS standards valid on 2018-12-31 regardless of the drawing date			
MASS 13.7 g	WHERE USED Not Applicable [Last checked at 2023-04-21 11:27]		
DESIGNATION CMS Tracker Capillaries O-Ring Fitting - Female		DESIGNED	F.PEREALBELA
		CHECKED	
		RELEASED	
		APPROVED	
EQUIPMENT CODE CMS2TGET CMS phase 2 Tracker General Tooling		DESIGNED 2023-04-21	
REFERENCES Doc No: ST1436922_02 CMS2TGET0005	INDEX	LABEL NOT VALID FOR EXECUTION	QAC - SHEET 1/1

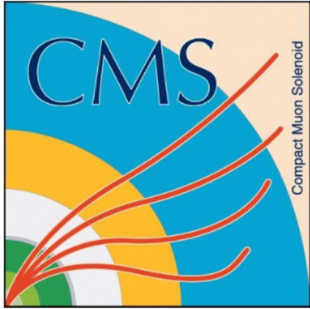
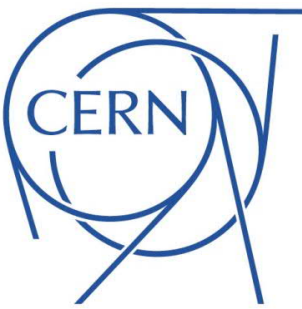


BILL OF MATERIALS					
POS	QUANT	DESIGNATION	REFERENCE	MATERIAL	EDH SCEN
01	1	CMS Tracker Capillaries O-Ring Fitting - Female	CMS2TGET0005	Brass CuZn39Pb3	
			ST1436922		
02	1	CMS Tracker Capillaries O-Ring Fitting - Male	CMS2TGET0004	Brass CuZn39Pb3	
			ST1436923		
03	3	O-ring nbr ID1.78mm x OD1.78mm		Rubber NBR	
			ST1501963		
04	2	Plain Washer SS A4 316 M2		Stainless Steel	
			ST1502249		
		WHERE USED Not Applicable [Last checked at 2023-04-21 15:56]			
DESIGNATION CMS Tracker Capillaries O-Ring Fitting			DESIGNED	F.PEREALBELA	FORMAT A3
			CHECKED		
			RELEASED		SCALE 5:1
			APPROVED		
EQUIPMENT CODE CMS2TGET CMS phase 2 Tracker GEneral Tooling			DESIGNED 2023-04-21		 
	REFERENCES Doc No: ST1436920_02		INDEX	LABEL	QAC
	CMS2TGET0006			NOT VALID FOR EXECUTION	-
					SHEET 1/1



ISO GPS STANDARDS						
ISO 2768-mK	$\sqrt{\text{Ra } 3.2}$ (✓)		ISO 13715   (✓)			
Unless otherwise mentioned, applicable ISO GPS standards are those prior to 2010-08-01 regardless of the drawing date						
		WHERE USED Not Applicable [Last checked at 2022-03-29 17:58]				
DESIGNATION Soft soldering tip			DESIGNED	F.PEREA ALBELA		FORMAT A3
			CHECKED			
			RELEASED			SCALE 5:1
			APPROVED			
EQUIPMENT CODE			DESIGNED 2022-03-29			
	REFERENCES	Doc No: ST1556180_02	INDEX	LABEL NOT VALID FOR EXECUTION		SHEET 1/1

7.2. Anexo B: Informe del test de capilares

		Test Report	
		Outer Tracker Cooling	
EDMS Project Document N° 2694858 v.1	CMS Collaboration Document N°	Issued: 11 th Feb 2022	Page 1 of 29
		Modified: -	Revision 01
Test Report for CMS Outer Tracker CO₂ Cooling – TBPS and TB2S Capillaries – Tubes Only			
Abstract: Repeatability pressure drop tests have been performed in capillaries to check the reliability of the test procedure designed using custom connectors for CO₂ testing at -35°C. After this, capillaries were tested to calculate the necessary length for each one to get a target pressure drop. Then, the capillaries were tested again after the cutting process to check the results. The test was successful. The procedure generates consistent results. The variation obtained in these results is tolerable in terms of final vapour quality. A recommendations section is included to propose improvements in time and quality of the results.			
Prepared by: Fernando Perea Albela	Checked by: Thomas French		
Distribution list: Antti Onnela, Jeremy Andrea, Jerome Daguin, Hans Postema			

EDMS Project Document N° 2694858 v.1	Test Report for TB2S and TBPS Tilted Capillaries - Tubes	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	11 th Feb 2022

TABLE OF CONTENTS

1	MODIFICATION RECORD.....	3
2	INTRODUCTION	3
3	BACKGROUND	3
4	TEST SETUP OVERVIEW	7
5	METHODOLOGY	10
6	RESULTS AND DISCUSSION	12
6.1	REPEATABILITY TEST	12
6.2	PRESSURE DROP TEST	15
7	CONCLUSIONS	19
8	RECOMMENDATIONS	20
8.1	NOMINAL CONDITIONS (12 BAR/-35°C)	20
8.2	AMBIENT CONDITIONS (50 BAR/+15°C)	22
8.3	AMBIENT CONDITIONS AND MULTIPLE CAPILLARIES (50 BAR/+15°C)	24
9	REFERENCES	25
10	APPENDICES	26
10.1	APPENDIX A: CUSTOM CONNECTOR'S BOM (BILL OF MATERIALS).	26

EDMS Project Document N° 2694858 v.1	Test Report for TB2S and TBPS Tilted Capillaries - Tubes	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	11 th Feb 2022

1 MODIFICATION RECORD

Rev. N°	Date	Description	Page
01	11 th Feb 2022	First revision.	-

2 INTRODUCTION

This document describes a set of pressure drop tests on capillaries for TBPS Tilted and TB2S. For this purpose, CO₂ at nominal conditions (12 bar/-35°C) was chosen to reproduce the real conditions of operation. Two tests were carried out:

1. A repeatability test to check whether the capillaries pressure drop measurements are reliable enough.
2. A capillaries pressure drop test with CO₂ at nominal conditions (12 bar/-35°C).

3 BACKGROUND

For the repeatability test, three capillaries were tested five times to check how large the variation in the pressure drops was. Each time the full procedure was followed to ensure that no variations were introduced to the experimental procedure.

Then, the vapour quality of the CO₂ is calculated with the minimum and maximum pressure drop of each capillary. If this difference is acceptable, we can be more confident in the reliability of the second set of tests.

The pressure drop test was based on the formulation for calculating pressure drops in circular pipes.

To perform these simple calculations, an online calculator was used.

EDMS Project Document N° 2694858 v.1	Test Report for TB2S and TBPS Tilted Capillaries - Tubes	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	11 th Feb 2022

Pressure Drop Online-Calculator

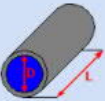
Calculation of pressure drops of flowing liquids and gases in pipes and pipe elements (laminar and turbulent flow).

Note: Calculations are possible only, if Javascript is activated in your browser.
[Pressure Drop Online-Calculator for small mobiles](#). This version is usable for browsers without Javascript also.

[Pressure Drop Software for Excel](#) [Druckverlust Software für Excel](#)

Element of pipe

Group: Subgroup:

 Diameter of pipe D: Length of pipe L:

Pipe roughness:

Flow medium

Flow medium:

Condition: ☒ liquid ☐ gaseous

Mass flow:

Weight density:

Dynamic Viscosity:

Additional data for gases:

Pressure (inlet, abs.):

Temperature (inlet):

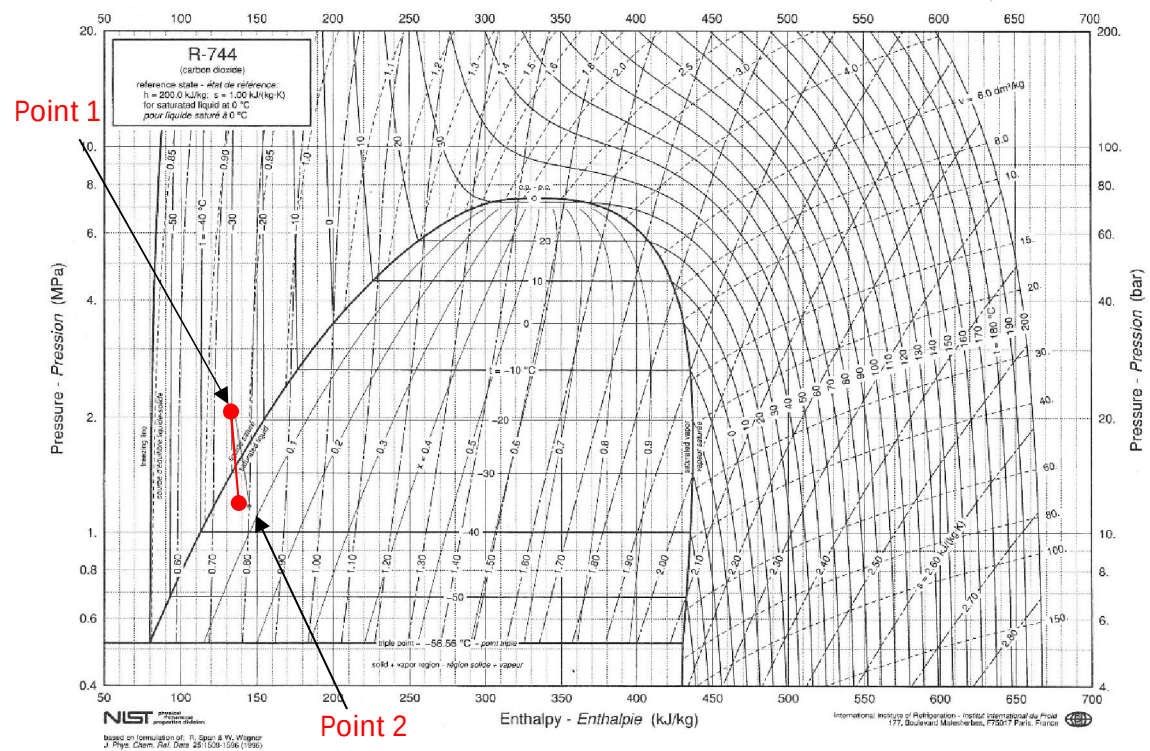
Temperature (outlet):

Output of values: ☒ metrical ☐ US

Figure 1 – Online pressure drop calculator interface [2].

In the real detector, the CO₂ will be fully liquid in the capillaries, for this reason the CO₂ in this test must be in the fully liquid region.

A manual valve is used at the outlet of the capillary for getting this condition. The manual valve (MV3 in following schemes) produces an additional pressure drop downstream of the capillary, forcing the exit point of the capillary to be in the liquid region. This process is shown the next figure:



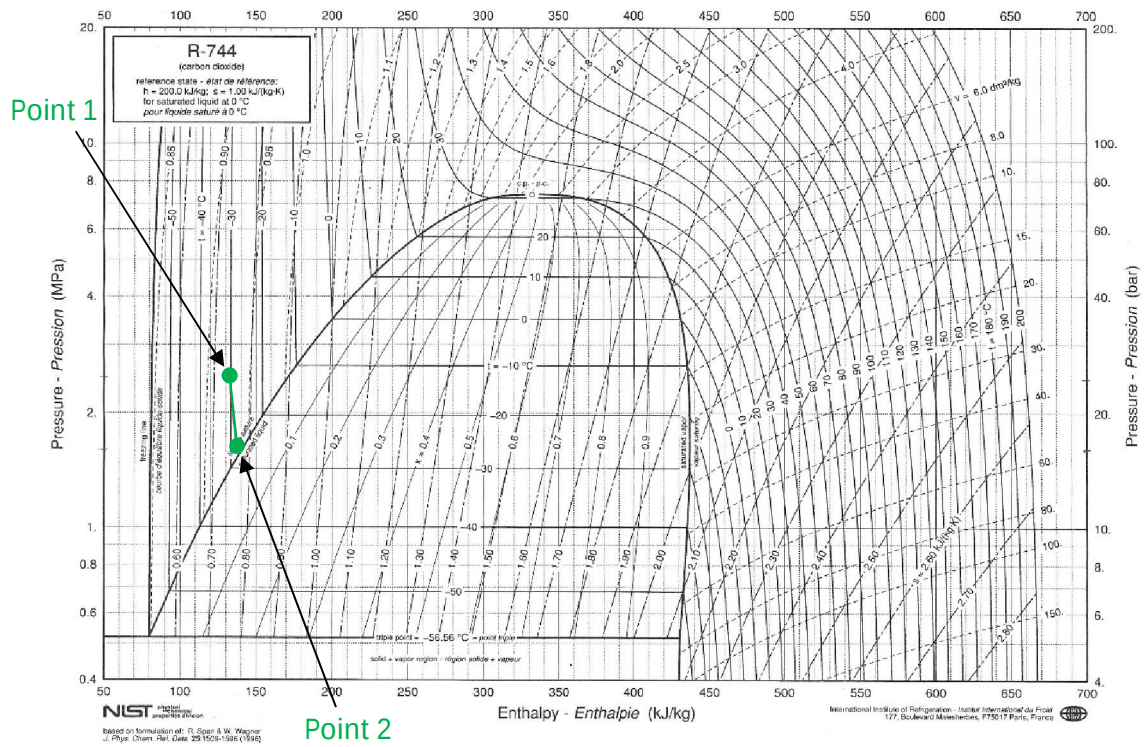


Figure 2 – Test plot into a p-h CO₂ graph.

EDMS Project Document N° 2694858 v.1	Test Report for TB2S and TBPS Tilted Capillaries - Tubes	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	11 th Feb 2022

The red line is the pressure drop of the capillary at a certain mass flowrate, with no other pressure drops. It slants to the right, and crosses into the 2 phase region due to the heat pickup from the environment. Below it, the green line is the same capillary pressure drop when the manual valve placed after the capillary is tightened. It may seem different in length, but it is only because the graph is in a logarithmic scale and the actual value is still the same (8.7bar for both the red and green lines).

With this setup, the test is done with the capillary in the fully liquid region (as in the second plot), which guarantees reliable results.

4 TEST SETUP OVERVIEW

The test setup uses SS316L capillaries 0.65 ID x 1.60 OD produced by Le Guellec, and the existing CO₂ installation in the Lyon cold room at Building 186 using the TRACI+ cooling plant.

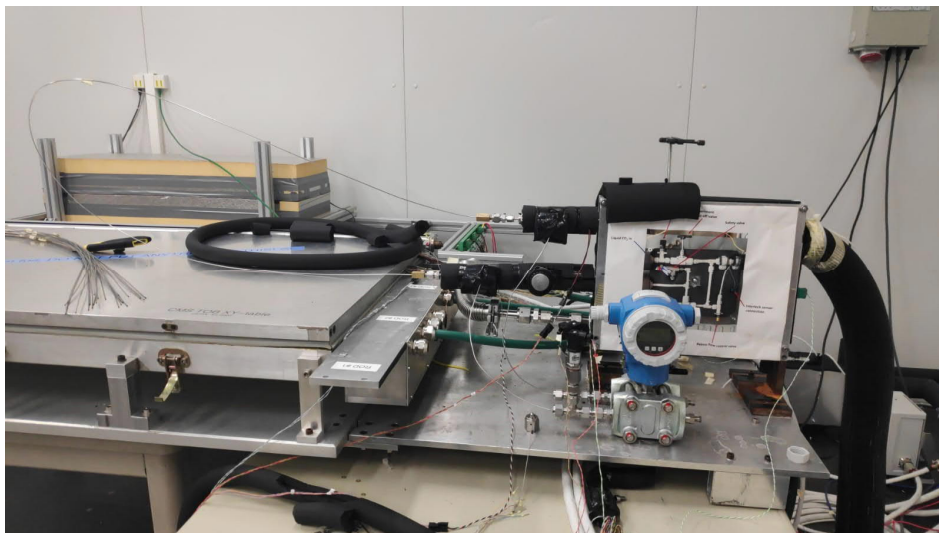


Figure 3 – Test Setup in the Lyon cold room

The capillaries were cut to the same length (1800 mm.) to avoid any differences in results dependant on length. With this aim the technique used was wire electrical discharge machining (EDM) at CERN central workshop. This process ensures a good end finish of the capillaries to avoid any variation in pressure drop due to manufacturing debris or burrs blocking the tube. The capillaries were taped together in a bundle using aluminium tape, with the cut marks aligned, and cut in one operation – a significant time saving.

The capillaries were connected to this setup with two custom connectors. These connectors are composed of two threaded brass bodies that form a tight “sandwich” of metallic washers and rubber O-rings providing a good seal. The force from the pressure of the CO₂ on the end of the

EDMS Project Document N° 2694858 v.1	Test Report for TB2S and TBPS Tilted Capillaries - Tubes	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	11 th Feb 2022

capillary is very small, and is easily held by the friction of the o-rings (tested at up to 60 bar with the fitting tightened by hand).

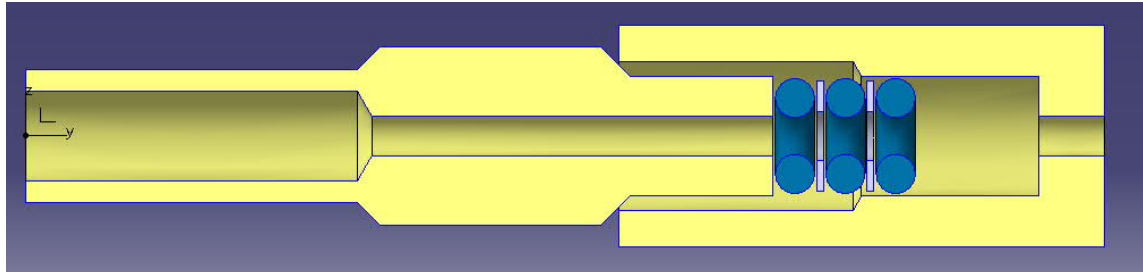


Figure 4 – Custom connector for capillaries

The TRACI+ (an upgraded TRACI 2.3) cooling plant provides CO₂ to the experiment at -35°C and mass flow rate up to ≈ 1.6 g/s. The TRACI+ is placed outside of the Lyon cold room and connected to the experiment inside by an insulated coaxial pipe.

In theory, the temperature of the cold room could be lowered to the same as the fluid when testing, but it would make the measurement operation more difficult. It is true that lowering the ambient temperature would reduce the heat leak significantly but to make the measurement operation the easiest possible, we chose to run the room at ambient temperature (15°C) and the capillaries were insulated with Armaflex to reduce the heat leak.

A differential pressure sensor (Endress+Hauser PMD75-24J6/0, PMD75-AAA7L11BAAA) was installed to measure the pressure drop through the circuit, this pressure drop includes a short section of pipes and connectors of 4 mm ID at the inlet and outlet, but the pressure drop in these is completely negligible when compared to the pressure drop in the small diameter capillary. Absolute pressure sensors are also installed at the inlet and outlet which allows us to validate the value given by the differential sensor.

The temperature at the inlet and outlet is measured using two PT100 RTD sensors in four-wire mode (RS Pro 362-9856, 1/3 DIN, 2.0x2.3mm) fixed in place using thermal grease (Dowsil (formerly Dow Corning) 340 heat sink compound, $k=0.6\text{W/mK}$) and Kapton tape onto the inlet and outlet tubes. The temperatures are read via a PLC rack, and recorded in LabVIEW.

EDMS Project Document N° 2694858 v.1	Test Report for TB2S and TBPS Tilted Capillaries - Tubes	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	11 th Feb 2022

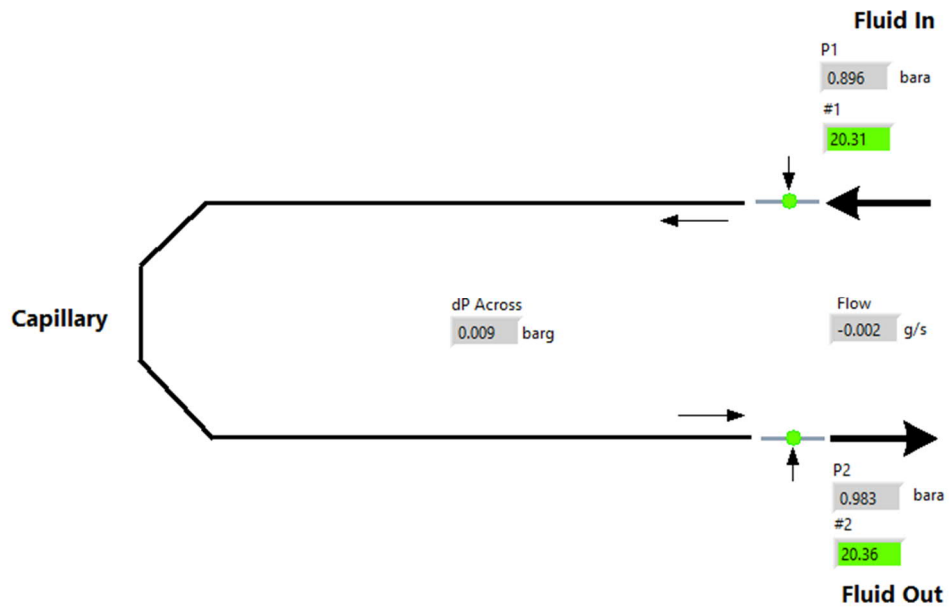


Figure 5 – Schematic of Capillary Test Setup and sensor positions in LabVIEW

To carry out the test, the CO₂ flow was required to be controlled by the following set of valves:

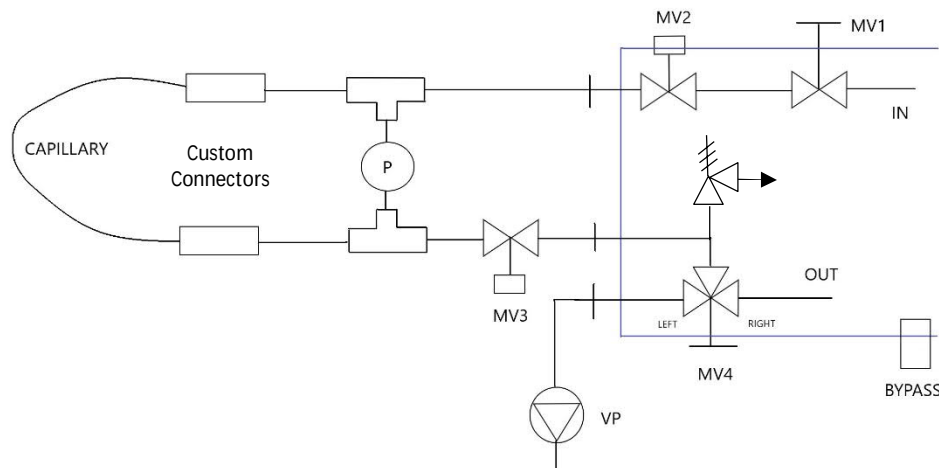


Figure 6 – Valves test set up scheme

Valve	Function
Manual Valve 1 (MV1)	Open/close the feed of CO ₂ to the experiment
Manual Valve 2 (MV2)	Regulate the flow of CO ₂ to the experiment
Manual Valve 3 (MV3)	Increase the outlet pressure. Place into the fully liquid region the CO ₂ inside the capillary

EDMS Project Document N° 2694858 v.1	Test Report for TB2S and TBPS Tilted Capillaries - Tubes	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	11 th Feb 2022

Manual Valve 4 (MV4)	Three-ways valve to close the exit, connect the exit to TRACI+ or vent
Bypass	Allow TRACI+ to keep working while the capillary is being changed.
VP	Vacuum pump

5 METHODOLOGY

It is crucial to follow the procedure as it states in this document. To arrive at this procedure, two previous tries with different methods produced strange results. This procedure is only designed to work with the custom connectors showed in Figure 2.

1. MV1 closed (perpendicular to the pipe), MV4 left, MV3 open (fully anticlockwise), MV2 open (fully anticlockwise). VP attached but off. No capillary attached yet.

The flow from TRACI is separated from our test set up in this position. The CO2 circulates through the bypass.

2. Install the capillary. Completely unscrew the capillary connector nuts from the inlet and outlet. Slide the nut over the end of the capillary, followed by o-ring, washer, o-ring, washer, o-ring (this process avoids that the sharp capillary edges scratch the rubber o-rings and produce debris (if damage observed, replace the o-rings). Screw on the nuts to the connector bodies gently finger tight, then using a spanner add 1/8 turn (finger tight alone is NOT sufficient to hold the capillary securely). Hold onto the body of the connector when tightening. Add/replace insulation.

3. BASELINE. Connect vacuum pump (VP) hose. Turn on VP. Wait at least 30 seconds. Close MV4 90° (closed). Turn off VP. Remove VP hose from VP (ideally the pressure does not rise. If it rises, there is a leak).

3. ALTERNATIVE. Partially open MV1. Vent some CO2 during 10 seconds approximately. MV4 closed (90°).

4. Turn MV4 to right (connected to TRACI). Turn MV1 open (parallel to the pipe).

5. Run TRACI. Set it to 12 bar (-35 °C). Have bypass open (bypass valve fully clockwise). Pump speed should be in midrange position (see picture below). Wait to reach 12 bar set-point in TRACI.

EDMS Project Document N° 2694858 v.1	Test Report for TB2S and TBPS Tilted Capillaries - Tubes	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	11 th Feb 2022

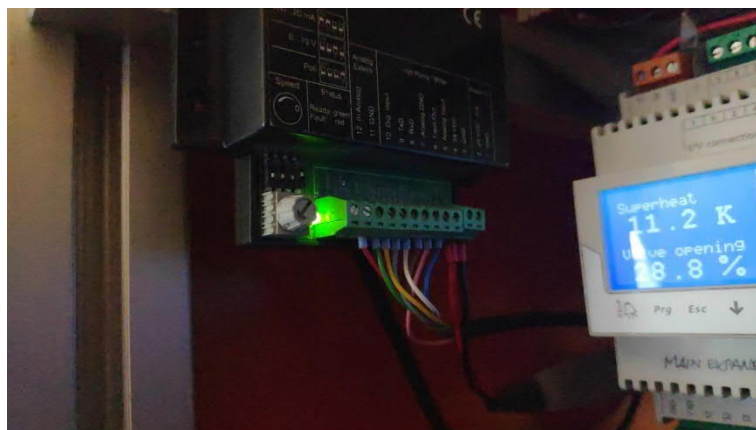


Figure 7 – TRACI+ potentiometer

6. Slowly close fully the bypass until stable pressure drop and temperatures are recorded in the capillary. Close the MV3 (see picture below) until the exit of the capillary is in the fully liquid region (this is generally visible when $T_{12} > T_1$, the liquid increases in temperature due to the heat leak). With pump speed in midrange positions means about 8-10 bar of pressure drop across the TRACI pump. Measure 1.2, 1.4 and 1.6 g/s if possible (if not, as close as possible). Do not go over 15 bar across the pump (interlock set at 16 bar), checking the display inside the TRACI to get a real-time reading as the pump speed is being adjusted.

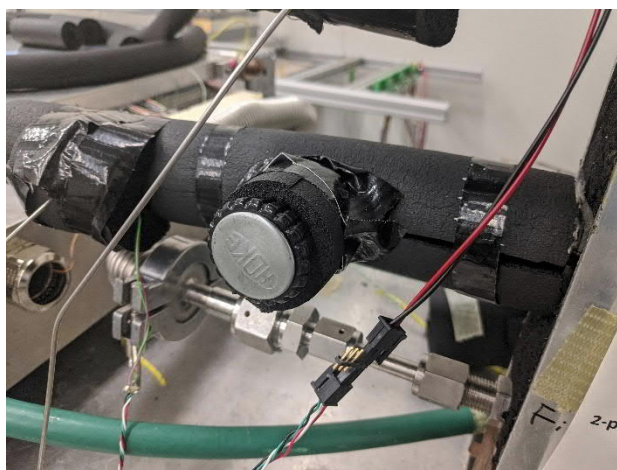


Figure 8 – Manual valve 3

7. Record T_1 , P_1 , T_{12} , P_2 , $\dot{m}$, dP and capillary number at each flowrate.
8. Open bypass fully (this allows TRACI to keep circulating CO_2).
9. Close MV1 (perpendicular to the pipe).

EDMS Project Document N° 2694858 v.1	Test Report for TB2S and TBPS Tilted Capillaries - Tubes	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	11 th Feb 2022

10. Remove insulation from all pipes. Use heat gun 30°C (about position 3 or 4 in heat gun) or wait for the pipes warm up itself (10-15 minutes).

11. Check vacuum hose is disconnected from vacuum pump.

12. Close MV4 180° left (venting position). This will vent CO₂. Check p1 and p2 is 1 bar.

13. Dry the water from connectors and beginning and end of capillary.

14. Unscrew the capillary connector using spanner and hand, carefully remove the capillary and for testing the next capillary go to point 2.

N.B. If finish testing for the day and the capillary has been removed, open the bypass and reduce the pump speed to a midrange point. Close MV1 and turn MV4 to the left.

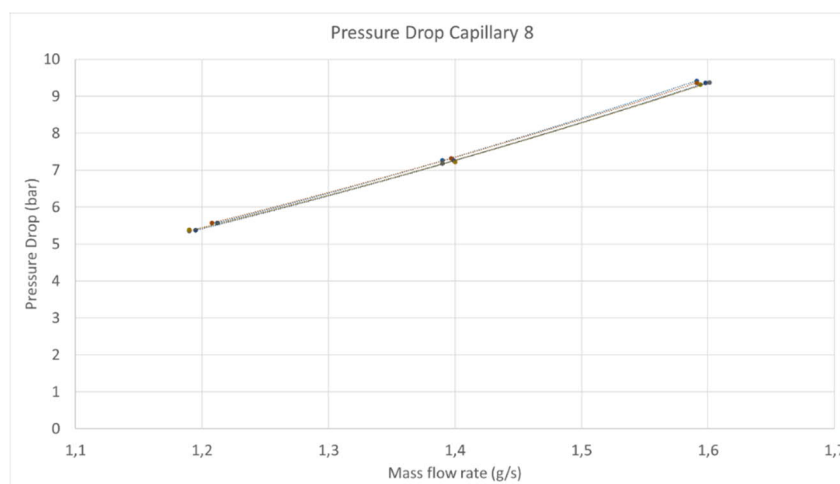
If finish testing for the day and the capillary is still in place, open the bypass and reduce the pump speed to a midrange point. Close MV1 and leave MV4 turned to the right (NOT 90°. LIQUID TRAPPED IN THE HOSE).

The TRACI may need to be refilled with CO₂ occasionally to replace the small amounts of CO₂ vented during each capillary swap.

6 RESULTS AND DISCUSSION

6.1 Repeatability test

The capillaries #8, #16, #28 were tested following the baseline procedure to check the reliability of our procedure. These are the results of each of these tubes:



EDMS Project Document N° 2694858 v.1	Test Report for TB2S and TBPS Tilted Capillaries - Tubes	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	11 th Feb 2022

Figure 9 – dP results for Capillary #8

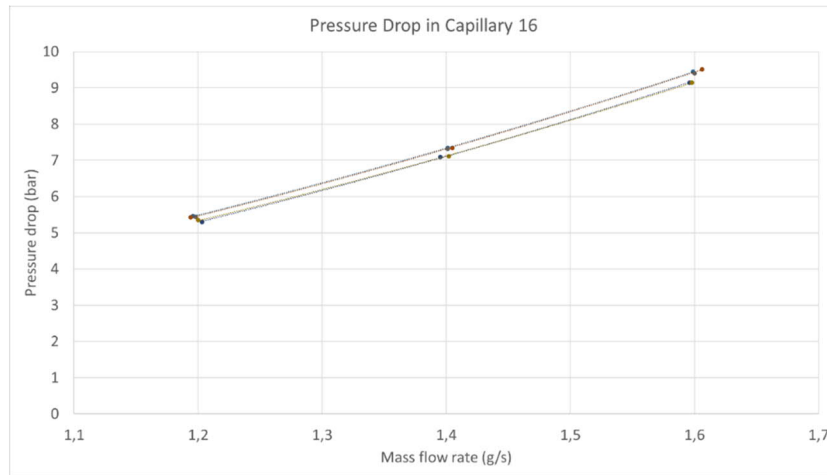


Figure 10 – dP results for Capillary #16

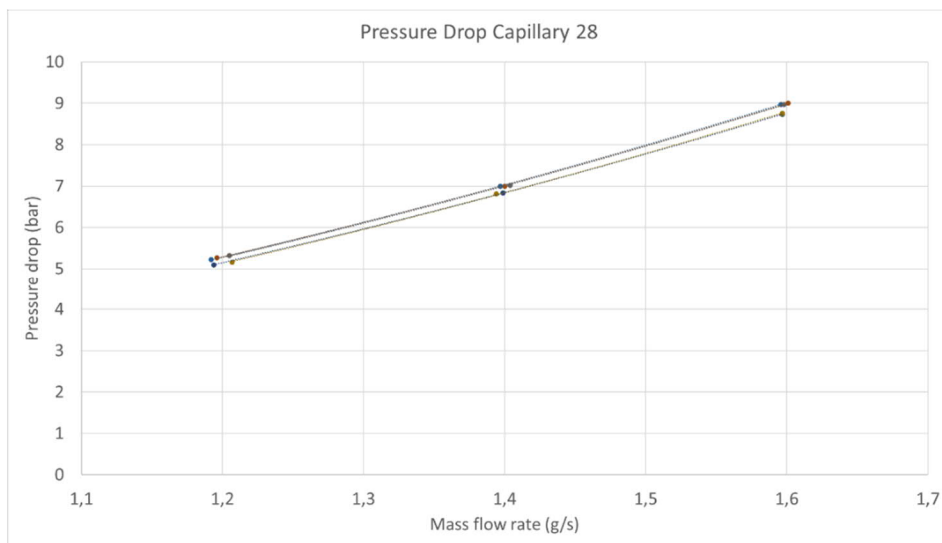


Figure 11 – dP results for Capillary #28

For the capillary #8 the difference between the highest pressure drop and the lowest is 0.17 bar, for capillary #16 is 0.52 bar, and for #28 the maximum difference is 0.25 bar.

It is necessary to know whether these differences between readings of the same capillary would have significant influences in the vapour quality in the capillary, which is the final target during operation.

EDMS Project Document N° 2694858 v.1	Test Report for TB2S and TBPS Tilted Capillaries - Tubes	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	11 th Feb 2022

With the measured pressure drop of the capillary at a length of 1800mm, the new length of it is calculated to get 8.7 bar of pressure drop. We assume that the capillary is then cut to this calculated length for each of the high and low cases. Then, using the online calculator, the mass flow rate of CO₂ to get 8.7 bar pressure drop is calculated. Then the resulting vapour quality “x” is calculated for a nominal load of 160W. The difference between the two vapour quality readings shows the variation in vapour quality that an evaporator would experience due to the uncertainty in the original measured pressure drop. This calculation procedure is summarized in the following scheme:

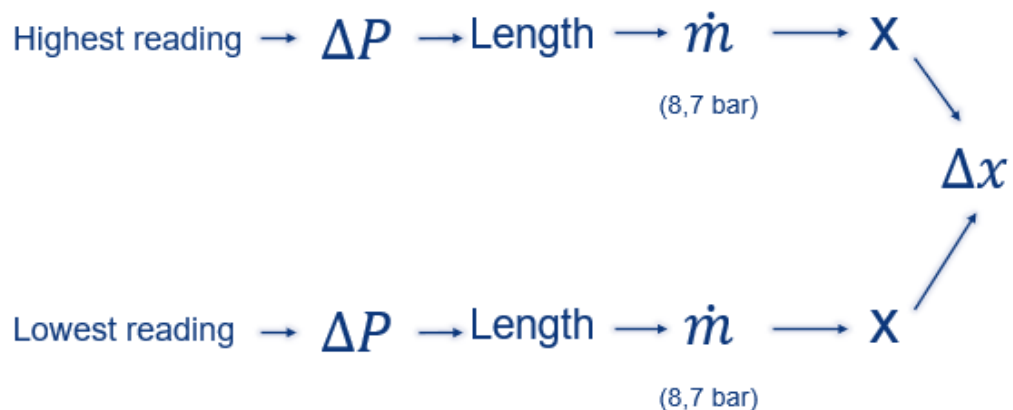
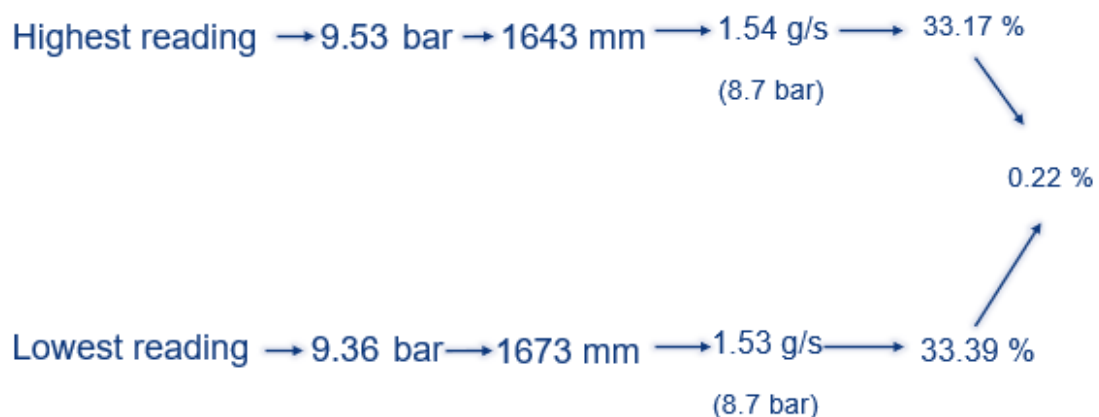


Figure 12 – Vapour quality calculation scheme

These are the results for these three capillaries:

- Capillary #8



- Capillary #16

EDMS Project Document N° 2694858 v.1	Test Report for TB2S and TBPS Tilted Capillaries - Tubes	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	11 th Feb 2022

Highest reading → 9.67 bar → 1619 mm → 1.55 g/s → 33.83 %
(8.7 bar)

Lowest reading → 9.15 bar → 1711 mm → 1.51 g/s → 32.96 %
(8.7 bar)

0.87 %

- Capillary #28

Highest reading → 9.02 bar → 1736 mm → 1.50 g/s → 34.06 %
(8.7 bar)

Lowest reading → 8.77 bar → 1786 mm → 1.48 g/s → 34.52 %
(8.7 bar)

0.46 %

The variation in mass flow rate is between 3.1% and 8.5%, and the result of this variation in flow rate is an increase of up to 0.87% vapour quality.

Checking these results of repeatability test, we conclude that the differences will have a negligible impact on the performance of the detector evaporators and the pressure drop test results will be reliable.

6.2 Pressure drop test

Once the first set of tests confirmed that the procedure was consistent and results were reliable, the pressure drop test was carried out.

EDMS Project Document N° 2694858 v.1	Test Report for TB2S and TBPS Tilted Capillaries - Tubes	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	11 th Feb 2022

23 capillaries were tested following the procedure (baseline in point 3) described in the methodology. For the TB2S Manifold Test 18 capillaries are required, so the target was to have 5 spares measured. The next two figures are the whole results plot and a detail of the operation nominal point.

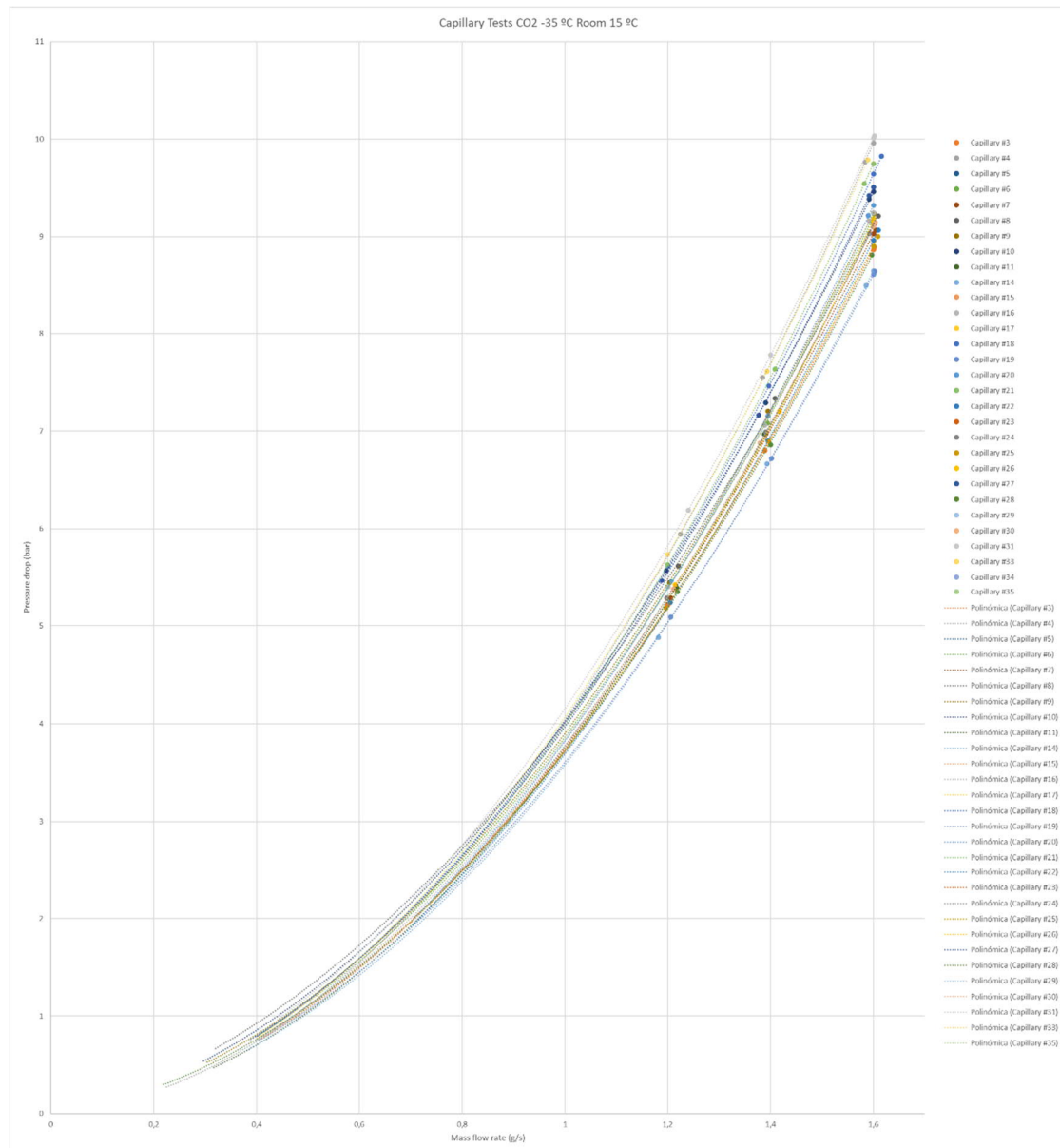


Figure 12 – dP results for whole batch of capillaries

EDMS Project Document N° 2694858 v.1	Test Report for TB2S and TBPS Tilted Capillaries - Tubes	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	11 th Feb 2022

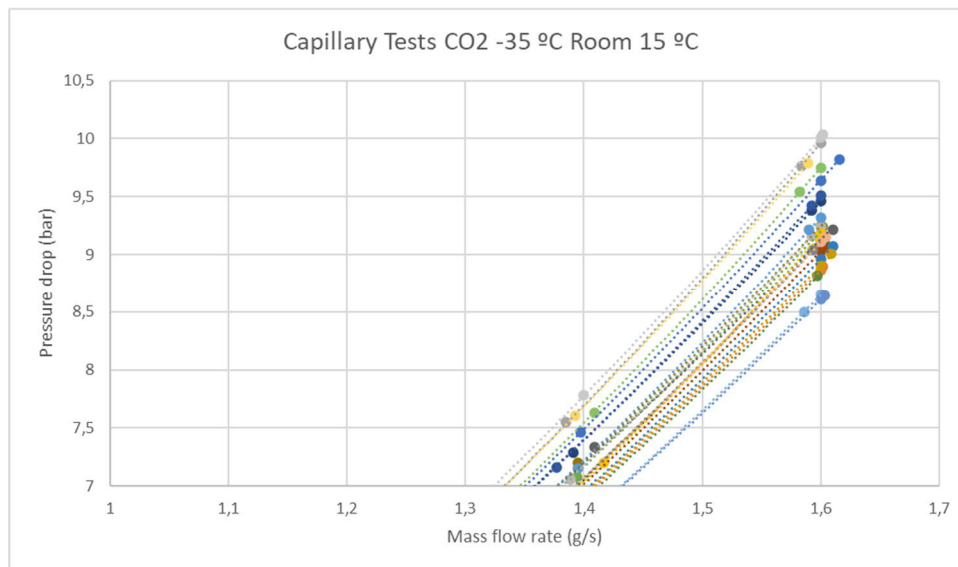


Figure 13 – dP results detail for nominal conditions

A variation of about 1.5 bar at the nominal flow rate of 1.6g/s was measured.

After this test, the 23 capillaries were cut to the calculated length to produce a pressure drop of 8.7 bar. To verify these results, the batch was measured again and the results are the following:

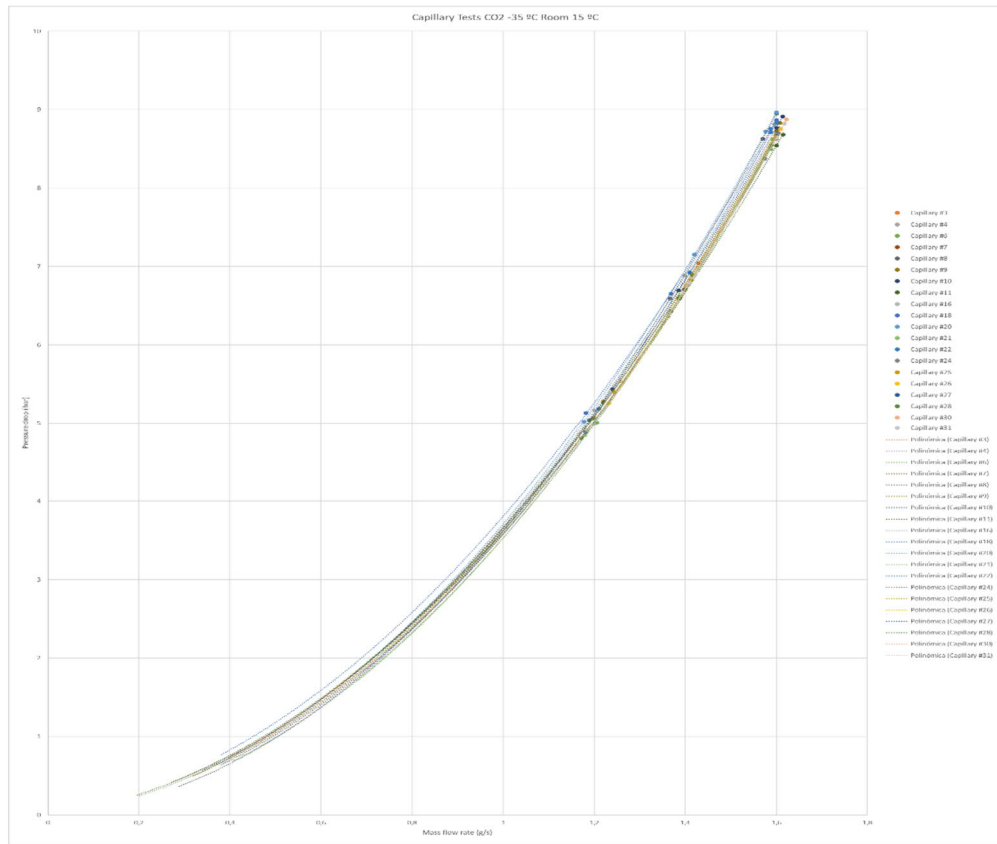


Figure 14 – dP results detail for whole batch of capillaries

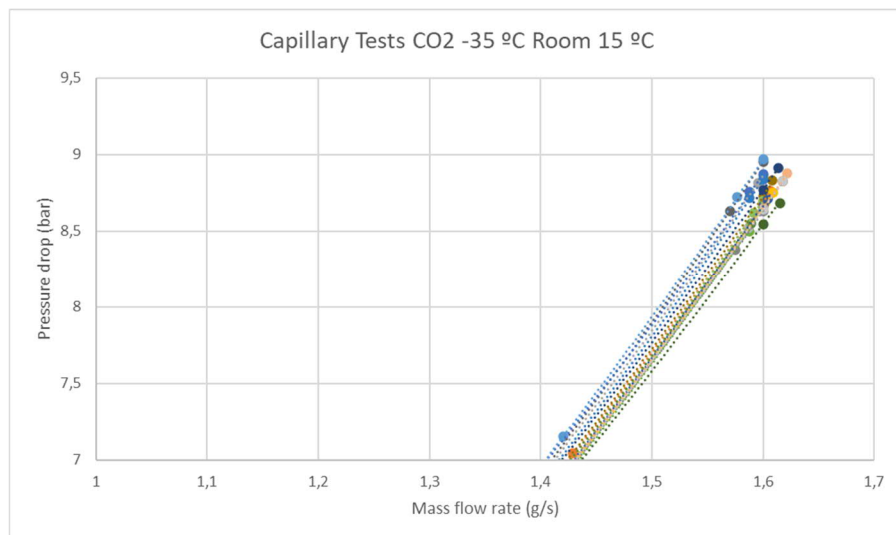


Figure 15 – dP results detail for nominal conditions

EDMS Project Document N° 2694858 v.1	Test Report for TB2S and TBPS Tilted Capillaries - Tubes	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	11 th Feb 2022

The variation is reduced to 0.5bar, which when a uniform 8.7bar is applied across all the capillaries, will result in a mass flow rate variation of between 1.575g/s and 1.615g/s, and a resulting variation in vapour quality of 32.5% and 31.7%, very close to the target of 33%.

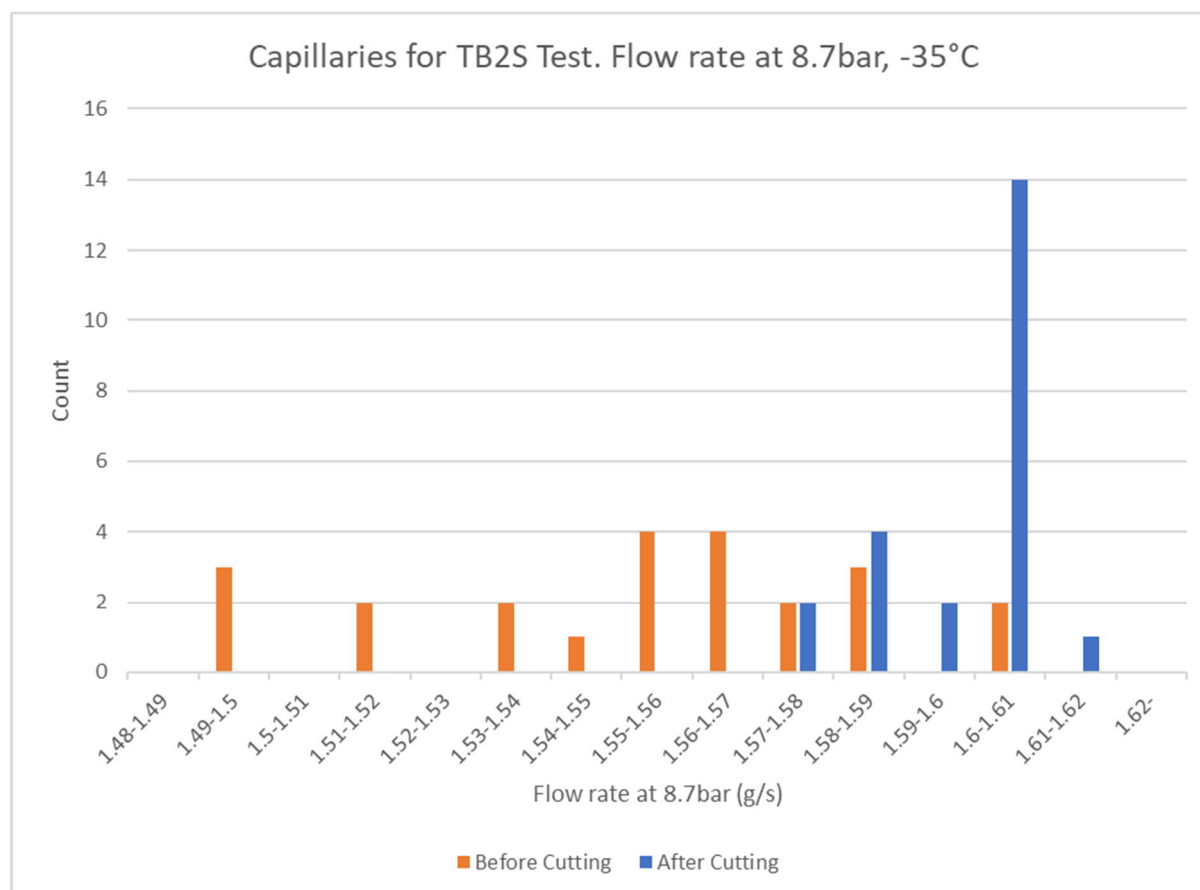


Figure 16 – Mass flow rate variation calculated for constant pressure drop of 8.7bar

7 CONCLUSIONS

The results of the repeatability test show the procedure has good consistency. The small variation between readings do not produce significant changes in the final objective, the vapour quality at the exit of the detector evaporator.

The reliability of these results was checked with the pressure drop test. The measurements of the whole batch before cutting and after show good repeatability.

EDMS Project Document N° 2694858 v.1	Test Report for TB2S and TBPS Tilted Capillaries - Tubes	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	11 th Feb 2022

The following plot is a demonstration of the reliability of the procedure and results. The plot shows the pressure drop at nominal conditions of 1.6g/s at -35°C before the cutting process and after it.

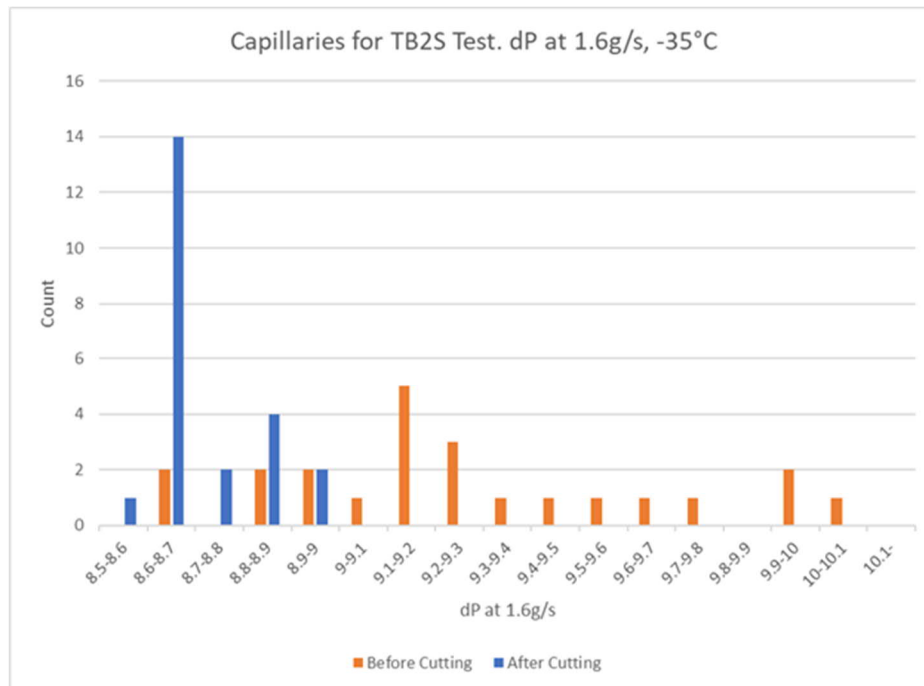


Figure 17 – Comparison between dP results before and after cutting

The variability of the results is tolerable, because the variation between the highest and the lowest pressure drop will not change significantly the vapour quality of CO₂ at the exit of the evaporator.

8 RECOMMENDATIONS

In this section, some ideas will be presented in order to answer the question: “What setup should we use in the future?”

8.1 Nominal conditions (12 bar/-35°C)

In the case that the testing continues to be carried out at 12 bar/-35°C, some improvements can be made:

- The capillary could be insulated between 2 sheets of Armaflex rather than a tube. This means that the setup must be designed in a horizontal way, to be fitted into a box similar as the one showed in figure 3.

EDMS Project Document N° 2694858 v.1	Test Report for TB2S and TBPS Tilted Capillaries - Tubes	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	11 th Feb 2022

- The Manual valve 3 should be replaced for a Swagelok regulator valve with “Vernier knob” (see next figure), due to lack of sensitivity on the previous one that makes very difficult to adjust the pressure drop to get the CO₂ in the fully liquid region.



Figure 18 – Swagelok regulator valve wit “Vernier handle”

- For this method, the estimated time for testing each capillary is 30 minutes approximately.
- After obtaining results from more testing, and gaining more confidence in the method, it might be decided that in order to speed up the measurements, a smaller number of flow data points for each capillary could be taken, perhaps even 1 point. However, we believe that having at least 2 measured points, plus the one at 0,0 which we get for free, and checking that they lie on a curve serves as an excellent check to reduce the risk of faulty readings before irreversibly cutting capillaries.
- The setup follows the next sketch which is the same as the Figure 6, but the manual valve 2 can be removed without any alteration in operation.

EDMS Project Document N° 2694858 v.1	Test Report for TB2S and TBPS Tilted Capillaries - Tubes	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	11 th Feb 2022

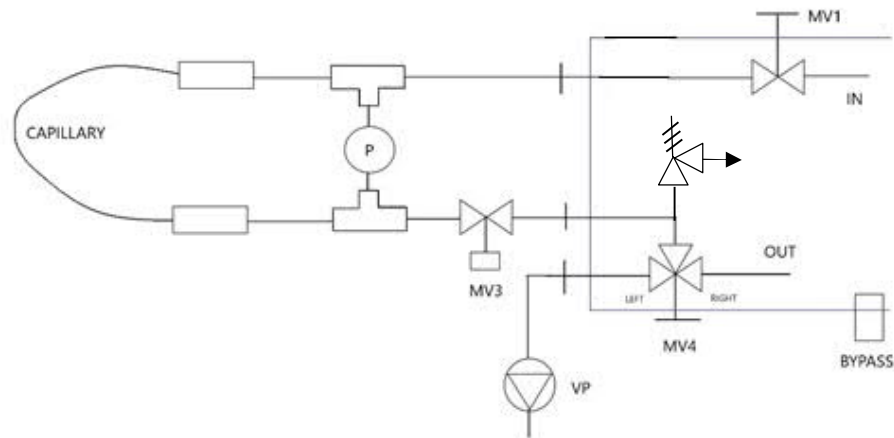


Figure 19 – Proposal for test setup at nominal conditions

8.2 Ambient conditions (50 bar/+15°C)

In the case that the testing is carried out at 50 bar/+15°C, some aspects should be modified and taken into account:

- It is required to first generate a graph such as the following coming from “Test Report for CMS Outer Tracker CO₂ Cooling – TBPS Tilted Layer 1 and 3 Rings – Tubes Only”, where the capillaries theoretical pressure drop curve is plotted in the same graph as the evaporator experimentally measured pressure drop at nominal power. The intersection points between the capillary and evaporator curves (4 circles in the plot) are the operating points at a certain temperature. We would design the capillary inner diameter and length based on the nominal operating point (lowest blue circle), then when testing we will aim to obtain a curve as close as possible to the yellow capillary curve. To note is that the pressure drop in the capillary at higher temperature is not the same as low temperature for a given mass flow rate.

EDMS Project Document N° 2694858 v.1	Test Report for TB2S and TBPS Tilted Capillaries - Tubes	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	11 th Feb 2022

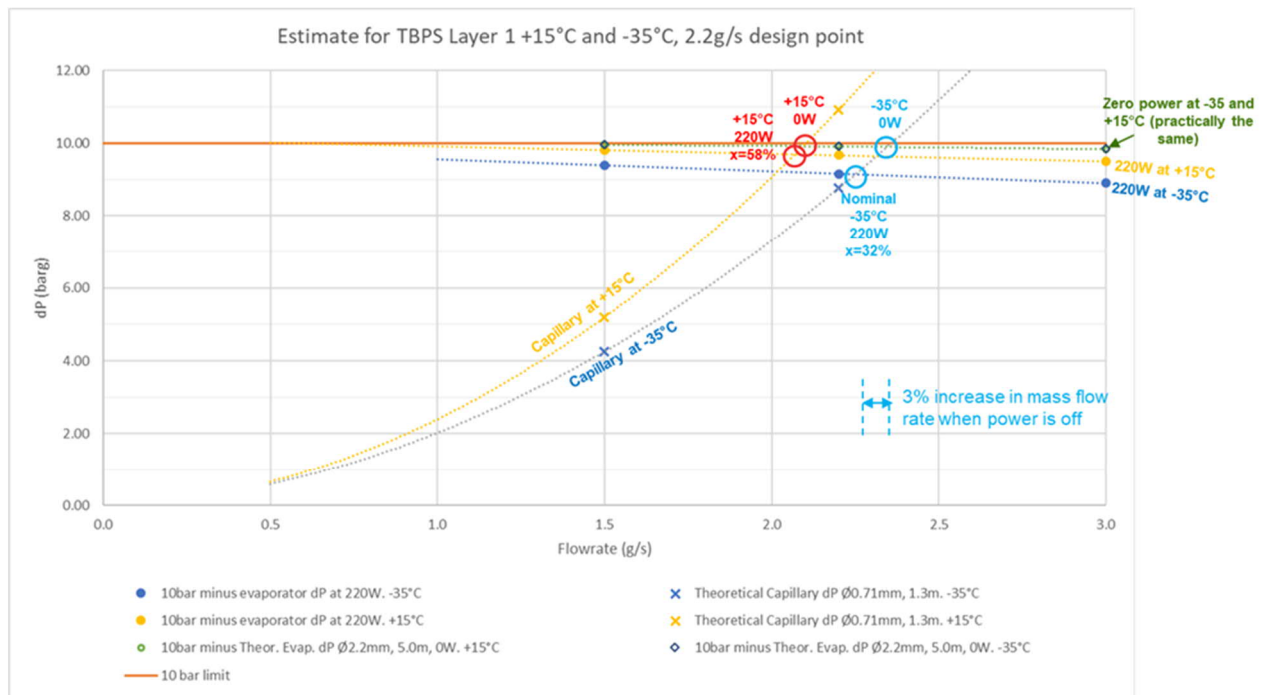


Figure 20 – Pressure drop plot for equivalence between operational points ^[3]

- It is necessary to check in this case if the cooling plant is capable to provide the required mass flowrate at these conditions.
- The Manual valve 3 also should be replaced as in the previous case.
- The test setup is the same than the one in Figure 18.
- The increase of pressure involves an increase in the pulling force on the custom connectors. This was tested with dynamometers like the following figure, and the results are quite enough to carry out the test at 50 bar/+15°C. So the theoretical force that the connector must resist is:

$$F = P * A = 5000 \text{ kPa} * \frac{1.65^2 * \pi}{4} * 10^{-6} \text{ m}^2 = 0.1361 \text{ kN} = 13.61 \text{ N}$$

And the pulling force that the connector resisted in the test, when tightened to finger tight plus 1/8 turn, is 5 kgf or 50 N.

EDMS Project Document N° 2694858 v.1	Test Report for TB2S and TBPS Tilted Capillaries - Tubes	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	11 th Feb 2022

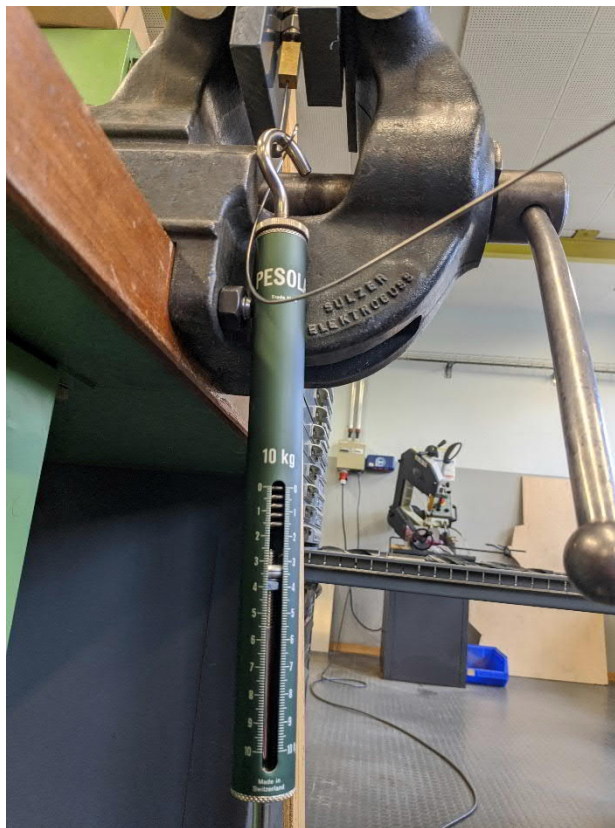


Figure 21 – Pulling force test

- For this method, the estimated time for testing each capillary is 15 minutes approximately. This improvement is because it is not required to wait until the capillary dries from the condensation that builds up on the outside and inside.

8.3 Ambient conditions and multiple capillaries (50 bar/+15°C)

An alternative solution could be to connect several capillaries in parallel and test them in quick succession. In order to do this, some aspects would first have to be taken into account:

- The following scheme is a first draft of a possible solution. It would be possible to change a capillary while the rest of the assembly stays pressurised, and even while testing is being carried out on neighbouring capillaries. The pressure drop for one capillary at a given flow rate would be measured, then the next capillary could be opened, the previous one closed, and a reading taken for the next capillary (we avoid closing off all the capillaries at once to reduce pressure changes on the cooling plant). Once all parallel capillaries have been tested at one flow rate, the pump speed could be varied and the tests repeated for the batch of capillaries again as necessary. This would avoid varying the pump speed as

EDMS Project Document N° 2694858 v.1	Test Report for TB2S and TBPS Tilted Capillaries - Tubes	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	11 th Feb 2022

often, which is the operation which took a large amount of time in previous tests (specifically waiting for the system to stabilise after such a change).

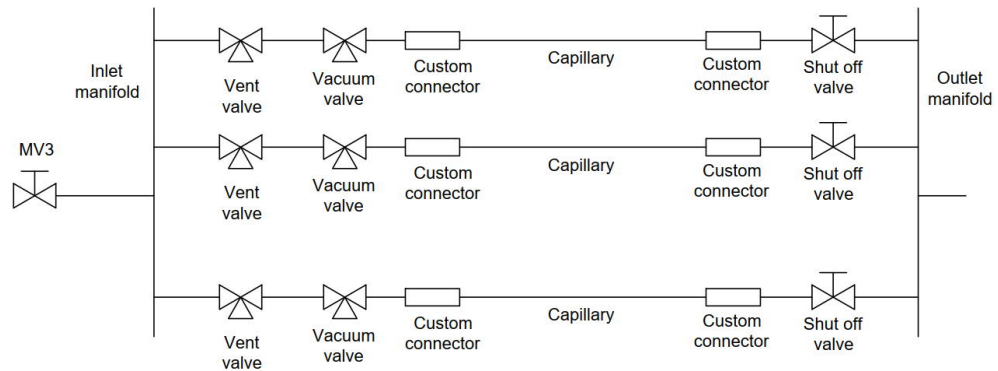


Figure 22 – Draft scheme for multiple capillaries test setup

- Each capillary would need to have its own shut off valve at one end and a vent valve at the other. Ideally, the “vent” and “vacuum” valves would not have a fully shut position, which could possibly trap liquid in the capillary and which would then require a burst disc or safety valve on each line. If these safety features are required, some extra pipework will be needed, increasing complexity.
- Even though it is not drawn that way, the capillary should actually be bent 180 degrees into a U shape, and the connectors mounted such that any length of capillary can be tested (as for the previous tests).
- Other aspects must be checked in a deeper way to find out whether this test is possible (capacity of the cooling plant, mass flow control).
- For this method, the estimated time for testing each capillary is about 3 minutes approximately. There is even a chance of further improvement if the process could be automated, an area for future study.

9 REFERENCES

1. French, Thomas, “Test Report for CMS Outer Tracker CO2 Cooling – Geometry Representative of TB2S Ladders with Pre-Heaters, 14th January 2019, EDMS 2067628 v.1.

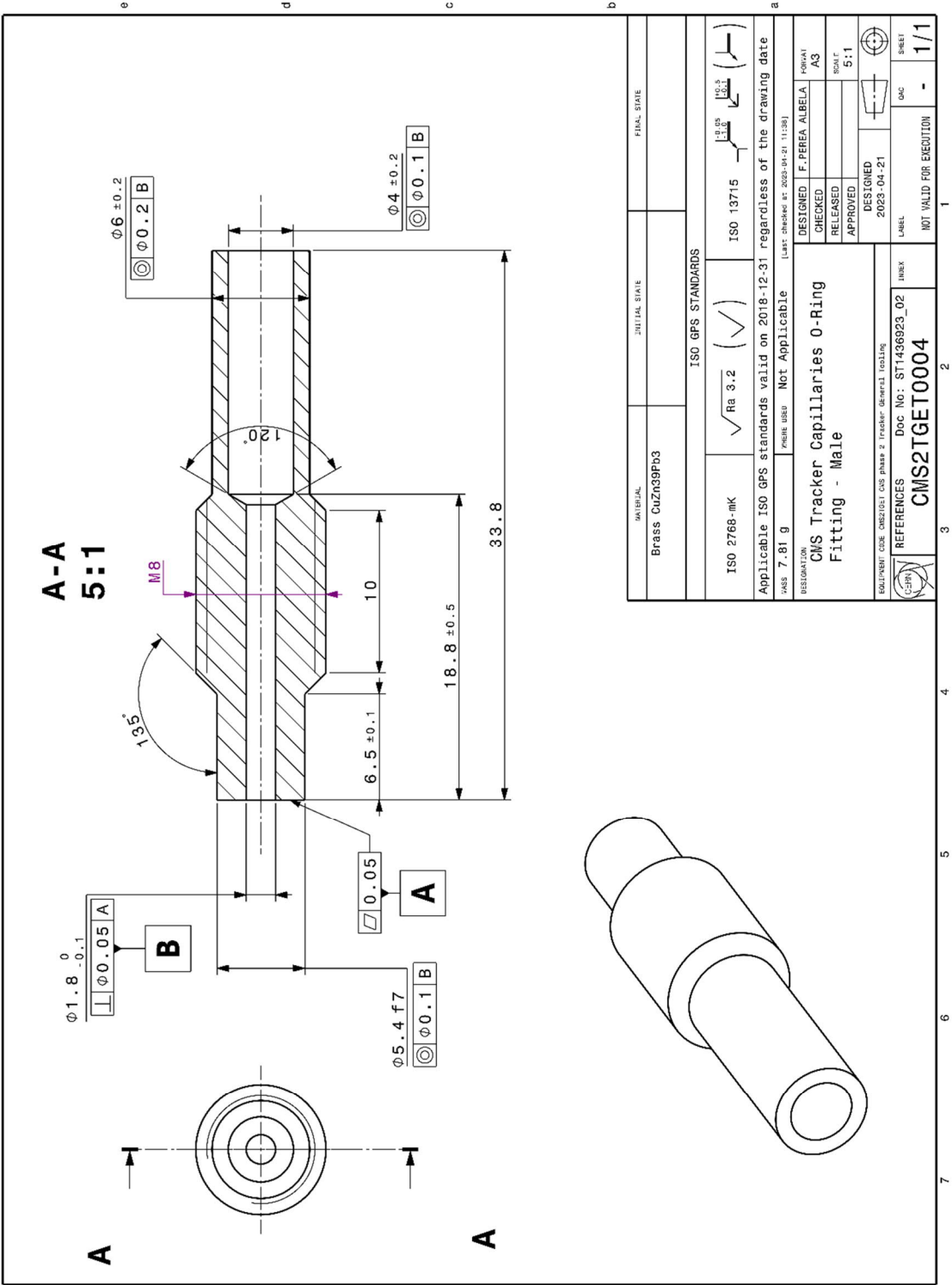
EDMS Project Document N° 2694858 v.1	Test Report for TB2S and TBPS Tilted Capillaries - Tubes	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	11 th Feb 2022

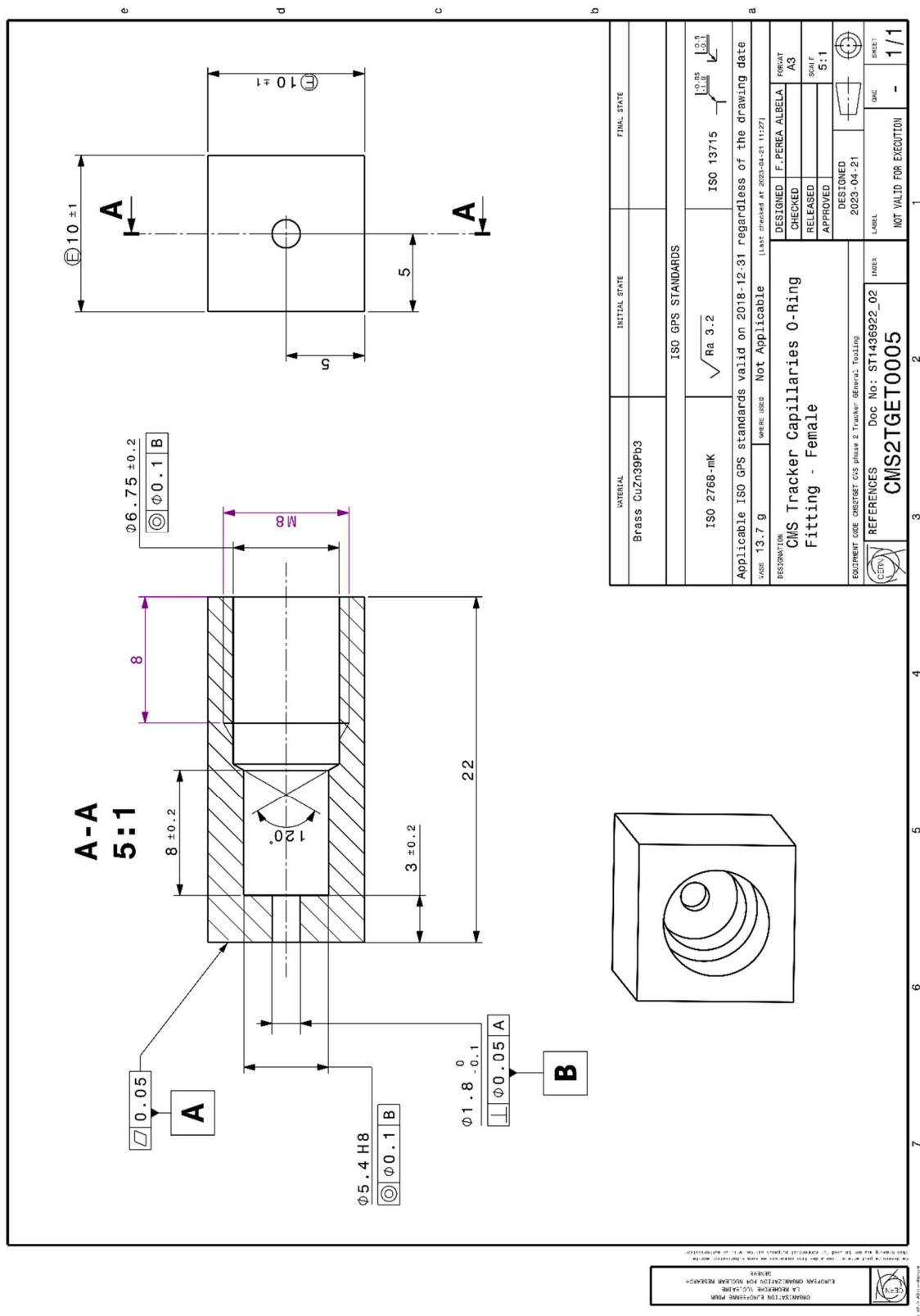
2. Pressure Drop Online Calculator, “Calculation of pressure drops of flowing liquids and gases in pipes and pipe elements (laminar and turbulent flow)”, <http://www.pressure-drop.com/Online-Calculator/> [accessed on 20th Sep 2021].
3. French, Thomas, “Test Report for CMS Outer Tracker CO2 Cooling – TBPS Tilted Layer 1 and 3 Rings – Tubes Only, 5th October 2021, EDMS 2642265 v.1

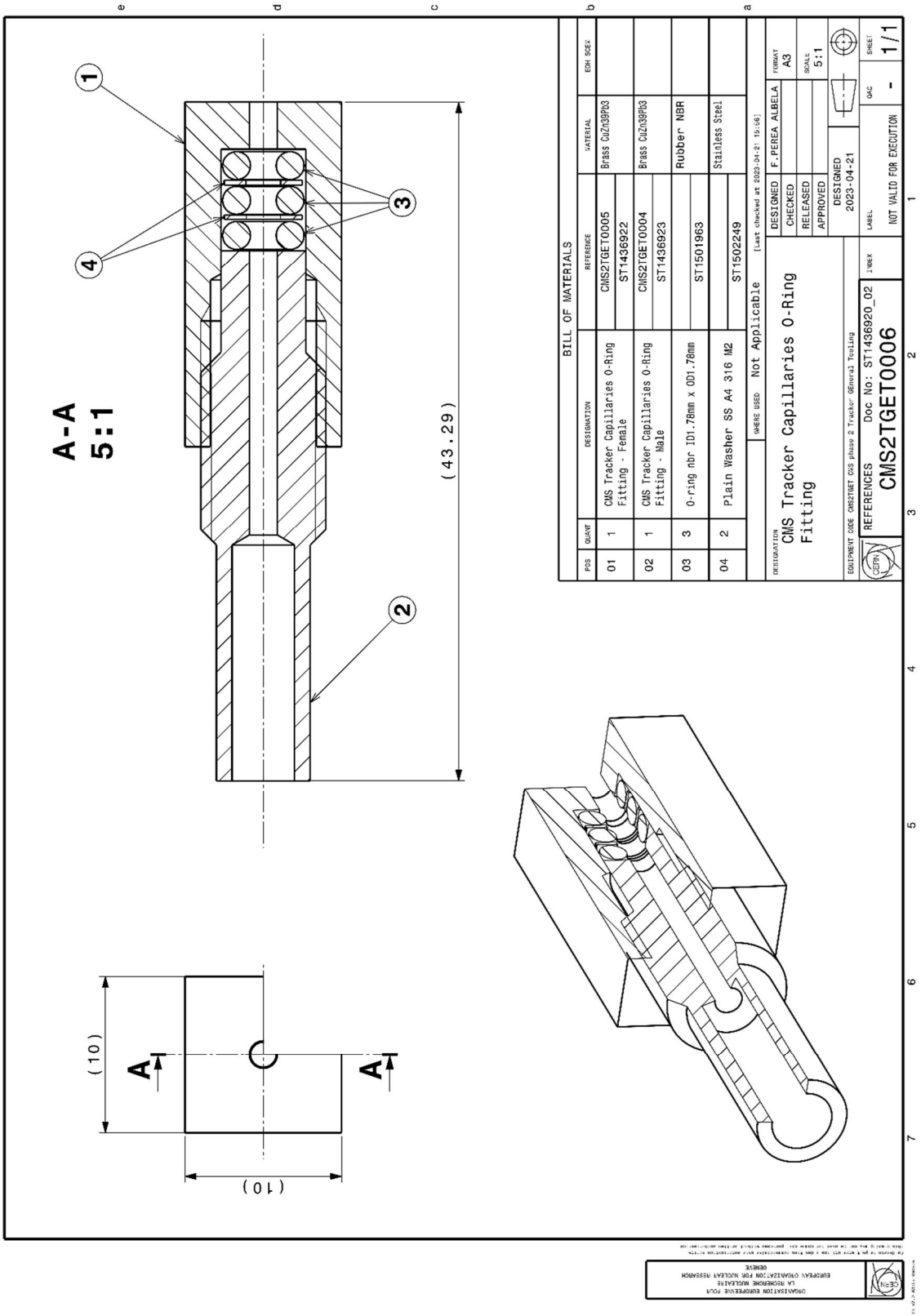
10 APPENDICES

10.1 Appendix A: Custom connector’s BOM (Bill of materials).

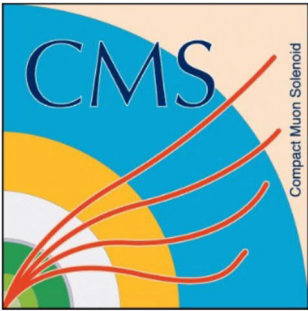
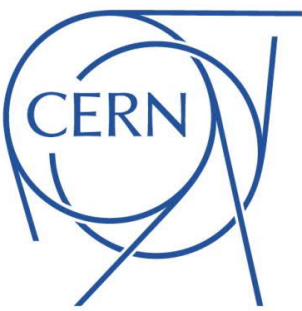
Quantity	Part number	CERN Stores code	Description
1	ST1436922	44.09.11.010.7	O-ring fitting - Female
1	ST1436923	47.39.77.080.4	O-ring fitting - Male
3	N/A	36.10.30.436.9	NBR O-ring
2	N/A	47.78.15.000.6	Metal washer







7.3. Anexo C: Procedimiento para el doblado de tubos

		Work procedure	
		Outer Tracker Cooling	
EDMS Project Document N° 2777887 v.1	CMS Collaboration Document N°	Issued: 06 th Sep 2022	Page 1 of 7
		Modified: -	Revision 01
Work procedure for CMS Outer Tracker CO₂ Cooling – TB2S Manifold Test – Tubes Bending			
Abstract: This document describes the procedure to bend and coil 0.65 ID/1.6 OD SS316L capillaries and bend 2.0 ID/ 2.5 OD CuNi tubes. All these bendings were performed in the scope of the TB2S Manifold Test and could be applicable to the real manufacturing and assembly after some development and optimisation. This process produced successful results. All the tubes could be coiled and bended without breaking to achieve the target positions in the TB2S Manifold Test.			
Prepared by: Fernando Perea Albela Francisco Pérez Gómez Alexandros Diamantis Pierre Rose Gregoire Robin Quentin Olivier Piazza		Checked by: Thomas Anders French	
Distribution list: Antti Onnela, Jeremy Andrea, Jerome Daguin, Hans Postema			

EDMS Project Document N° 2777887 v.1	Work procedure for CMS Outer Tracker CO2 Cooling – TB2S Manifold Test – Tubes Bending	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	06 th Sep 2022

TABLE OF CONTENTS

1	MODIFICATION RECORD.....	3
2	INTRODUCTION.....	3
3	PROCEDURE.....	3
4	REFERENCES	9

EDMS Project Document N° 2777887 v.1	Work procedure for CMS Outer Tracker CO2 Cooling – TB2S Manifold Test – Tubes Bending	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	06 th Sep 2022

1 MODIFICATION RECORD

Rev. N°	Date	Description	Page
01	06 th Sep 2022	First revision.	-

2 INTRODUCTION

This document describes the procedure to bend and coil 0.65 ID/1.6 OD SS316L capillaries and bend 2.0 ID/ 2.5 OD CuNi tubes. All these bendings were performed in the scope of the TB2S Manifold Test and could be applicable to the real manufacturing and assembly after some development and optimisation.

3 PROCEDURE

3.1 SS316L Capillaries.

1. For carrying out this process the following two tools are required:

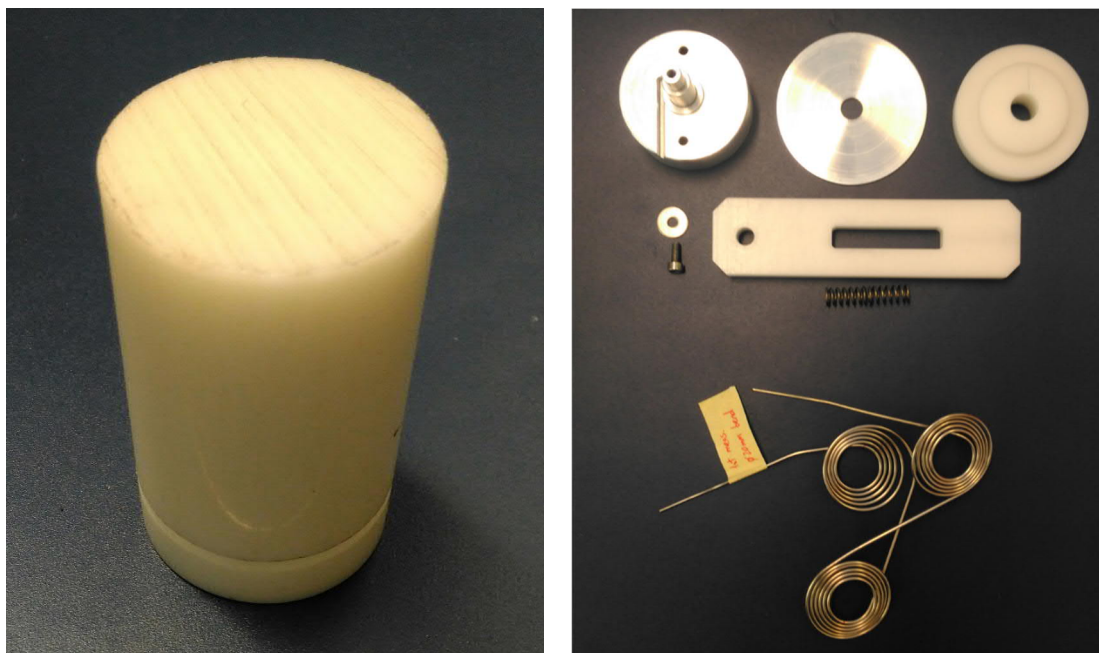


Figure 1 – Capillaries coiling tools.

The first one is the tool necessary for doing the 90° bends and the manual adjustments. The second one is the tool required for coiling the capillaries.

2. The first step in the capillary coiling process is bending the whole batch of capillaries by 90°. This was done one by one, but it would be possible to bend more than one capillary at the same time.

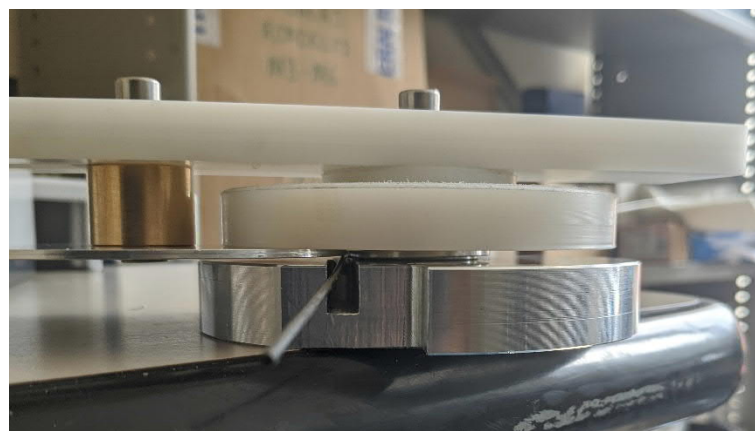
EDMS Project Document N° 2777887 v.1	Work procedure for CMS Outer Tracker CO2 Cooling – TB2S Manifold Test – Tubes Bending	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	06 th Sep 2022

It is important to leave some space between the manifold and the beginning of the bend. In this case the straight section left measures 25mm.



Figure 2 – Batch of capillaries bended.

3. After 90° bend, the second tool in “Figure 1” is used to coil the capillaries. The coiling must be done one by one.
4. The starting and final point should be marked before introducing the capillary in the tool.
5. For coiling, the capillary is placed into the tool as shown in the next figure. The capillary should be into the tool’s groove. The capillary should be in between the circular disc of the bottom part and the rotational metal wheel. The starting point should be placed at the first point where the tool starts to bend the tube.



EDMS Project Document N° 2777887 v.1	Work procedure for CMS Outer Tracker CO2 Cooling – TB2S Manifold Test – Tubes Bending	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	06 th Sep 2022

Figure 3 – Capillary in place to start the coiling process.

6. The bolt in the upper face must be gently screwed and not very tight.
7. Then the bottom part should be held while the upper one rotates. The bolt is being tighten at the same time that the tool is rotating. For the rotation, a handle was made of plastic, and it is attached by metal pins.

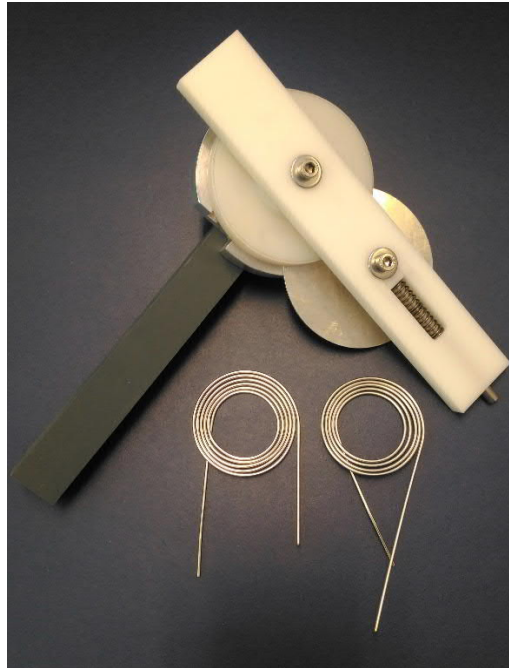


Figure 4 – Coiling tool with handle installed.

8. The coiling process should end when the final mark is at the contact point between the two bending wheels to avoid the spring back of the tube. In order to get a precise result, first the coil must be done. Then the capillary should go beyond the point we need to connect to and continue with a 180° bend. After this 180° bend, the capillary must follow a 90° bend to reach the correct location. Then it is possible to cut the section of 2.5mm CuNi tube to the correct length, if necessary.

EDMS Project Document N° 2777887 v.1	Work procedure for CMS Outer Tracker CO2 Cooling – TB2S Manifold Test – Tubes Bending	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	06 th Sep 2022

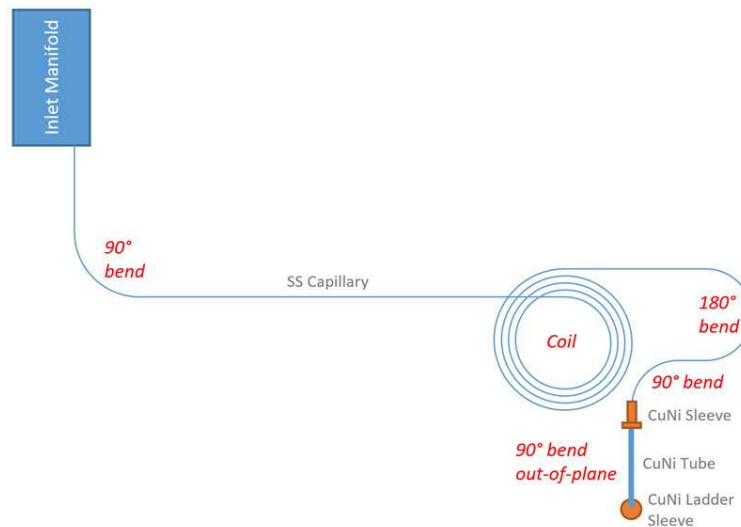


Figure 5 – Capillary coiling sketch.

9. Once the coiling is done the bolt should be unscrewed to take out the capillary.

3.2 2.5mm OD/2.0mm ID CuNi tubes.

1. This process is carrying out with the following prototype tool:



Figure 5 – CuNi tubes bending tool.

2. The first step in the process is to mark the points where the bends must be made. The bending radius and circumference length of the wheels should be considered to avoid lengths mistakes.
3. Then the tube is placed into the central groove with the starting point of the bending coinciding with the beginning of the left roll. The right wheel is also placed in front of the left one.

EDMS Project Document N° 2777887 v.1	Work procedure for CMS Outer Tracker CO2 Cooling – TB2S Manifold Test – Tubes Bending	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	06 th Sep 2022

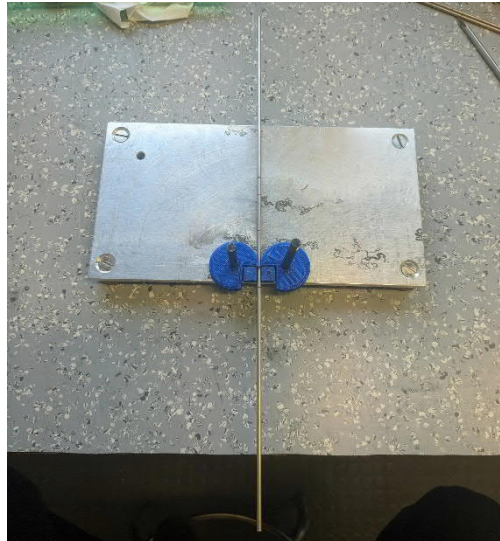


Figure 6 – Starting point of bending process.

4. After this, the shafts are fixed with handle holes. The long side of the handle should be pointing to the right. Then the bending can be made gently.

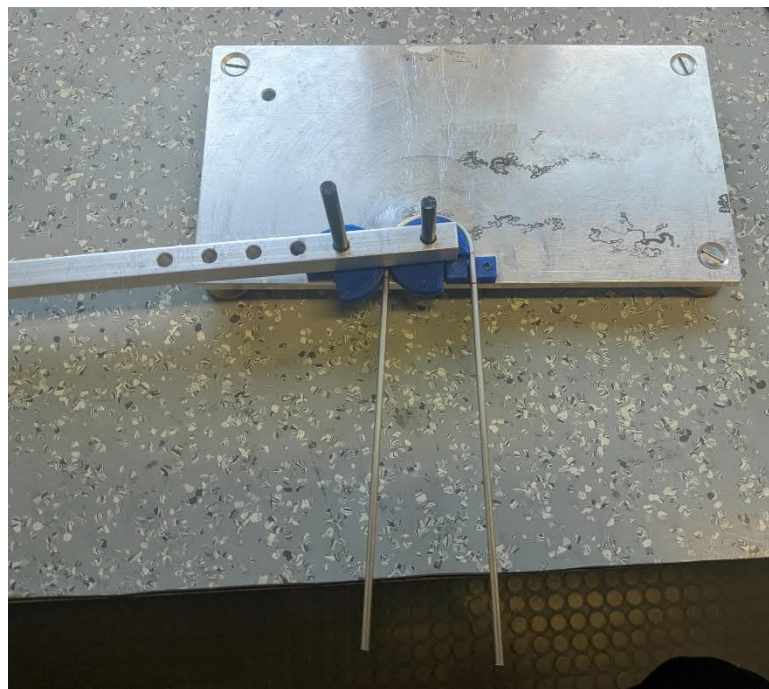


Figure 7 – Final point of bending process.

5. This bending process can be carried out in-situ but it can be difficult at certain point, depending on the accessibility and angle of the bending.

EDMS Project Document N° 2777887 v.1	Work procedure for CMS Outer Tracker CO2 Cooling – TB2S Manifold Test – Tubes Bending	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	06 th Sep 2022



Figure 8 – Bending process in-situ.

6. As an improvement there is a design for a portable tool by Thomas French (ST1331117_01) that can be produced in the future to make these bendings easier.



EDMS Project Document N° 2777887 v.1	Work procedure for CMS Outer Tracker CO2 Cooling – TB2S Manifold Test – Tubes Bending	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	06 th Sep 2022

Figure 9 – Bending process in-situ.

4 REFERENCES

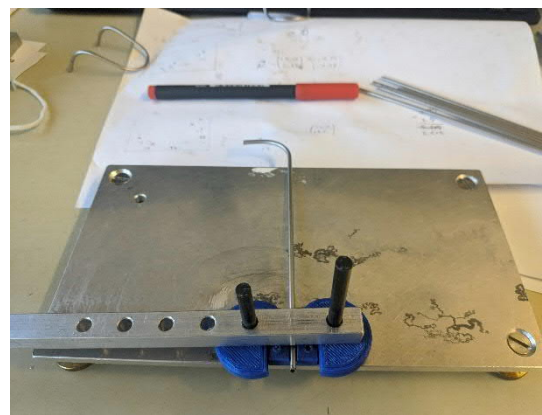
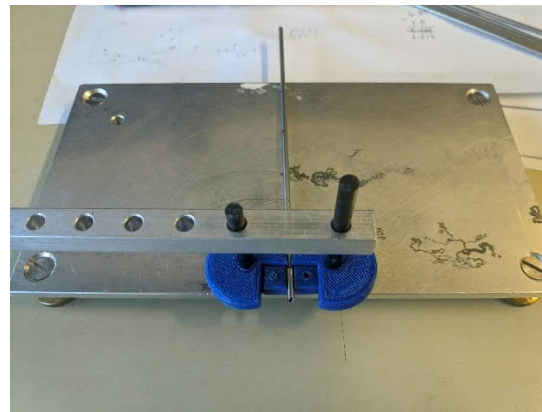
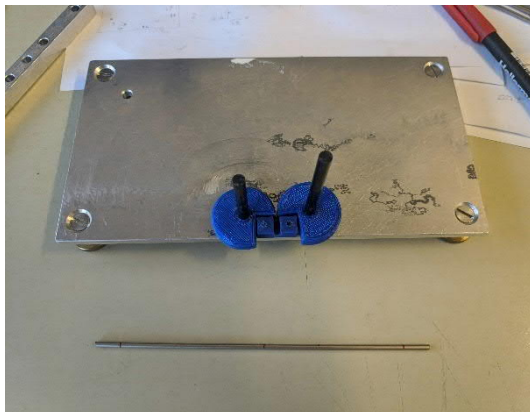
1. Perez Gómez, Francisco; Perea Albela, Fernando; French, Thomas Anders; Robin, Gregoire; Piazza, Quentin Olivier; Diamantis, Alexandros; Rose, Pierre; in-person tutorial, April 2022.

5 APPENDICES

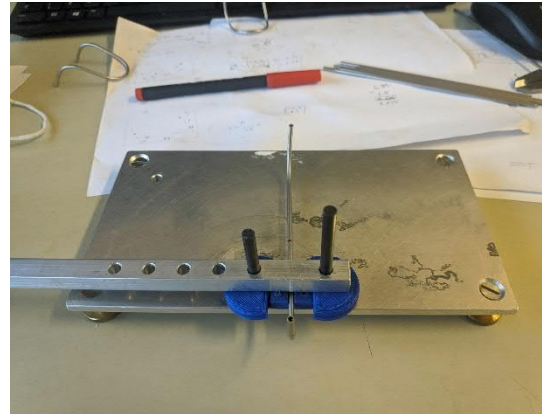
5.1 Whole sequence of 2.5mm CuNi bending (Jumper tubes).

The tubes were cut with a disc dremel tool. After this, both ends were cleaned to remove any kind of debris. When the tube is cut to the right length, the bending process is carried out with the previous tool.

For the jumper tubes, first, a 90° bend is carried out at both ends. After this, the tube is rotated that both ends are pointing up. In this position, a 180° bend must be made in the midpoint of the tube. This last bend can be adjusted by hand to fine-tune the distance between the ends to better fit the distance between the ladder sleeves.



EDMS Project Document N° 2777887 v.1	Work procedure for CMS Outer Tracker CO2 Cooling – TB2S Manifold Test – Tubes Bending	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	06 th Sep 2022

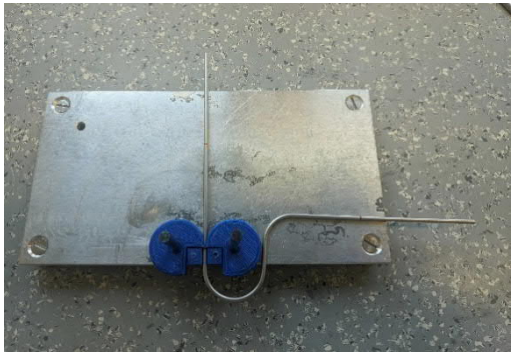
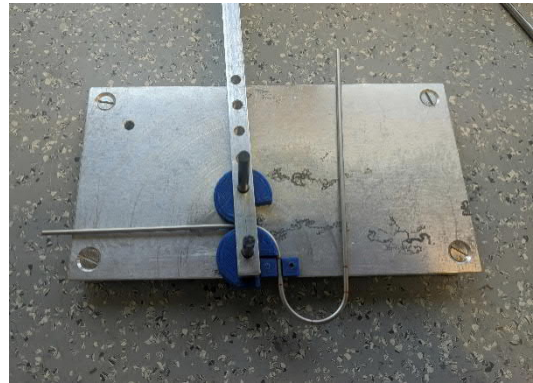
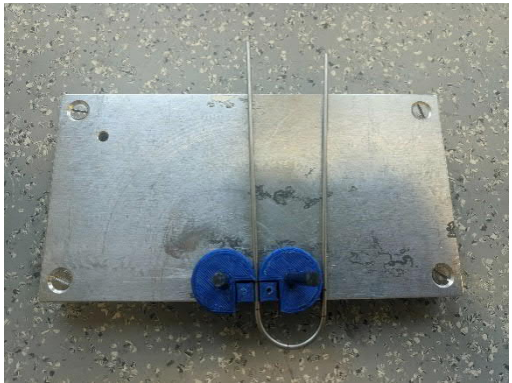
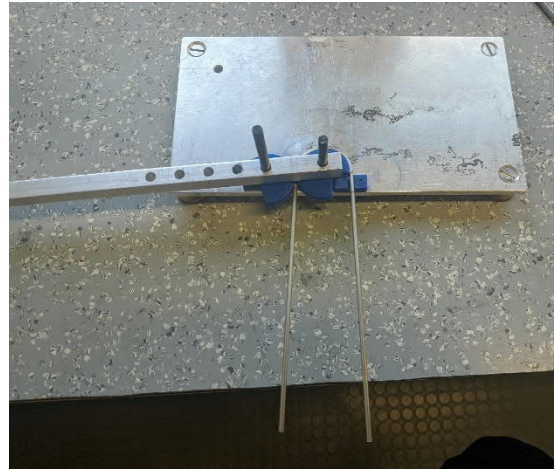
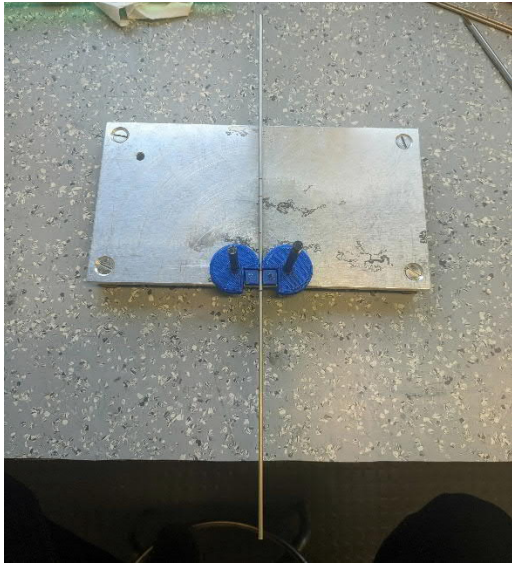


5.2 Whole sequence of 2.5mm CuNi bending (Return tubes).

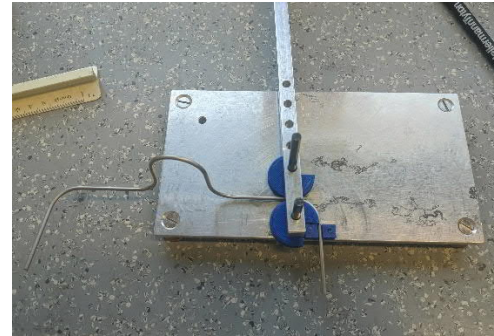
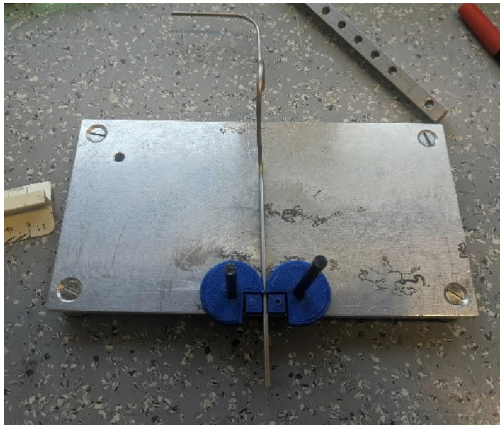
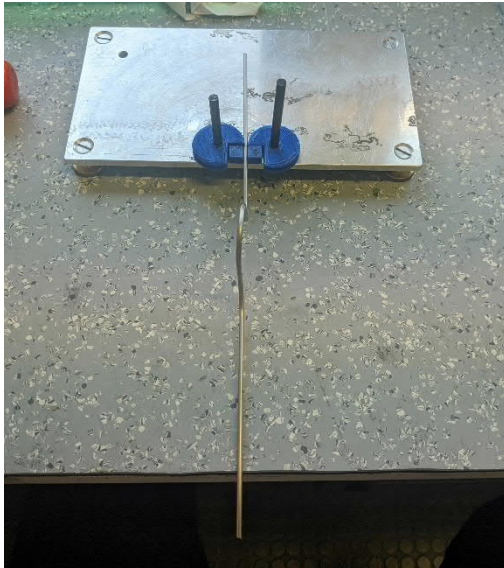
The tubes were also cut with a disc dremel tool. After this, both ends were cleaned to remove any kind of debris as the previous tubes. When the tube is cut to the right length, the bending process is carried out with the previous tool too.

The first bending is a 180° one at the midpoint of the tube. Then two 90° bendings are made on both sides of the semicircumference to form an omega shape (to allow for thermal contraction). Then the tube is rotated that the omega shape is pointing up. The last step is two 90° bendings at both ends to fit the sleeve locations.

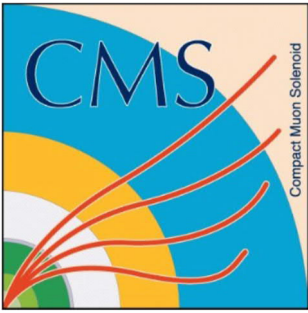
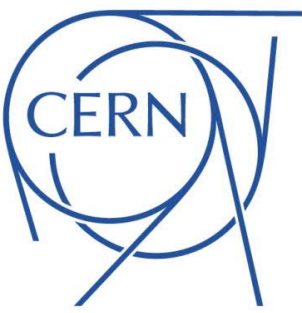
EDMS Project Document N° 2777887 v.1	Work procedure for CMS Outer Tracker CO2 Cooling – TB2S Manifold Test – Tubes Bending	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	06 th Sep 2022



EDMS Project Document N° 2777887 v.1	Work procedure for CMS Outer Tracker CO2 Cooling – TB2S Manifold Test – Tubes Bending	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	06 th Sep 2022



7.4. Anexo D: Procedimiento para la soldadura blanda

		Work procedure	
		Outer Tracker Cooling	
EDMS Project Document N° 2723801 v.1	CMS Collaboration Document N°	Issued: 04 th Apr 2022	Page 1 of 7
		Modified: -	Revision 01
Work procedure for CMS Outer Tracker CO₂ Cooling – TB2S Manifold Test – Soft Soldering			
Abstract: The document describes the procedure to solder CuNi pipes of 2.5 mm to CuNi sleeves, with a custom soldering iron. All these solderings were performed in the scope of the TB2S Manifold Test and could be applicable to the real manufacturing and assembly after some development and optimisation. The method was carried out in pipes that passed a helium leak test, a CO2 leak test and a proof test at 186 bar.			
Prepared by: Fernando Perea Albela Kamil Cichy Francisco Pérez Gómez		Checked by: Thomas Anders French	
Distribution list: Antti Onnela, Jeremy Andrea, Jerome Daguin, Hans Postema			

EDMS Project Document N° 2723801 v.1	Work procedure for CMS Outer Tracker CO2 Cooling – TB2S Manifold Test – Soft Soldering	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	4 th Apr 2022

TABLE OF CONTENTS

1	MODIFICATION RECORD.....	3
2	INTRODUCTION.....	3
3	PROCEDURE.....	3
4	REFERENCES	6

EDMS Project Document N° 2723801 v.1	Work procedure for CMS Outer Tracker CO2 Cooling – TB2S Manifold Test – Soft Soldering	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	4 th Apr 2022

1 MODIFICATION RECORD

Rev. N°	Date	Description	Page
01	4 th Apr 2022	First revision.	-

2 INTRODUCTION

The document describes the procedure to solder CuNi pipes of 2.5 mm to CuNi sleeves, with a custom soldering iron. All these solderings were performed in the scope of the TB2S Manifold Test and could be applicable to the real manufacturing and assembly after some development and optimisation.

The method was carried out in pipes that passed a helium leak test, a CO2 leak test and a proof test at 186 bar.

3 PROCEDURE

1. All the pipes and connectors must be cleaned with alcohol and dried with flushing air before starting the following steps in order to remove any alcohol and dust residuals.
2. For this task, the soldering iron with Kamil Cichy's custom shape is required (see figure 1).



Figure 1 – Soldering iron with Kamil Cichy's custom shape.

3. A wet soldering sponge is required, for the following steps.
4. It is also necessary to know the amount of solder wire we must apply. In this case it is 20mm of the filler material shown in Figure 2. The optimum solder wire length for this joint was previously determined through experimentation. The solder alloy used for this operation was Sn62Pb36Ag2 containing no-clean ROLO flux. The filler material is in a 0.5mm diameter wire roll and it was procured from CERN Stores (SCEM: 29.20.01.345.5).

EDMS Project Document N° 2723801 v.1	Work procedure for CMS Outer Tracker CO2 Cooling – TB2S Manifold Test – Soft Soldering	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	4 th Apr 2022



Figure 2 – Filler material.

5. Setting a lower temperature (iron temperature between 120°C-180°C) than the soldering one (between 220°C-280°C), the soldering iron must be cleaned with the wet sponge.
6. Then, we apply some filler material to the tip and we rub the tip on the sponge until the tip is covered by a shiny surface.
7. We set the temperature between 220°C and 280°C and hold the soldering iron in a 45 degrees angle between the soldering iron axis and the sleeve axis. It is placed as showed in the next figure:

EDMS Project Document N° 2723801 v.1	Work procedure for CMS Outer Tracker CO2 Cooling – TB2S Manifold Test – Soft Soldering	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	4 th Apr 2022



Figure 3 – Soldering position.

8. Hold the iron in place for 1-2 minutes then apply the filler material diametrically opposite the soldering iron on the chamfered face of the sleeve. The filler material should flow around the circumference. The time can be longer for more massive components.

If the tin does not flow around the full circumference, wiggle the iron in an arc about the pipe axis until it touches the filler material. Then move the iron back around the circumference and the tin will follow the soldering iron.

When the tube is bent the ends should be very slightly smaller or larger than the space in between, so that way the springback of the tube when it is introduced into the sleeve will help to keep it in place. The pipes can be held by hand too.

To prevent the remelting of a soldering if two joints are very close, a wet sponge should be held on the first one during the soldering of the second.

EDMS Project Document N° 2723801 v.1	Work procedure for CMS Outer Tracker CO2 Cooling – TB2S Manifold Test – Soft Soldering	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	4 th Apr 2022



Figure 4 – Sleeve chamfer face.

9. Before starting to solder the next tube, rub the soldering iron with the sponge. If there is a shiny surface, go to step 6. If there is not a shiny surface, go to step 5.
10. When all the soldering is finished, it is recommended to blow air through the pipes to check that they are not blocked. It is also recommended to leave the soldering tip covered with tin after finishing the soldering.

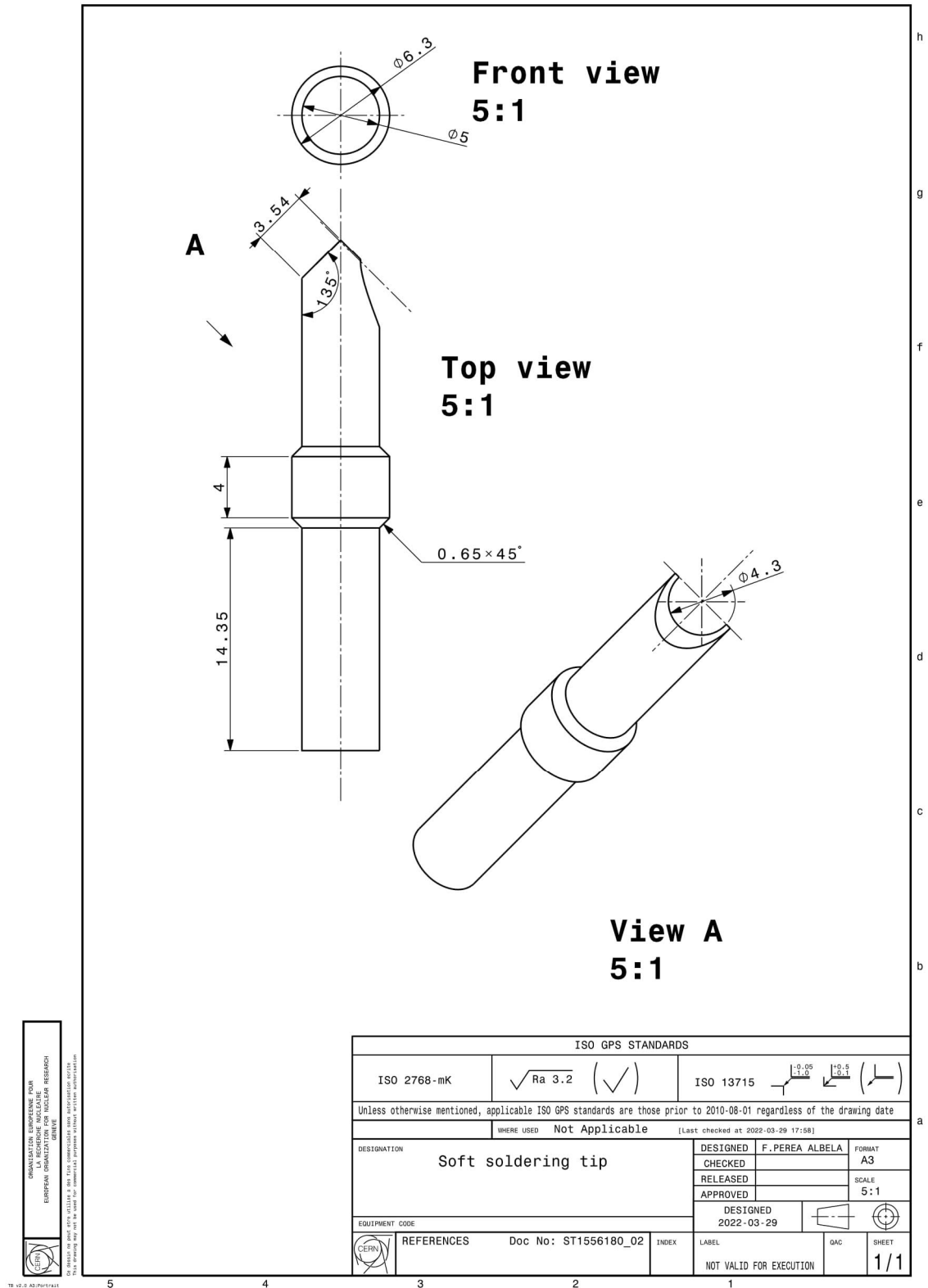
4 REFERENCES

1. Cichy, Kamil, in-person tutorial, November 2021.

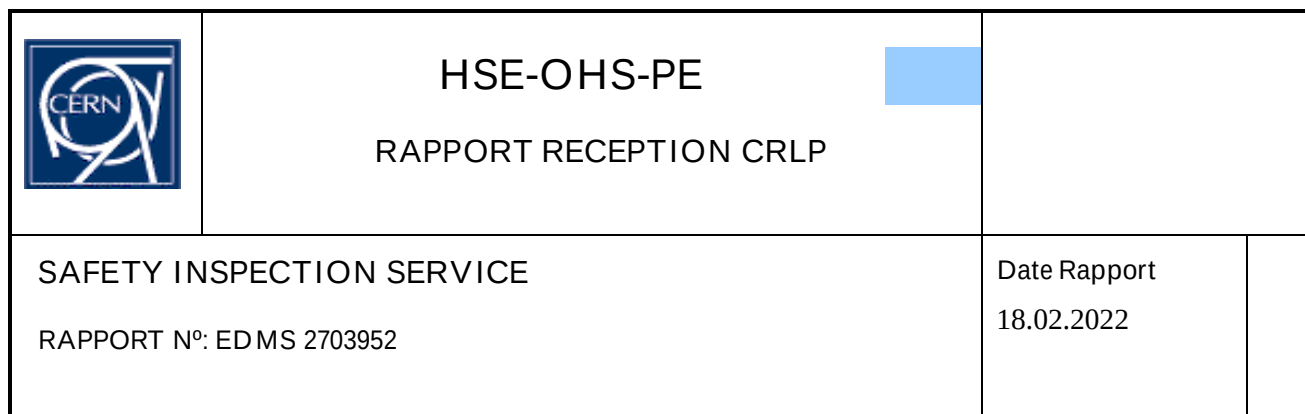
EDMS Project Document N° 2723801 v.1	Work procedure for CMS Outer Tracker CO2 Cooling – TB2S Manifold Test – Soft Soldering	CERN
	CMS Outer Tracker Cooling	4 th Apr 2022

5 APPENDICES

5.1 Appendix A: Custom soldering iron.



7.5. Anexo E: Reportes de pruebas de alta presión



RAPPORT N°: EDMS 2703952

18.02.2022

➤

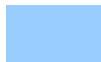
Bâtiment : 186

1.65 mm : 0.5 mm

- Aucune baisse de pression n'a été décelée pendant toute la durée du test

	HSE-OHS-PE RAPPORT RECEPTION CRLP		
SAFETY INSPECTION SERVICE RAPPORT N°: ED MS 2703952		Date Rapport 18.02.2022	

COMMENTAIRES	
Pièces jointes :	
☐ PID ☐ Certificat de tarage de la soupape de sécurité ☒ Certificat de calibration du manomètre ☒ Courbe protocole de pressurisation ☒ Photos équipement ☐ Photo des manomètres ☒ Courbe de pressurisation du test sous pression ☐ Autre	
Epreuve effectuée en présence de Fernando PEREA ALBELA et de Cyril POCHET . Date: 18/02/2022	Supervisé par: Cyril POCHET . Date: 18/02/2022

	HSE-OHS-PE RAPPORT RECEPTION CRLP		
SAFETY INSPECTION SERVICE RAPPORT N°: ED MS 2703952	Date Rapport 18.02.2022		

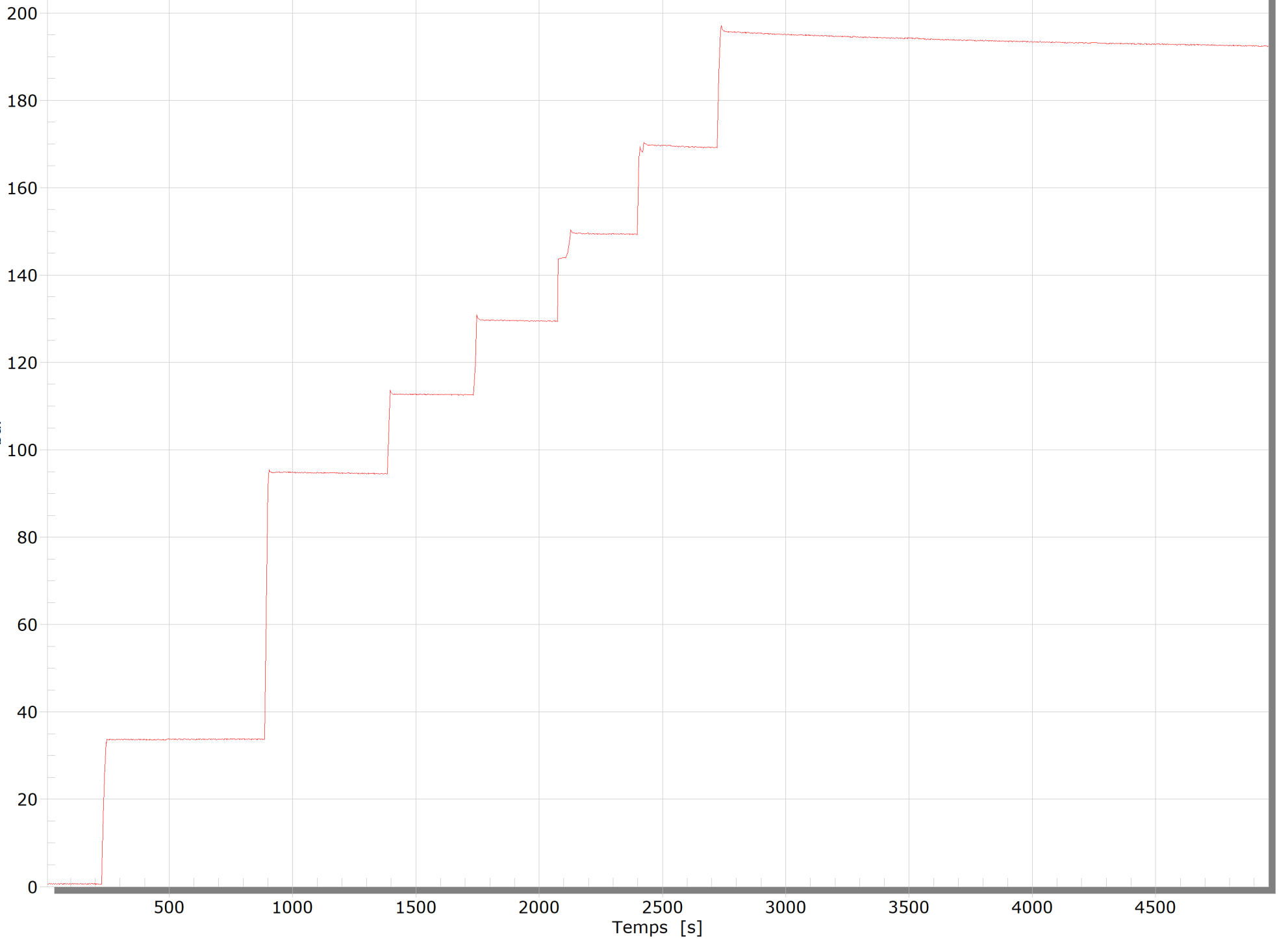
Conclusion
☒ Cet appareil peut être mis en service. ☐ Cet appareil peut être maintenu en service sous réserve de la prise en compte des observations ci-dessous. ☐ Cet appareil doit être mis à l'arrêt.

CRLP-04228

Pression

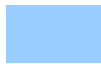
bar

Temps [s]



	HSE-OHS-PE RAPPORT RECEPTION CRLP		
SAFETY INSPECTION SERVICE RAPPORT N°: EDMS 2683433		Date Rapport 21.01.2022	

Demandeur : Fernando PEREA ALBELA Division : EP-CMX-EI Projet : TRACKER - TB2S COOLING	☒ Pneumatique. ☐ Hydraulique. ➤
Equipements : CRLP-04211 TRACKER - TB2S COOLING COLLECTEUR W	Bâtiment : 186
FICHE TECHNIQUE	
Constructeur : CERN Assemblage : Soudure + Raccord Pression de Design : 130 Barg Pression d'épreuve : 186 Barg Fluide de service : CO2	Matière : Inox 316 L + CuNi (70 / 30%) + Laiton Numéro de soudeur : 1320 Radio (%) : Non Diamètre : 8 mm Longueur : 5 mètres Epaisseur : 1 mm
EPREUVE	
Le test a été effectué le 19.01.2022 à température ambiante avec de l'air . La pression a été appliquée suivant le protocole de pressurisation dans l'équipement jusqu'à 186 bar et maintenue pendant 30 minutes . Le manomètre utilisé est le numéro 02-993 de marque HBM .	
RESULTAT	
➤ Aucune baisse de pression n'a été décelée pendant toute la durée du test	

	HSE-OHS-PE RAPPORT RECEPTION CRLP		
SAFETY INSPECTION SERVICE RAPPORT N°: EDMS 2683433	Date Rapport 21.01.2022		

COMMENTAIRES	
Pièces jointes :	
☐ PID ☐ Certificat de tarage de la soupape de sécurité ☒ Certificat de calibration du manomètre ☒ Courbe protocole de pressurisation ☒ Photos équipement ☐ Photo des manomètres ☒ Courbe de pressurisation du test sous pression ☐ Autre	
Epreuve effectuée en présence de Cyril POCHET . Date: 21/01/2022	Supervisé par: Cyril POCHET . Date: 21/01/2022

	HSE-OHS-PE RAPPORT RECEPTION CRLP		
SAFETY INSPECTION SERVICE RAPPORT N°: EDMS 2683433		Date Rapport 21.01.2022	

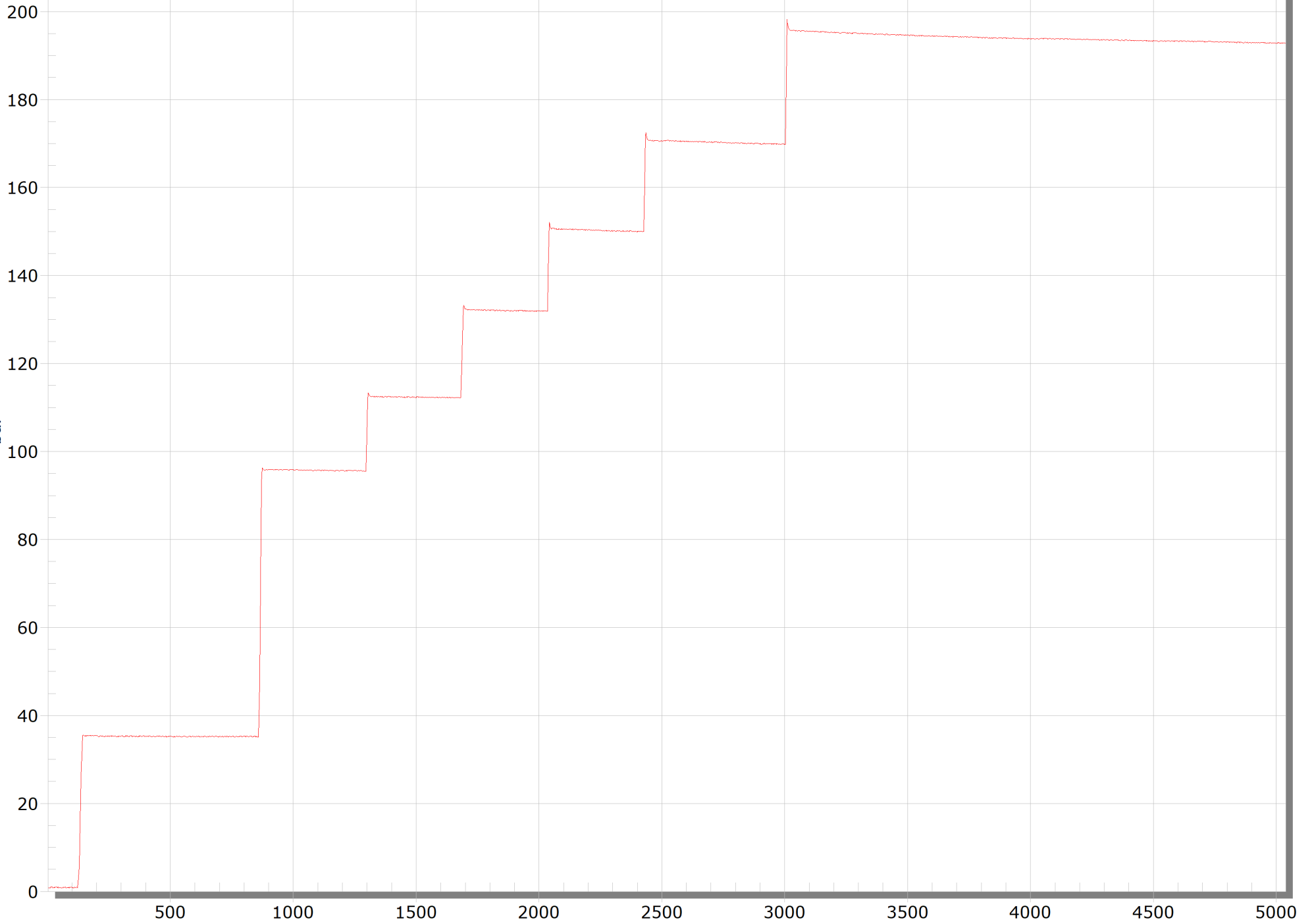
Conclusion
☒ Cet appareil peut être mis en service. ☐ Cet appareil peut être maintenu en service sous réserve de la prise en compte des observations ci-dessous. ☐ Cet appareil doit être mis à l'arrêt.

CRLP-04211

Pression

bar

Temps [s]



RAPPORT D'EPREUVE SOUS PRESSION

TYPE DE TEST:

☐ Réception de lignes sous pression

☐ Réception de réservoir sous pression

☒ Autre : Tracker

IDENTIFICATION DE LA DEMANDE

Demandeur	Département-Groupe	Expérience/Projet	Exécuteur du test
Fernando Perea Albela EP-CMX-EI	EP-CMX-EI	Tracker – TB2S Cooling	Didier Gonnard HSE-OHS-PE
Nom de l'équipement	Référence de l'équipement	Lieu de l'équipement:	Type d'épreuve:
1 x assemblage complet du Tracker-TB2S	CRPEMS-00935	Bâtiment 186/R-S20	☐ Hydraulique ☒ Pneumatique

FICHE TECHNIQUE DE L'ÉQUIPEMENT

Constructeur	Matière
CERN	Inox, CuNi 70/30, laiton
Assemblage	Numéro de soudeur
Assemblage expérimental complet composée par un collecteur de Inox avec a 8mm tuyaux et 19 capillaires ; 38 tuyaux de 2.46 m de longue chaque, 2.2 mm diamètre interne, avec tuyaux de Cu / Ni de 2.5mm diamètre interne soudés ; et collecteur de Inox avec W forme. Soudures orbitales fait pour Abdel de EP / DT, brasé sous vide par Fritz Motschmann et brasages tendres fait pour Fernando Perea (EP-CMX-EI).	Click or tap here to enter text.
Pression de design	Dessin
130 bar	Click or tap here to enter text.
Pression d'épreuve	Radiographie (%)
186 bar	Click or tap here to enter text.
Fluide de service	Volume
Co2	4.25 litres

EPREUVE

Date du test:

28/04/2022

Objectif du test :

L'objectif du test est de confirmer que l'équipement conserve son intégrité structurelle après avoir été soumis à une pression de 1.43 fois la pression maximale admissible de l'équipement.

Plan de pression:

La pression a été appliquée graduellement suivant le protocole de test dans l'équipement jusqu'à 186 bar avec l'argon.

La pression est maintenue pendant 30 minutes.

Le manomètre utilisé est le numéro 113 de la marque Baumer Le manomètre étalonné le 14/04/2022

Température ambiante pendant le test était 20 °C.

Résultat du test:

[Supprimer le cas échéant]

L'équipement est approuvé pour fonctionner avec une pression maximale de 130 bar.

Commentaires:

Satisfaisant.

Etaient présents:

Epreuve supervisée par: Didier Gonnard HSE-OHS-PE

Epreuve réalisée par: Didier Gonnard HSE-OHS-PE

Click or tap here to enter text.

LIST DE DISTRIBUTION :

Demandeur du test d'épreuve: Fernando Perea Albela EP-CMX-EI

Responsable de l'équipement: Thomas French EP-CMX-EI

Chef de Section propriétaire de l'équipement: Stefano Moccia EP-CMX-EI

TSO: Jean-Francois Pernot EP-CMX-EI

DSO ou LEXGLIMOS: Olga Beltramello EP-DI-SO

PIECES JOINTES :

- ☒ PID
- ☐ Programme de test de pression
- ☐ Certificat de tarage de la soupape de sécurité
- ☒ Certificat de calibration du manomètre
- ☒ Courbe protocole de pressurisation
- ☒ Photos équipement
- ☒ Photo des manomètres
- ☐ Courbe de pressurisation du test sous pression
- ☐ Autre: Click or tap here to enter text.

Rapport d'épreuve rédigé par:

Didier Gonnard HSE-OHS-PE

Rapport d'épreuve approuvé par:

Didier Gonnard HSE-OHS-PE