



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO DE UN LOOP HIDRÁULICO PARA CARACTERIZACIÓN DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES NUCLEARES RECH-1

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

DAVID HERNÁN MUÑOZ REVECO

PROFESOR GUÍA:
LEONEL ALEJANDRO NÚÑEZ LAZO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
WILLIAMS CALDERON MUÑOZ
CARLOS GUTIÉRREZ ULLOA

SANTIAGO DE CHILE
2016

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil Mecánico
POR: David Hernán Muñoz Reveco
FECHA: 08/03/16
PROFESOR GUÍA: Leonel Núñez Lazo

DISEÑO DE UN LOOP HIDRÁULICO PARA CARACTERIZACIÓN DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES NUCLEARES RECH-1

La Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN), en particular la planta de elementos combustibles (PEC), quiere aumentar su capacidad de diseño de elementos combustibles nucleares (ECN). La Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA) estipula que para desarrollar nuevos diseños de ECN se debe cumplir con pruebas neutrónicas, estructurales, térmicas e hidráulicas. La CCHEN en primera instancia, desea implementar las pruebas hidráulicas con una bancada de prueba que se denomina “Loop Hidráulico (LH)”

El objetivo general del proyecto es diseñar un LH a nivel de ingeniería de detalle, con la finalidad de caracterizar hidráulicamente ECN del reactor RECH-1. Los objetivos específicos son: i) Efectuar el diseño conceptual y la filosofía de control aplicable al LH, ii) Desarrollar el diseño básico del LH incluyendo su Layout, dotación de equipos, instrumentación y complementos para montaje, y iii) Efectuar el diseño de detalle para construcción y montaje del LH incluyendo especificaciones técnicas para adquisición, construcción y montaje del LH, y desarrollar el estimado de inversiones para materializar el proyecto.

Para realizar el diseño conceptual del LH se procede a revisar proyectos de piping proporcionados por especialistas, se efectúan análisis de pérdida de carga de fluidos en ductos y se revisan papers sobre LH existentes (Pettern e IPEN). El diseño básico se desarrolla fijando las condiciones operacionales del sistema, tomando como criterio de diseño las exigentes condiciones operacionales del reactor RECH-2. Para el diseño de la zona de prueba se utiliza el código ASME VIII división 1 sección 13-7. El estanque se desarrolla según la capacidad de fluido contenido en el sistema. La bomba se selecciona mediante las pérdidas de carga del sistema, sobrestimando la carga de la bomba. Además se comparan las curvas características de la bomba con la curva característica del sistema. Se generan los planos de detalle con el software Autodesk Inventor Profesional 2014-versión estudiante. La selección de la instrumentación se efectúa con el asesoramiento de una empresa dedicada a la medición y control de actividades industriales (VETO).

Los principales resultados del proyecto indican que para someter a pruebas hidráulicas a ECN RECH-1 es necesario diseñar un LH que opera en un rango de caudal de 15 a 34 m³/h, con los siguientes componentes: 01 estanque vertical estándar de 3400 L, 01 bomba centrífuga de 5,5 HP, 21 m de piping de PVC de 50 mm de diámetro, y un set de conexión entre componentes, piping, sistema de medición y control. El trabajo genera los planos necesarios para la fabricación y montaje del LH según los componentes ya seleccionados.

Si bien el LH diseñado puede someter a ECN RECH-1 a caudales que ponen a prueba su estabilidad estructural, esto no representa fielmente las condiciones hidráulicas que los ECN experimentan en la piscina del reactor RECH-1. Por lo que es conveniente tener en cuenta que las mediciones que se registren en la zona de prueba solo pueden ser cercanas a las reales, sin embargo es de mayor interés someter a los ECN a caudales extremos para asegurar su integridad estructural; requerimiento que el LH diseñado satisface plenamente.

Dedicatoria

Esta memoria está dedicada para las personas que buscan el conocimiento, que nos pertenece a todos y, por lo tanto, debe ser de libre acceso.

Agradecimientos

A mi mamá Marta y a mi papá José por los valores, el apoyo incondicional, dedicación durante toda mi vida y por estar siempre conmigo.

A mi hermano José Antonio, por darme su ejemplo.

A María Ignacia por acompañarme y entenderme en los momentos difíciles. Te amo.

A mis amigos que me acompañaron y me dieron la alegría estos años.

A mi profesor guía Leonel, por su apoyo y correcciones a lo largo del semestre, sin él la memoria no hubiera salido adelante.

A la Comisión Chilena de Energía Nuclear por darme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente

Tabla de contenido

1	Introducción	1
1.1	Motivación	2
1.2	Objetivos	2
1.2.2	Objetivos Específicos	2
1.3	Alcances	2
2	Antecedentes	3
2.1	Antecedentes Generales	3
2.1.1	Reactores Nucleares	3
2.1.2	Planta de Elementos combustibles (PEC)	6
2.2	Antecedentes Específicos	7
2.2.1	Loop del Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN, Brasil).....	7
2.2.2	Loop de The High Flux Reactor at Petten (HFR, Petten).....	9
3	Metodología	11
4	Resultados	13
4.1	Ingeniería Conceptual del LH.....	13
4.1.1	Ubicación del Sitio	13
4.1.2	Diagrama conceptual de flujo del LH.....	15
4.1.3	Condiciones de operación.....	19
4.1.4	Análisis FODA de la instalación	22
4.1.5	Filosofía de control del LH.....	23
4.2	Ingeniería Básica del LH	25
4.2.1	Descripción.....	25
4.2.2	Balance de energía.....	25
4.2.3	Selección preliminar del material de la tubería	26
4.2.4	Ecuación de energía para el cálculo de pérdidas de carga.....	28
4.2.5	Número de Reynolds	29
4.2.6	Pérdidas Mayores	29
4.2.7	Pérdidas Menores	30
4.2.8	Carga sobre la bomba	32
4.2.9	Nivel de succión y carga estática de bombeo	32
4.2.10	Potencia requerida por el sistema hidráulico.....	33
4.2.11	Análisis preliminar del golpe de ariete	33

4.3	Ingeniería Detalle del LH.....	36
4.3.1	Diseño de la zona de prueba.....	36
4.3.2	Cálculo de los componentes de la zona de prueba	38
4.3.3	Selección de la instrumentación	42
4.3.4	Cálculo del LH	47
4.3.5	Especificaciones técnicas la adquisición de los equipos del LH	52
4.3.6	Estimado de inversiones para materializar el proyecto	53
5	Discusión.....	54
6	Conclusiones	57
7	Bibliografía.....	59
8	Anexo: Planos del LH	60

Índice de Tablas

Tabla 2.1: Condiciones de operación del RECH-1 [5].	6
Tabla 2.2: Condiciones de operación del RECH-2 [6].	6
Tabla 4.1: Instrumentación necesaria para el control de operación y la adquisición de datos del LH.	18
Tabla 4.2: Características hidráulicas de operación de los reactores RECH-1 y RECH-2.	20
Tabla 4.3: Análisis FODA de la ubicación del Loop Hidráulico.	23
Tabla 4.4: Parámetros de diseño a considerar.	25
Tabla 4.5: Coeficientes “y” [10].	28
Tabla 4.6: Coeficiente de resistencia contracción súbita [10].	31
Tabla 4.7: Parámetros por determinar.	38
Tabla 4.8: Valor de los espesores.	40
Tabla 4.9: Valor de espesor de la sujeción cilíndrica.	41
Tabla 4.10: Dimensiones y propiedades del tubo del difusor.	41
Tabla 4.11: Característica de la PT100.	42
Tabla 4.12: Característica del transductor de presión.	43
Tabla 4.13: Características del flujómetro.	44
Tabla 4.14: Características de la electro válvula.	44
Tabla 4.15: Característica del variador de frecuencia.	46
Tabla 4.16: Característica del PLC.	46
Tabla 4.17: Parámetros considerados para el diseño del LH.	47
Tabla 4.18: Datos aplicables y condiciones de flujo en el tubo de succión.	48
Tabla 4.19: Datos aplicables y condiciones de flujo en la tubería de descarga.	48
Tabla 4.20: Datos aplicables y condiciones de flujo en la zona de prueba.	48
Tabla 4.21: Resumen de pérdidas menores en el circuito del LH.	49
Tabla 4.22: Resumen de pérdidas totales.	49
Tabla 4.23: Volumen contenido en cada componente del LH.	50
Tabla 4.24: Carga de la bomba.	50
Tabla 4.25: Cálculo del espesor de la tubería.	50
Tabla 4.26: Nivel de succión y carga estática de bombeo.	50
Tabla 4.27: Potencia requerida por el sistema.	51
Tabla 4.28: Resultados del análisis de golpe de ariete.	51
Tabla 4.29: Detalle técnico de los equipos que se deben adquirir.	52
Tabla 4.30: Estimado de inversión para materializar el proyecto.	53
Tabla 5.1: Comparación de características principales del LH diseñado con los LH revisados.	54

Índice de Figuras

<i>Figura 2.1: Pellet de Óxido de Uranio [4].....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2.2: Estructura de almacenamiento del combustible [4].</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2.3: Elemento combustible de prueba IPEN [7].</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2.4: Esquema del Loop Hidráulico de IPEN [7].....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2.5: Esquema del Loop Hidráulico Petten [8].</i>	<i>10</i>
<i>Figura 4.1: Ubicación de la Comisión Chilena de Energía Nuclear.</i>	<i>13</i>
<i>Figura 4.2: Ubicación de la planta elemento de combustibles.</i>	<i>14</i>
<i>Figura 4.3: Ubicación del LH: alternativa 1.</i>	<i>15</i>
<i>Figura 4.4: Ubicación del LH: alternativa 2.</i>	<i>15</i>
<i>Figura 4.5: Esquema conceptual de flujo del Loop Hidráulico.</i>	<i>16</i>
<i>Figura 4.6: Diagrama conceptual de la configuración de las tuberías.</i>	<i>19</i>
<i>Figura 4.7: Puntos de balance energético.</i>	<i>26</i>
<i>Figura 4.8: Ayuda para seleccionar el tamaño de tubería [10].....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 4.9: Esquema del elemento combustible, medidas en mm.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 4.10: Esquema de la zona central de la zona de prueba.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 4.11: Esquema de la zona exterior.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 4.12: Sujeción Inferior.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 4.13: Sujeción superior del elemento combustible.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 4.14: Caja de acrílico de la zona central de la zona de prueba.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 4.15: Cargas por presión interna [9].....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 4.16: Diagrama de momento flector del recipiente debido a la presión interna [9].....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 4.17: Esquema de un cilindro bajo esfuerzos por presión interna.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4.18: Sensor de temperatura PT100.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 4.19: Transductor de presión diferencial.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 4.20: Flujómetro seleccionado para el LH RECH-1.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 4.21: Válvula solenoide.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 4.22: Variador de frecuencia.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 4.23: Controlador PLC.</i>	<i>46</i>

1 Introducción

En el mundo es importante la producción de energía, ya que entre crecimiento económico y necesidad energética existe una dependencia directa que determina el desarrollo de un país.

Actualmente existen 438 reactores en operación que generan alrededor del 15% de la electricidad mundial. Se están construyendo 65 unidades más en países como China, India, Bulgaria, Japón, Rusia, Corea del Sur, Finlandia y Francia [1].

Además de reactores de potencia, los países nuclearmente desarrollados mantienen en operación reactores de investigación los cuales son una herramienta de entrenamiento para el licenciamiento de operadores de reactores nucleares de potencia, validación de metodologías de física de reactores y datos nucleares para análisis de núcleos de centrales power water reactor (PWR). Estos reactores de investigación también son utilizados con fines de docencia, producción de radioisótopos, ensayos de materiales estructurales utilizando prototipos instrumentalizados, etc.

En Chile se cuenta con dos reactores nucleares de investigación RECH-1 y RECH-2 (en la actualidad solo está operativo el RECH-1). Estos reactores no tienen como objetivo la producción de energía. En ellos se desarrollan labores de investigación como irradiación de muestras en el núcleo, prueba de materiales de interés nuclear y producción de radioisótopos. El reactor RECH-1 utiliza 32 elementos combustibles tipo MTR (Material Testing Reactor) como núcleo de referencia o de operación, los cuales son suministrados por la Planta Elementos Combustibles (PEC), ubicada en el Centro de Estudios Nucleares Lo Aguirre.

Para diseñar un nuevo elemento combustible es necesario que éste sea sometido a pruebas neutrónicas, termo-hidráulicas y estructurales. En particular la PEC tiene como objetivo validar hidráulicamente sus nuevos diseños de elementos combustibles, para eso se necesita un Loop Hidráulico (LH), el que debe ser capaz de medir la caída de presión en diferentes partes del elemento así como también registrar el perfil de velocidad de agua refrigerante que circula por el elemento.

1.1 Motivación

La realización de esta memoria tiene como motivación impulsar el aumento de la capacidad de diseño de elementos combustibles en Chile, dando la posibilidad de enfrentar licitaciones internacionales con el propósito de desarrollo nuclear aplicado en la generación de energía.

1.2 Objetivos

1.2.1.1 Objetivo General

Diseñar un LH a nivel de ingeniería de detalle, con la finalidad de caracterizar hidráulicamente elementos combustibles nucleares del reactor RECH-1.

1.2.2 Objetivos Específicos

- I. Efectuar el diseño conceptual y la filosofía de control aplicable al LH,
- II. Desarrollar el diseño básico del LH incluyendo su Layout, dotación de equipos y complementos para montaje;
- III. Efectuar el diseño de detalle para construcción y montaje del LH incluyendo instrumentación, especificaciones técnicas para adquisición, construcción y montaje del LH. Desarrollar el estimado de inversiones para materializar el proyecto.

1.3 Alcances

Desarrollar la ingeniería básica y de detalle del LH (zona de prueba, estanque y bomba), seleccionando los materiales, equipos para su construcción y montaje, los instrumentos y sensores que controlan y adquieren la información pertinente.

2 Antecedentes

2.1 Antecedentes Generales

2.1.1 Reactores Nucleares

Un reactor nuclear produce y controla la energía liberada de la división de átomos de ciertos elementos.

Se puede clasificar según el propósito de construcción, el combustible utilizado, la velocidad de los neutrones, el moderador y el refrigerante [2].

2.1.1.1 Reactores Nucleares de experimentación

El propósito fundamental de un reactor de investigación es proveer de una fuente de neutrones para investigación y otros propósitos.

Los reactores de investigación son más simples que los reactores de potencia y operan a temperaturas inferiores. Existen dos tipos de reactores de investigación: el “material testing reactor (MTR)” y el “engineering testing reactor (ETR)” que también tiene por nombre reactor de alto flujo. Ambos reactores son tipo piscina, refrigerados y moderados por agua liviana. El objetivo de la realización de un MTR es el estudio del efecto de la radiación sobre materiales de construcción para reactores [2].

Los reactores ETR tienen un flujo neutrónico del orden de 10^{15} neutrones/cm² y se usan para:

- Estudio de daño por radiación
- Estudio del comportamiento de sistemas combustible-refrigerante en condiciones de extrema radiación
- Producción de isótopos transplutónicos que requieren flujos neutrónicos muy altos.

2.1.1.2 Reactores Nucleares de Potencia

En un reactor nuclear de potencia la energía liberada se ocupa para producir vapor que se emplea en una turbina para generar electricidad.

Actualmente el diseño de los reactores de potencia está basado en la misma configuración utilizado para un submarino de propulsión. El diseño principal, reactor de agua bajo presión (PWR), usa agua que está por sobre 300 °C bajo presión en un circuito primario de transferencia enfriamiento/calentamiento para generar vapor en un circuito secundario y éste se utiliza en la turbina. Por otro lado un reactor tipo agua en ebullición (BWR) genera el vapor en el circuito primario por encima del núcleo del reactor con temperatura y presión similares para utilizar este mismo vapor en la turbina. Ambos tipos de reactores utilizan agua como refrigerante y como moderador para detener a los neutrones [3].

2.1.1.3 Componentes de un reactor nuclear experimental y de potencia

Los reactores nucleares experimentales y de potencia presentan componentes similares con respecto a la funcionalidad, pero por las distintas funciones que deben cumplir los componentes tienen diferentes prestaciones técnicas y tecnológicas. A continuación se presentan los principales componentes de los reactores nucleares de potencia y experimental. En el caso de los reactores experimentales no se debe incluir el generador de vapor.

2.1.1.3.1 Combustible

Uranio es el combustible básico, generalmente se usa pellet de óxido de uranio (UO_2), Figura 2.1 en los reactores de potencia dispuestos en tubos para formar barras de combustibles; estas barras están dispuestas en arreglos, Figura 2.2, que se instalan en el núcleo del reactor de potencia. En los reactores experimentales se utiliza Siliciuro de Uranio (USi).

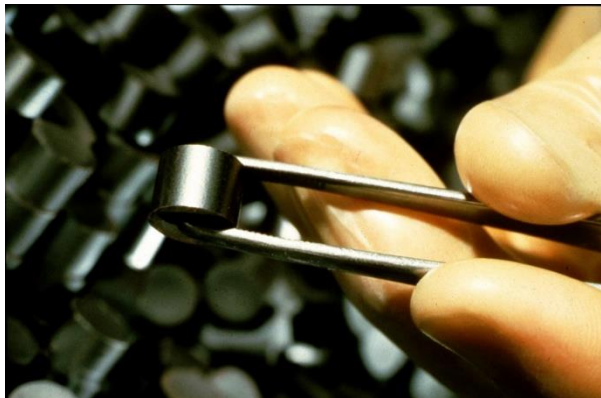


Figura 2.1: Pellet de Óxido de Uranio [4].



Figura 2.2: Estructura de almacenamiento del combustible [4].

2.1.1.3.2 Moderador

Es un material que se dispone en el núcleo con la función de ralentizar los neutrones liberados de la fisión de modo que regula la tasa de fisión, normalmente es agua, pero puede ser agua pesada (Óxido de Deuterio D₂O) o grafito.

2.1.1.3.3 Barras de Control

Las barras de control están hechas con un material absorbente de neutrones, tales como Cadmio, Hafnio o Boro y se insertan o retiran del núcleo para controlar la velocidad de reacción, o para detenerlo. En algunos reactores PWR se usan barras de control especiales para mantener al núcleo con un bajo nivel de potencia de forma eficaz.

2.1.1.3.4 Refrigerante

Es un fluido que se utiliza para absorber el calor generado en el núcleo y transferirlo a otro para ser utilizado para generar vapor en un reactor de potencia o simplemente enfriarlo en torres de enfriamiento. En algunos reactores el agua ligera se usa como refrigerante y también como moderador, excepto en los reactores BWR, que poseen un circuito secundario refrigerante donde el agua se transforma en vapor.

2.1.1.3.5 Generador de Vapor

Los generadores de vapor son intercambiadores de calor utilizados para convertir el agua en vapor, por calor producido en un núcleo del reactor nuclear. Se utilizan en los reactores de agua a presión (PWR) entre los circuitos de refrigerantes primario y secundario.

2.1.1.4 Reactores Nucleares en Chile

En Chile existen dos reactores nucleares de investigación tipo piscina, el RECH-1 (está operativo, CCHEN La Reina) y el RECH-2 (no está operativo, CCHEN Lo Aguirre).

2.1.1.4.1 RECH-1

En la Tabla 2.1 se muestran las condiciones de operación del reactor RECH-1.

Tabla 2.1: Condiciones de operación del RECH-1 [5].

RECH-1	Valor	Unidad
Refrigerante	Agua desmineralizada	-
Potencia Máxima	5	MW
Profundidad de la piscina	10	m
Caudal circuito primario	654	m ³ /h
Caída de presión en el núcleo	0,15	kg/cm ²
Caudal del circuito secundario	723	m ³ /h
Temperatura agua entrada núcleo	35	°C
Temperatura agua salida núcleo	41,6	°C
N° de perforaciones en la grilla	80	-

2.1.1.4.2 RECH-2

En la Tabla 2.2 se muestran las condiciones de operación del reactor RECH-2.

Tabla 2.2: Condiciones de operación del RECH-2 [6].

RECH-2	Valor	Unidad
Refrigerante	Agua desmineralizada	-
Potencia Máxima	10	MW
Profundidad de la piscina	10	m
Caudal circuito primario	1.200	m ³ /h
Caída de presión en el núcleo	0,23	kg/cm ²
Caudal del circuito secundario	900	m ³ /h
Temperatura agua entrada núcleo	35	°C
Temperatura agua salida núcleo	44,5	°C
N° de perforaciones en la grilla	81	-

2.1.2 Planta de Elementos combustibles (PEC)

En CCHEN Lo Aguirre se encuentra la planta de elementos combustibles donde se quiere fabricar elementos combustibles de nueva generación, ya que actualmente se fabrica un elemento combustible del tipo MTR, de placas planas.

Para validar el diseño de los elementos combustibles es necesario simular condiciones de operaciones de reactores experimentales, para llegar a cabo esa simulación es necesario la construcción de un LH.

La PEC tiene como objetivo aumentar su tecnología de diseño de elementos combustible para poder ofrecer sus diseños a instituciones que lo requieran, con el fin de consolidarse como una institución capaz de generar elementos combustibles de alta tecnología.

2.2 Antecedentes Específicos

Los Loops Hidráulicos son sistemas de tuberías que forman un circuito cerrado, donde se hace circular un fluido con algún objetivo. Se emplean en ciclos de refrigeración, suministro de agua potable, etc. En este caso particular se ocupan para la validación hidráulica de dispositivos o elemento nucleares que se quieran caracterizar hidráulicamente, para esto generalmente se miden parámetros como: pérdida de carga, velocidad crítica y temperatura, entre otros de menos importancia.

2.2.1 Loop del Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN, Brasil)

El Instituto de Energía y de Investigación Nuclear (IPEN) de Brasil está vinculado al Departamento de Desarrollo Económico de la autoridad, Ciencia, Tecnología e Innovación del Estado de São Paulo. Lo gestiona técnicamente y administrativamente la Comisión Nacional de Energía Nuclear (CNEN), del Ministerio de cuerpo Ciencia, Tecnología e Innovación (MCTI), del Gobierno Federal.

El IPEN IEA-R1 es un reactor de investigación tipo piscina de 5 MW que utiliza elementos combustibles, en el núcleo, tipo MTR (Material Testing Reactores). Cada elemento combustible tiene 18 placas de combustible montados en placas de soporte lateral, formando 17 canales de flujo independientes. Actualmente, el núcleo del reactor tiene 20 elementos combustibles, 4 elementos de control y un irradiador central, montado en una matriz cuadrada de 5x5 cavidades. La operación segura del reactor es garantizada con el mantenimiento de los márgenes de seguridad adecuados en las condiciones operativas. Estos márgenes de seguridad (DNBR, ONB, CHF y temperatura máxima de la superficie) se verifican en el análisis termohidráulico (THA) del núcleo. Para realizar el THA es necesario conocer algunos parámetros, tales como: distribución de calor de flujo, características geométricas, propiedades del material y las tasas de flujo a través de los elementos de combustible.

Para esa tarea cuenta con un elemento combustible de prueba sin material radiactivo, pero con dispositivos de medición para registrar los parámetros de interés en la operación, como se muestra en la Figura 2.3.

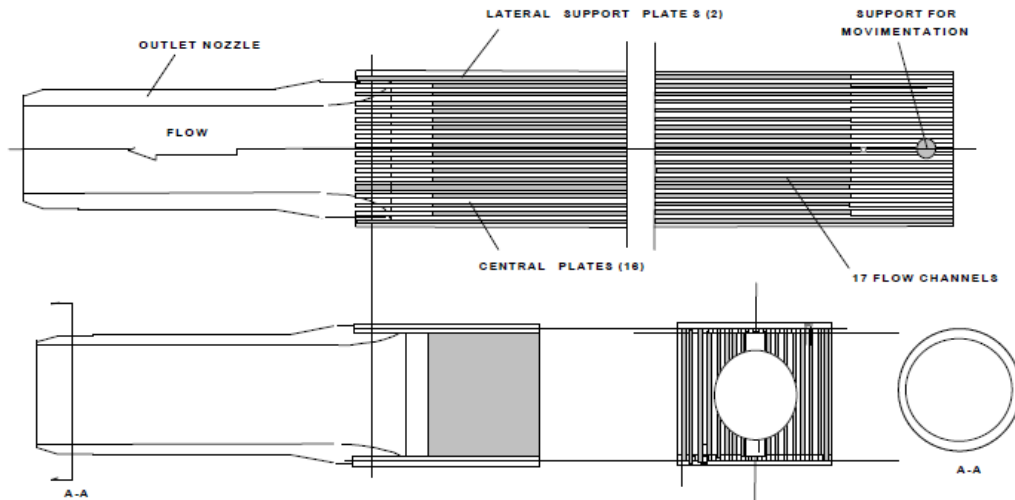


Figura 2.3: Elemento combustible de prueba IPEN [7].

Para recrear las condiciones hidráulicas se diseñó un LH, como se muestra en la, Figura 2.4, en éste se monta el elemento combustible de prueba y se somete a los flujos característicos de operación en la sección de prueba.

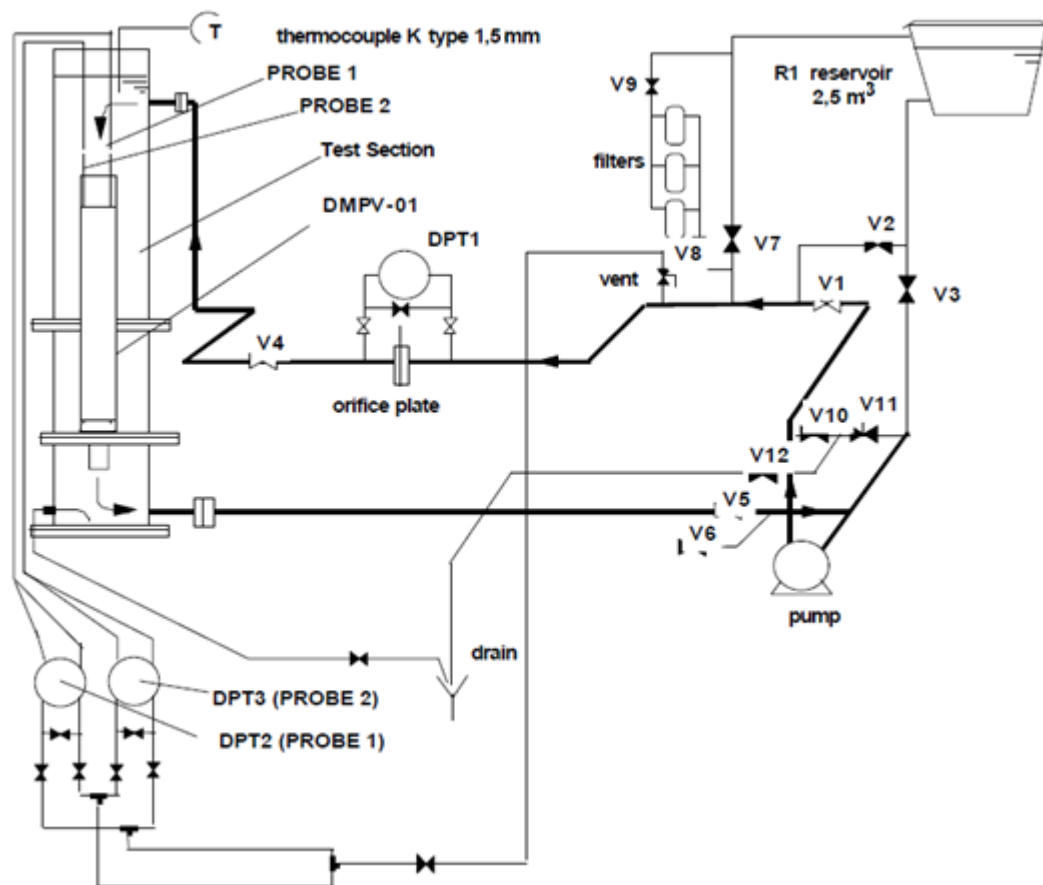


Figura 2.4: Esquema del Loop Hidráulico de IPEN [7].

2.2.2 Loop de The High Flux Reactor at Petten (HFR, Petten)

En el HFR Petten, en Holanda, hay un LH que está disponible para medir las características hidráulicas de los diferentes tipos de elementos combustibles y barras de control. En este LH se puede simular las condiciones típicas de operación del núcleo del HFR. El objetivo de la prueba hidráulica es verificarla estabilidad estructural y las pérdidas de carga, para calificar y comparar las características hidráulicas de diferentes tipos de elementos combustibles o barras de control con una configuración específica de operación del HFR [8].

En la Figura 2.5 se muestra esquemáticamente la instalación del LH de prueba para elementos de combustible. En este esquema se aprecian los siguientes componentes principales: Bomba centrífuga principal, intercambiador de calor, medidor de flujo, plataforma de prueba para elementos combustibles, tanque de almacenamiento de agua, vaso de expansión y una bomba de llenado.

La bomba principal circula agua a través del LH. Para medir la presión en la bomba centrífuga principal se coloca un medidor de presión a la entrada y otro a la salida de la bomba. La cantidad de agua se regula con la válvula S01 mientras que una regulación fina se hace a través de una válvula de by-pass S02. La temperatura del agua puede ser regulada con válvula S03. La cantidad de agua que está entrando al intercambiador de calor regula la temperatura. Un medidor de flujo, indicado por F01, en la parte superior de la instalación detecta el flujo como una diferencia de presión; el flujo máximo equivale a 200 m³/h. Los cambios de volumen en el LH, como resultado de los cambios de temperatura, son compensados por un vaso de expansión. La temperatura del agua en el bucle de prueba y, por lo tanto, la temperatura del elemento combustible se mide con una termocupla, indicada por T01. Durante la prueba, la diferencia de presión en el elemento combustible se mide con P02 y P03; ambos ubicados en la parte de sección de prueba.

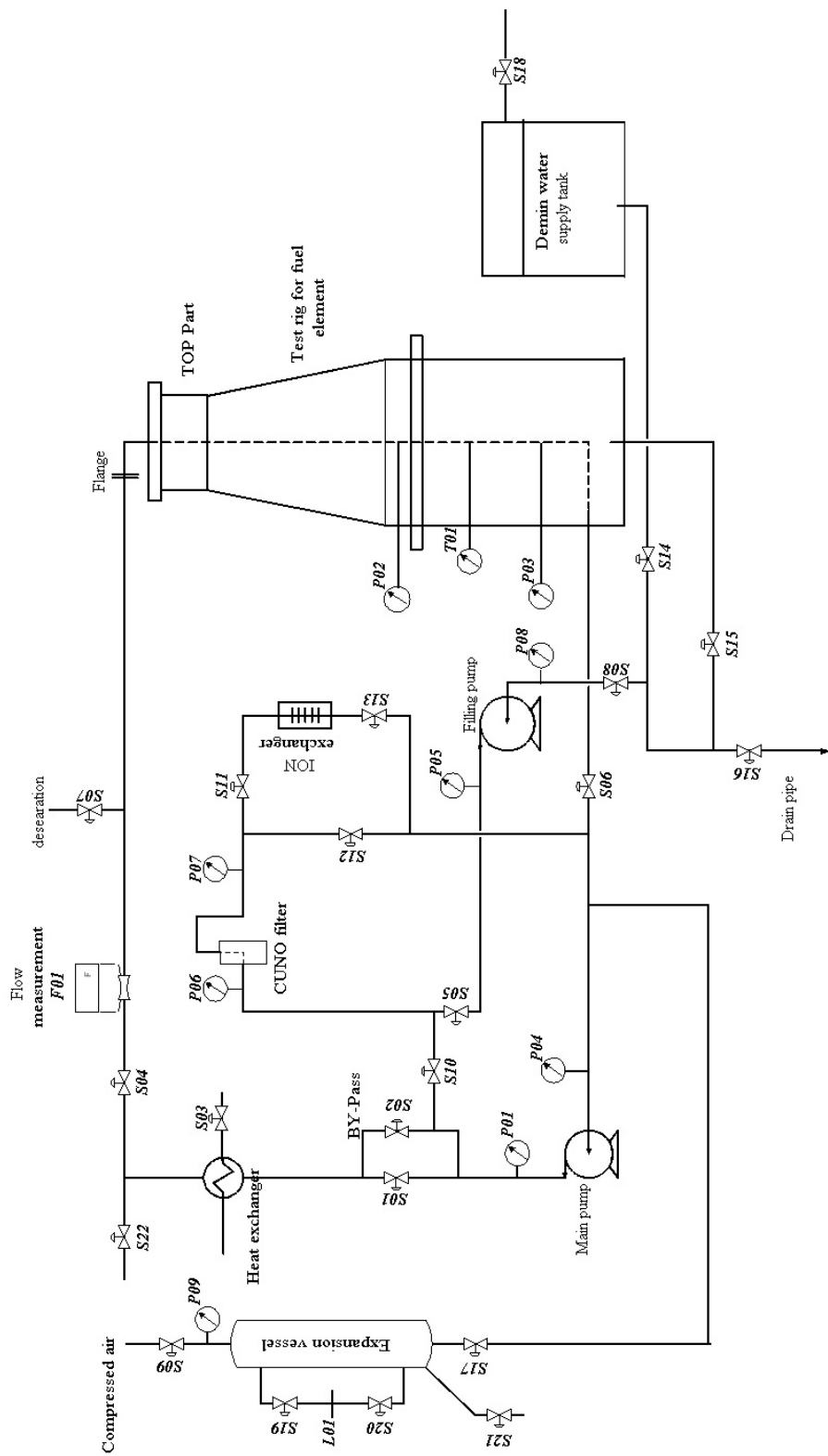


Figura 2.5: Esquema del Loop Hidráulico Petten [8].

3 Metodología

La metodología para alcanzar con eficiencia los objetivos del proyecto es la siguiente:

Para objetivo específico I: Se busca realizar el diseño conceptual y la filosofía de control del LH, para esto se realiza una búsqueda bibliográfica con una recopilación de textos tales como: libros de mecánica de fluidos, material recopilado por la Comisión Chilena de Energía Nuclear y proyectos similares realizados por el profesor guía. Este material es sobre sistemas de tuberías, energía nuclear y otros conceptos relacionados a elementos combustibles nucleares de experimentación. También se revisa papers de Loops Hidráulicos ya existentes, con el objetivo de analizar el desarrollo funcional de los elementos que se someten a medición. Esto se lleva a cabo con el estudio de los diagramas de P&ID y revisión de planos de las instalaciones existentes.

Se espera identificar los componentes principales de LH y la determinación de la relación existente entre ellos. Por otro lado, a través de la filosofía de control se persigue establecer el modo de operación del sistema, definiendo rangos de operación, configuraciones de operación e interacción del sistema con el usuario.

Para el objetivo específico II: Se busca desarrollar el diseño básico del LH, para esto se utilizan las condiciones operacionales del sistema, donde se presenta un rango de operación delimitado por una mínima y una máxima condición de operación (presión y caudal).

Se busca caracterizar hidráulicamente el elemento combustible nuclear RECH-1, midiendo la pérdida de carga de este en función del caudal que circula por el mismo, las condiciones de operación del LH deben representar las condiciones operacionales del elemento combustible en el reactor RECH-1.

Al momento de determinar la capacidad operacional, se toma como criterio de diseño, fijar la capacidad operacional por sobre las condiciones de operación del sistema; tomando como referencia las condiciones de operación del reactor RECH-2, que tiene una potencia de 10 MW, superior a la potencia de 5 MW del reactor RECH-1.

Una vez definidos los componentes, se identifican los que son comerciales (se pueden adquirir en el mercado) y los que se fabrican.

Para el diseño de la zona de prueba se utiliza el código ASME VIII división 1 sección 13-7, que brinda las ecuaciones para calcular las dimensiones de la zona de prueba de sección cuadrada; sometida a una presión de trabajo dada.

El estanque es un componente que se adquiere en el mercado, no está sometido a condiciones especiales de operación que requieran una mayor especialización, solo se utiliza como reservorio del fluido que circula por el LH; por lo tanto solo debe contener la cantidad de fluido necesaria para que circule por el sistema.

La bomba es un componente importante, ya que debe ser capaz de hacer circular el fluido de trabajo por los componentes del sistema, especialmente por la zona de prueba, siendo capaz de satisfacer

las condiciones operacionales establecidas. Se selecciona la bomba calculando las pérdidas de carga del sistema y observando las curvas características de la bomba con la curva del sistema. Como resultado se espera lograr el desarrollo del Layout del sistema, la selección/especificación de los equipos y la instrumentación.

Para el objetivo específico III: Se busca efectuar el diseño de detalle para la construcción y montaje del LH. Para la zona de prueba se desarrollan los planos de cada componente de la misma, generando planos de fabricación. Para ello se emplea el software Autodesk Inventor Professional 2014 – Versión estudiante.

Para el diseño final del piping y de los componentes asociados se utiliza el desarrollo de la ingeniería básica como datos de partida, ahora se incluyen las modificaciones asociadas a la determinación definitiva del sistema mostrado en la sección de resultados. Se emplea el mismo software, representando en su totalidad la zona de trabajo donde se instala el LH y los detalles de instalación entre componentes.

La selección de la instrumentación se ejecuta con el asesoramiento de una empresa dedicada a la medición y control de actividades industriales.

4 Resultados

4.1 Ingeniería Conceptual del LH

4.1.1 Ubicación del Sitio

A continuación, como primera aproximación, se muestra en la Figura 4.1 una vista aérea de las instalaciones de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN Lo Aguirre), donde se indica con un punto azul la planta de elementos combustibles (PEC).



Figura 4.1: Ubicación de la Comisión Chilena de Energía Nuclear.

En la Figura 4.2 se muestra una vista aérea de la planta de elementos combustibles PEC (Flecha), se señala con óvalos las 2 ubicaciones posibles donde se proyecta el LH.

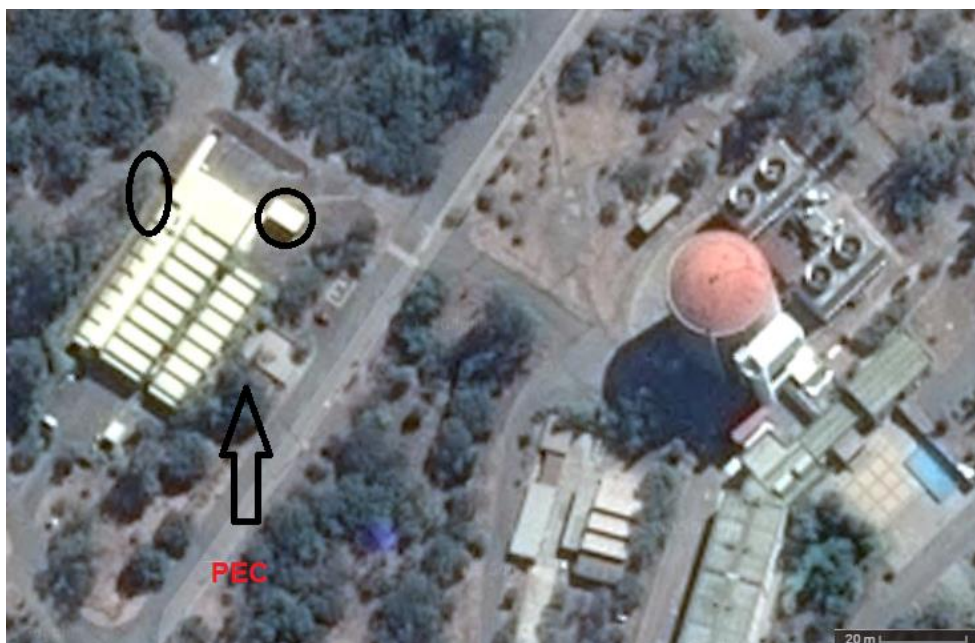


Figura 4.2: Ubicación de la planta elemento de combustibles.

Es necesario conocer las condiciones del sitio donde debe operar la bancada de prueba, ya que éstas determinan las condiciones externas a las que está sometido el sistema; condiciones que afectan a los parámetros de operación del LH.

Las condiciones del sitio, son las siguientes:

Ubicación	:	Región Metropolitana, kilómetro 22, costado norte de la ruta 68, Santiago - Valparaíso
Clima	:	Templado cálido con lluvias invernales (Csb)
Altitud	:	475 m.s.n.m.
Temperatura máxima	:	23,2 °C
Temperatura media	:	14,6 °C
Temperatura mínima	:	7,9 °C
Humedad relativa	:	54,6 %
Precipitación media	:	123,8 mm
Viento dominante	:	4,12 m/s dirección S
Radiación solar	:	233 W/m ²
Zona sísmica (NCh)	:	Zona 2
Tipo de suelo	:	II

El trabajo consiste en el diseño mecánico del LH que incluye: layout, piping, soportaciones, equipos de bombeo e instrumentación. En cuanto a las obras civiles que se deben realizar para acondicionar el sitio escogido, son parte de un contrato con una empresa externa (ARFI) que posee Convenio Marco con la Comisión Chilena de Energía Nuclear.

En las Figura 4.3 y Figura 4.4 se aprecian las 2 posibles ubicaciones del LH.



Figura 4.3: Ubicación del LH: alternativa 1.



Figura 4.4: Ubicación del LH: alternativa 2.

4.1.2 Diagrama conceptual de flujo del LH

Para conocer los componentes del sistema se deben tener las condiciones de operación del LH. En la Figura 4.5 se muestra un diagrama conceptual de flujo y conexión de los componentes, que hacen posible el funcionamiento de sistema.

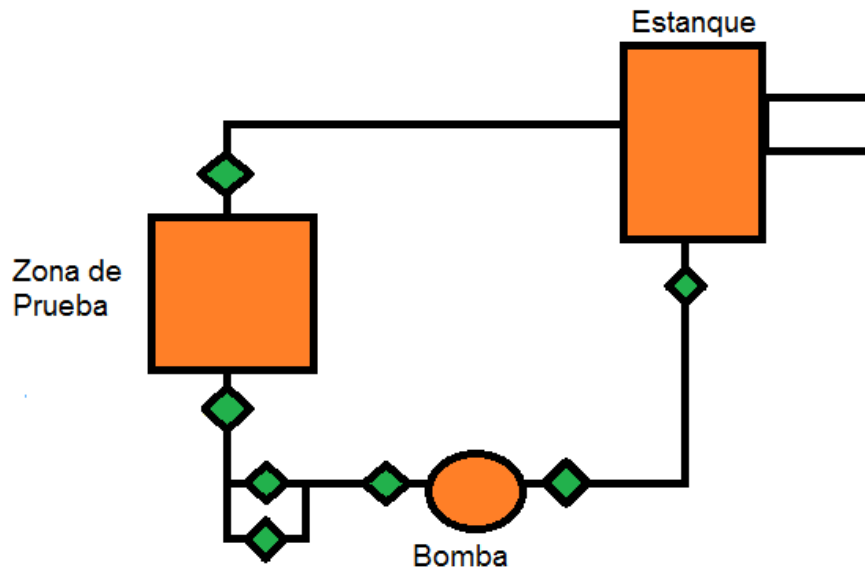


Figura 4.5: Esquema conceptual de flujo del Loop Hidráulico.

En el diagrama conceptual de flujo se identifican 3 zonas importantes para llevar a cabo el funcionamiento del sistema: zona de prueba, bomba y estanque.

4.1.2.1 Zona de prueba

La zona de prueba es la que se utiliza para montar distintos elementos o dispositivos, como elementos combustibles, targets, placas, elementos de control, entre otros. En esta zona se puede observar los elementos o dispositivos, con el objetivo de tener apreciaciones visuales del comportamiento del fluido, donde se puede identificar los siguientes aspectos importantes.

- Se puede ver posibles turbulencias en zonas del elemento combustible, con esto se tiene una retroalimentación para mejorar el diseño.
- Utilizando un tinte de seguimiento, es posible apreciar las líneas de flujo, con esto se puede saber que camino prefieren tomar las líneas de flujo.
- En la zona de prueba se montaran los distintos componentes para medir de forma directa o indirecta las variables o parámetros hidráulicos.

4.1.2.2 Bomba

La bomba es fundamental en el LH, ya que ésta debe ser muy versátil a la hora de hacer circular distintos caudales que se necesiten, para simular distintas condiciones de operación. Además, dentro de todas las bombas que cumplen con la condición anterior, también es importante escoger una bomba que sea la más eficiente de todas, lo cual se logra comparando las curvas características

de ellas con el objetivo de elegir una bomba que tenga un desempeño adecuado (Adecuado gasto energético, sin cavitación en la línea de succión, etc.).

Con el fin de tener un rango amplio de caudales de operación se debe evaluar la posibilidad de más de una bomba, con el objetivo de maximizar el rendimiento del sistema.

4.1.2.3 Estanque

El estanque debe tener la capacidad de almacenar el volumen de agua necesaria para poder responder adecuadamente a las necesidades de caudal que se estimen convenientes. Para seleccionar el estanque se toma en cuenta las siguientes condiciones.

- El volumen del estanque es el necesario para cumplir con el caudal de operación máximo y con el volumen de agua necesario para llenar el circuito incluyendo posibles pérdidas por evaporación.
- Las características del material del estanque deben ser compatibles o resistentes al medio ambiente descrito anteriormente.
- La capacidad debe ser tal que satisfaga las necesidades del sistema.
- Como el estanque es un elemento no fundamental se priorizara la economía del sistema en este componente.

4.1.2.4 Instrumentación

La instrumentación necesaria depende de las necesidades de medición que se deseen, por lo tanto la instrumentación debe estar compuesta por los siguientes requerimientos de medición:

- Se requiere medir el caudal proporcionado por la bomba
- Se requiere medir la pérdida de carga que causa el elemento combustible
- Se necesita medir el nivel del estanque
- Se necesita medir la velocidad crítica en los canales de refrigeración del elemento combustible
- Se necesita medir la temperatura en determinados puntos del dispositivo.

En la Tabla 4.1, se presentan los sensores e instrumentos de medición necesarios para la operación del Loop Hidráulico.

Tabla 4.1: Instrumentación necesaria para el control de operación y la adquisición de datos del LH.

Componente	Parámetro a controlar o medir	Variable involucrada	Instrumento
Estanque	Nivel del estanque	Altura de agua	Sensor de nivel
Bomba	Caudal en el tubo de descarga	Velocidad de rotación del impulsor de la bomba	Variador de frecuencia
Zona de prueba	Pérdida de carga	Velocidad/caudal de los puntos de medición	Instrumento que mida presión
		Presión de los puntos de medición	Instrumento que mida presión
	Velocidad Crítica	Velocidad/caudal del punto de medición	Instrumento que mida presión
	ONB (Onset of Nucleate Boiling)	Temperatura de la superficie de la placa en el punto de medición	Termocupla
		Presión en el punto de medición	Instrumento que mida presión
Piping	Paso de flujo	Caudal	Electro Válvulas

4.1.2.5 Sentidos de circulación del fluido

En el LH se necesita que en la zona de prueba haya flujo ascendente y descendente, para esto en la Figura 4.6 se muestra un diagrama donde se aprecia la configuración necesaria de las tuberías para obtener los dos sentidos de flujo.

Hasta el momento sólo se especifican las válvulas que debería tener para generar el flujo ascendente y descendente en la zona de prueba. En el diseño de detalle se agrega la instrumentación necesaria para mantener un control adecuado en el nivel del estanque y en los parámetros de medición en la zona de prueba.

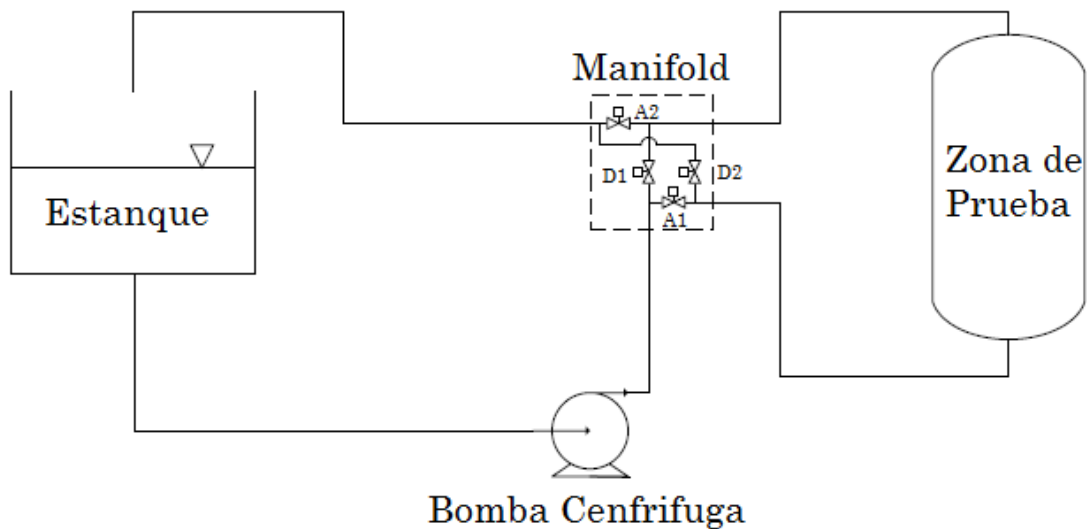


Figura 4.6: Diagrama conceptual de la configuración de las tuberías.

Para tener flujo ascendente en la zona de prueba deben estar cerradas todas las válvulas D, así se provoca el flujo ascendente por la línea de descarga de la bomba. Para obtener flujo descendente en la zona de prueba se deben abrir todas las válvulas D y cerrar todas las válvulas A, causando un flujo descendente por la línea de succión de la bomba. Mayor detalle en P&ID Plano N° LH-01-04

4.1.3 Condiciones de operación

Para el diseño conceptual del LH se toma como referencia los parámetros de operación de los circuitos hidráulicos de los reactores de investigación que existen en Chile: RECH-1 y RECH-2 Ambos pertenecientes a la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN), RECH-1 (CCHEN La Reina) y RECH-2 (CCHEN Lo Aguirre).

Estos reactores son tipo piscina, pero con características hidráulicas distintas, como se muestra en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Características hidráulicas de operación de los reactores RECH-1 y RECH-2.

Características	RECH-1	RECH-2	Unidad
Refrigerante	Agua desmineralizada	Agua desmineralizada	-
Potencia generada	5	10	MW
Profundidad de la piscina	10	10	m
Caudal circuito primario	654	1200	m ³ /h
Caída de presión en el núcleo	0,15	0,23	kg/cm ²
Caudal del circuito secundario	723	900	m ³ /h
Temperatura agua entrada núcleo	35	35	°C
Temperatura agua salida núcleo	41,6	44,5	°C
N° de perforaciones en la grilla	80	81	-

Para fijar las condiciones de operación del LH se toma como referencia el caudal primario que pasa por un elemento combustible del reactor nuclear RECH-2, ya que este reactor es el que tiene un mayor caudal. El caudal que fluye a través de cada posición o perforación de la grilla, en la mayoría de los casos coincide con la ecuación (1).

$$Q_{ec} = \frac{Q_{sp}}{N} \quad (1)$$

Donde.

Q_{sp} : Caudal de refrigeración del sistema primario RECH – 2 $\left[\frac{m^3}{h} \right]$

Q_{pg} : Caudal que pasa por una perforación de la grilla RECH – 2 $\left[\frac{m^3}{h} \right]$

N : Número de perforaciones en la grilla del núcleo del reactor RECH – 2

El caudal que fluye por un elemento combustible del reactor RECH-2 se toma como el caudal normal de operación del LH, ya que este reactor es representativo dentro de los reactores que usan elementos combustibles MTR de placas planas, y, por otro lado, tiene mayor caudal que el RECH-1. Por lo tanto, se pueden diseñar elementos o hacer pruebas para un amplio rango de caudales. El caudal del circuito de refrigeración primario del reactor RECH-2 es 1200 m³/h y existen 81 perforaciones en la grilla del núcleo del reactor RECH-2, de la ecuación (1) se obtiene que el caudal que pasa por un elemento combustible en el reactor RECH-2 y, en consecuencia, el caudal normal de operación del LH es:

$$Q_{pg} = 15 \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

Una vez calculado el caudal normal de operación del elemento combustible es de importancia calcular el caudal máximo de operación del LH.

Para ello se considera la máxima exigencia que debe soportar el dispositivo a evaluar.

La exigencia hidráulica más importante que debe soportar el elemento o dispositivo es la velocidad crítica, la que corresponde a la velocidad que causa una inestabilidad estructural en los canales de refrigeración del elemento o dispositivo a evaluar.

Según Torres & col. [8], la velocidad normal de operación (V_{NO}) del agua que fluye en un canal de refrigeración de un elemento combustible se relaciona con la velocidad crítica (V_C) por medio de la ecuación (2).

$$V_{NO} = \frac{2}{3} V_C \quad (2)$$

Es necesario calcular la velocidad normal de operación que fluye a través de un canal de refrigeración del elemento combustible, pero para esto primero se calcula el caudal que fluye a través de un canal de refrigeración del elemento combustible que se determina por medio de la ecuación (3).

$$Q_{CR} = \frac{Q_{ec}}{N_{CR}} \quad (3)$$

Donde:

Q_{ec} : Caudal que fluye por un elemento combustible $\left[\frac{m^3}{h} \right]$

N_{CR} : Número de canales de refrigeración del elemento combustible

Q_{CR} : Caudal que fluye por un canal de refrigeración del elemento combustible $\left[\frac{m^3}{s} \right]$

Los elementos combustible que se fabrican en la PEC, para el reactor RECH-2, son elementos de placas planas; tienen 19 canales de refrigeración. Utilizando la ecuación (3) se obtiene el caudal que fluye por un canal de refrigeración (Q_{CR}):

$$Q_{CR} = 1 \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

Para calcular la velocidad normal de operación (V_{NO}) se considera el área transversal de uno de los canales de refrigeración (A_{CR}) del elemento combustible. Se calcula la velocidad normal de operación que fluye a través de un canal de refrigeración, como se muestra en la ecuación (4).

$$V_{NO} = \frac{Q_{CR}}{3600 A_{CR}} \quad (4)$$

Como se tiene el caudal normal de operación del elemento combustible ($1 \text{ m}^3/\text{h}$) y el área transversal de un canal de refrigeración de un elemento combustible ($0,0001603 \text{ m}^2$), la velocidad normal de operación del elemento combustible se calcula con la ecuación (4).

$$V_{NO} = 1,368 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Con la velocidad normal de operación del elemento combustible se calcula, la velocidad crítica (V_C) del elemento combustible.

$$V_C = 2,052 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Con la velocidad crítica se calcula el caudal de operación máximo (Q_{CRM}) que debe circular por un canal de refrigeración de un elemento combustible del LH utilizando la ecuación (5).

$$Q_{CRM} = \frac{V_C * A_{CR}}{3600} \quad (5)$$

Con la velocidad crítica de 0,143 m/s y el área del canal de refrigeración de 0,00293 m², se calcula el caudal máximo que circula por el canal de refrigeración con la ecuación (5).

$$Q_{CRM} = 1,18 \left[\frac{m}{h} \right]$$

Con el caudal máximo que circula por un canal de operación y con el número de canales de refrigeración del elemento combustible (N_{CR}) se obtiene el caudal máximo que fluye por un elemento combustible (Q_{Mec}) siguiendo la ecuación (6).

$$Q_{Mec} = Q_{CRM} * N_{CR} \quad (6)$$

Como el número de canales de refrigeración es 15 y el caudal máximo que fluye por un canal de refrigeración es 1,48 m/h se puede obtener el caudal máximo que fluye por un elemento combustible con la ecuación (6).

$$Q_{Mec} = 22,5 \left[\frac{m}{h} \right]$$

Para asegurar que el caudal máximo de operación del LH pase por la velocidad crítica, se pondera el caudal máximo que fluye por el elemento por un factor de seguridad de 1,5 quedando finalmente el caudal máximo de operación del LH como sigue:

$$Q_{MLH} = 33,8 \left[\frac{m}{h} \right]$$

4.1.4 Análisis FODA de la instalación

Para decidir donde se debe instalar el LH se prepara un análisis FODA, donde se analizan las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas de las alternativas. Los dos lugares donde se piensa realizar la instalación del LH son el reactor nuclear y la planta de elemento combustibles (PEC). En la Tabla 4.3 se muestra el análisis FODA para estas dos alternativas.

Tabla 4.3: Análisis FODA de la ubicación del Loop Hidráulico.

	PEC	Reactor RECH-2
Fortaleza	<ol style="list-style-type: none"> 1. Independencia, autonomía 2. Velocidad de respuesta 3. No requiere transporte 4. Se encuentra dentro de la misma instalación de trabajo 5. Cercano a la planta de aguas de la PEC 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Disponibilidad de agua adhoc en calidad y volúmenes 2. Obras civiles existentes
Oportunidades	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ampliación de la instalación 2. Aumento de capacidad y funciones del LOOP (versatilidad) 	Realizar ensayos o pruebas antes de introducirlo al Reactor
Debilidades	Requiere inversión en obras civiles	<ol style="list-style-type: none"> 1. Espacio limitado 2. Inversión en obras civiles 3. Requiere autorización de instalación 4. Fuera de la instalación de trabajo
Amenazas	Departamento de seguridad nuclear del reactor (D.S.N.R)	<ol style="list-style-type: none"> 1. La no autorización de operación por parte del D.S.N.R 2. Desalojo del lugar por autoridades del RECH-2

Finalmente después de realizar el análisis FODA se tiene como resultado que la ubicación definitiva de la instalación del LH es la planta de elementos combustible.

Se destaca la independencia que se obtiene al instalar el Loop en la PEC, ya que la instalación del Loop en el RECH-2 depende de otro departamento. Las desventajas de instalarlo en la PEC conllevan una inversión previa en obras civiles, lo que ya se tiene en el RECH-2 haciendo que sea más cara la instalación en la PEC.

4.1.5 Filosofía de control del LH

El LH se utiliza para pruebas puntuales, es decir, no tiene un funcionamiento continuo. Esas pruebas puntuales tardan el tiempo que se demore en obtener las curvas de pérdidas de carga en función del caudal.

A continuación se describe el funcionamiento del LH:

Comienza con el llenado del estanque por medio de una conexión de agua existente. Una vez que el estanque esté lleno, el elemento combustible se instala en la zona de prueba. En esta zona existen sensores de presión diferencial y de temperatura, los que envían la información al PLC y éste, a su vez, envía dicha información procesada al computador para su almacenamiento y manipulación posterior.

Una vez instalado el elemento combustible en la zona de prueba, se selecciona la configuración de flujo ascendente o descendente en el computador, y se acciona las electro-válvulas para crear el circuito que genera el flujo deseado. Seleccionado el tipo de flujo se activa el variador de frecuencia por medio del computador para controlar la potencia de la bomba, y, por consiguiente, el caudal de la misma. Se mide el caudal con un flujómetro y éste envía la información al PLC para que luego

se envíe al computador. Con esto se pueden obtener los datos de pérdida de carga en función del caudal y también se puede obtener la temperatura en función del tiempo.

La tasa de adquisición de datos debe ser tal que registre el dato cuando la pérdida de carga se mantenga constante (con una variación a la décima).

Luego que se ha realizado la adquisición de datos es importante vaciar el agua de la zona de prueba para terminar el proceso o realizar otro ensayo.

En el estanque se debe monitorear el nivel mínimo de agua, para evitar falla de la bomba.

4.2 Ingeniería Básica del LH

4.2.1 Descripción

En la ingeniería básica se presenta las ecuaciones que intervienen en la determinación del LH como: pérdida de carga, balance energético y análisis del golpe de ariete. También se expone la filosofía de control deseada para el sistema.

En la operación del LH se desarrollan dos sentidos de circulación, flujo ascendente y flujo descendente. Para desarrollar el diseño del LH se considera el sentido de flujo con mayor pérdida de carga, siendo este el sentido de flujo descendente.

Considerando que el LH opera con dos caudales distintos, normal y máximo, los cálculos pertinentes al diseño del Loop son mostrados en paralelo.

4.2.2 Balance de energía

En la Tabla 4.4 se presentan los datos de diseño de los parámetros que determinan el sistema del LH, estos valores dependen de la posición definitiva del LH; por lo tanto cuando se defina por completo la ubicación del Loop, estos valores se deben actualizar.

Tabla 4.4: Parámetros de diseño a considerar.

Parámetro	Valor	Unidad
Altura del punto 1 (Z1)	2,8	m
Altura del punto 2 (Z2)	3	m
Presión del punto 1 (P1)	1	atm
Presión del punto 2 (P2)	1	atm
Velocidad media del punto 1 (V1)	0	m/s
Temperatura de operación del fluido (T)	15,6	°C
Peso específico del fluido (γ)	9,8	N/m ³
Volumen específico del fluido (v)	0,001	m ³ /kg
Viscosidad del fluido (η)	0,001003	kg/m s
Calor latente de evaporación del fluido agua (h_{vp})	0,18035016	m

Los puntos de balance energéticos 1 y 2 se especifican en la Figura 4.7, donde el punto 1 es el punto que se ubica en la salida de la tubería y el punto 2 se ubica en la superficie del nivel de estanque.

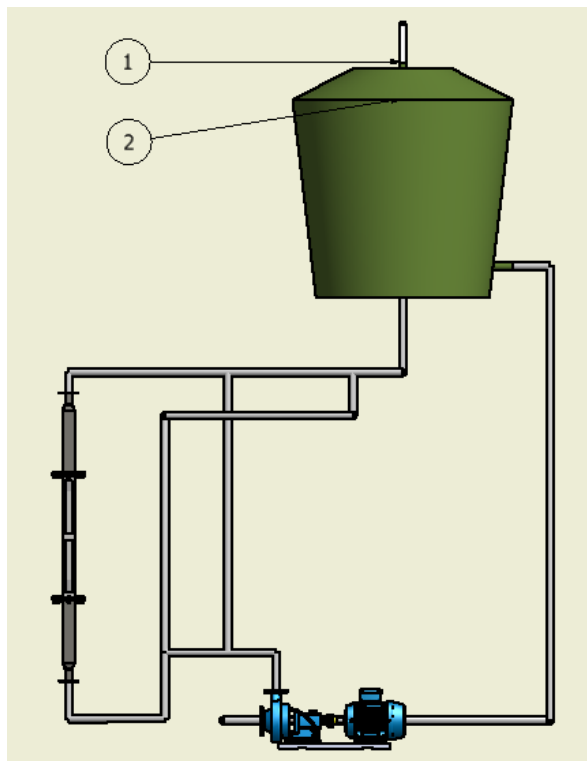


Figura 4.7: Puntos de balance energético.

4.2.3 Selección preliminar del material de la tubería

Para seleccionar el material de la tubería, se toman en cuenta los factores y condiciones de operación, calculando el espesor necesario para satisfacer las solicitaciones impuestas por el sistema.

Para calcular el espesor de la tubería se utiliza la ecuación (7), según [9].

$$e = \frac{PD}{2(\sigma + Py)} \quad (7)$$

Donde:

e : Espesor de la tubería [in, mm]

P : Presión en la tubería $\left[MPa, \frac{Kg}{cm^2}\right]$

D : Diámetro externo de la tubería [in, mm]

σ : Limite de fluencia del material $\left[MPa, \frac{Kg}{cm^2}\right]$

y : Coeficiente que depende del material y de la temperatura de diseño

En el reactor RECH-2 se utiliza agua desmineralizada y desionizada. El agua desionizada es bastante agresiva con los metales, incluso con el acero inoxidable; por lo tanto debe utilizarse plástico o vidrio para su almacenaje y manejo. Para el LH se utiliza agua desmineralizada aunque

es posible utilizar agua potable y por consiguiente el material de la tubería no debe cumplir con condiciones especiales. La presión a la que está sometida la tubería es baja, en primera instancia se pretende utilizar tuberías de PVC ya que cumple con los requerimientos y tiene un bajo costo. Para definir el diámetro preliminar se utiliza la Figura 4.8 [10] donde se puede apreciar que con los caudales dados se recomienda un diámetro preliminar de 2 in. En la Tabla 4.5 se muestran los distintos coeficientes “y” para el cálculo de espesor mínimo de la tubería.

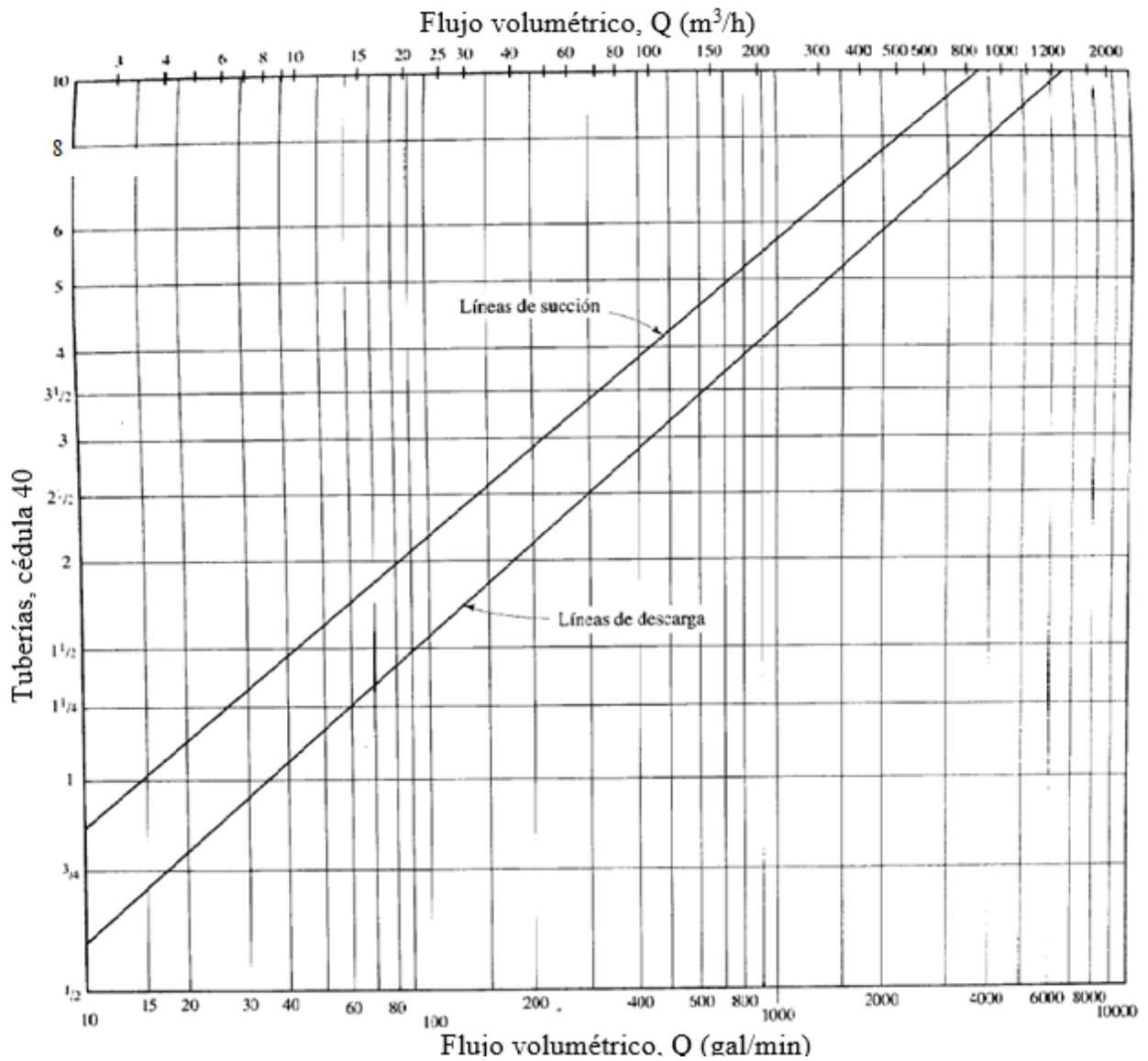


Figura 4.8: Ayuda para seleccionar el tamaño de tubería [10].

Tabla 4.5: Coeficientes “y” [10].

Materiales	Temperatura, (°C/°F)					
	≤ 482/900	510/950	538/1000	566/1050	593/1100	≥ 621/1150
Acero Ferrítico	0,4	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7
Acero Austenítico	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,7
Otros metales dúctiles	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Fundiciones	0,0

Para tuberías de PVC se considera “y” como el peor caso posible, esto es $y = 0$.

4.2.4 Ecuación de energía para el cálculo de pérdidas de carga

Para la selección preliminar de la bomba se utiliza la ecuación de Bernoulli (8), en ella se hace un balance de energía entre dos puntos, también intervienen las pérdidas de energía producidas por la fricción entre las partículas del fluido y entre la pared y el fluido.

$$E_1 + h_A - h_R - h_L = E_2 \quad (8)$$

Donde:

E_1 : Presión total en el punto 1 [m. c. a]

E_2 : Presión total en el punto 2 [m. c. a]

h_A : Presión que se agrega al fluido [m. c. a]

h_R : Presión que se remueve del fluido [m. c. a]

h_L : Pérdidas de presión del sistema por fricción [m. c. a]

La presión total en cada punto se define de la siguiente forma.

$$E = \frac{P}{\gamma} + Z + \frac{V^2}{2g} \quad (9)$$

Donde:

P : Presión del fluido en el punto [m. c. a]

Z : Altura en la dirección de la gravedad desde una cota de referencia [m]

V : Velocidad del fluido en la sección $\left[\frac{m}{s}\right]$

γ = Peso específico del fluido $\left[\frac{N}{m^3}\right]$

g : Aceleración de gravedad

4.2.5 Número de Reynolds

Es necesario saber si se está trabajando con un flujo laminar o turbulento, para esto existe un número adimensional que indica en que zona se está, el número de Reynolds (10).

$$N_R = \frac{VD\rho}{\eta} \quad (10)$$

Donde:

N_R : Número de Reynolds

V : Velocidad promedio del fluido [$\frac{m}{s}$]

D : Diámetro de la tubería [m]

ρ : Densidad [$\frac{Kg}{m^3}$]

η : Viscosidad [$\frac{Kg}{m \cdot s}$]

Con los parámetros anteriores se puede calcular el número de Reynolds. Existen números críticos que delimitan un rango con el objetivo de saber en qué régimen se encuentra el fluido (laminar o turbulento).

$$\begin{aligned} N_R < 2000 &\rightarrow \text{Flujo laminar} \\ N_R > 4000 &\rightarrow \text{Flujo turbulento} \end{aligned}$$

4.2.6 Pérdidas Mayores

Una vez que ya se sabe qué tipo de flujo se tiene en la tubería se pueden calcular las pérdidas producidas por la circulación del fluido a través de una tubería recta. Para flujo laminar y turbulento se utiliza la ecuación de Darcy (11).

$$h_L = f \frac{LV^2}{D2g} \quad (11)$$

Donde:

L : Longitud de la corriente del flujo

f : Factor de fricción

Cuando se tiene flujo laminar el factor de fricción se calcula con la ecuación (12):

$$f = \frac{64}{N_R} \quad (12)$$

Cuando el flujo es turbulento se debe tomar en cuenta que el factor de fricción depende de la rugosidad relativa y del número de Reynolds y se calcula con la ecuación (13).

La rugosidad relativa, ecuación (14), es la relación entre el diámetro de la tubería y el factor de rugosidad absoluta del material de la tubería. También se puede estimar utilizando el diagrama de Moody.

$$f = \frac{0,25}{\left(\log \left(\frac{1}{3,7\varepsilon_{rs}} + \frac{5,74}{N_R^{0,9}} \right) \right)^2} \quad (13)$$

$$\varepsilon_{rs} = \frac{D_{si}}{\varepsilon_{PVC}} \quad (14)$$

Donde:

ε_{rs} : *Rugosidad relativa*

ε_{PVC} : *Rugosidad absoluta de PVC [mm]*

D_{si} : *Diámetro interior de tubería de succión [mm]*

4.2.7 Pérdidas Menores

Se deben evaluar las pérdidas producidas por el paso del fluido por los componentes menores tales como válvulas y accesorios, según la ecuación (15).

Las pérdidas menores dependen de la velocidad del fluido y de un factor llamado coeficiente de resistencia (K) que depende de la válvula o accesorio que se está evaluando.

$$h_L = K \left(\frac{V^2}{2g} \right) \quad (15)$$

A continuación se presentan los coeficientes de resistencia utilizados en el circuito de LH, por cada componente.

4.2.7.1 Zona de Prueba

La zona de prueba es aquella donde se llevan a cabo las mediciones de los componentes sujetos a pruebas hidráulicas, se define parcialmente con una geometría cilíndrica; lo que hace posible tratarla como un tubo para consideraciones hidráulicas.

4.2.7.1.1 Expansión súbita en la zona de prueba

Para ambos circuitos ascendente y descendente se tiene en la zona de prueba una expansión súbita, producida cuando el fluido ingresa a la zona de prueba el coeficiente de resistencia causado por esta singularidad se calcula como se muestra en la ecuación (16).

$$K = \left(1 - \left(\frac{D_{di}}{D_{zp}} \right)^2 \right)^2 \quad (16)$$

Donde:

D_{di} : Diámetro interior de la tubería de descarga [in, mm]

D_{zp} : Diámetro de la zona de prueba [in, mm]

4.2.7.1.2 Contracción súbita en la zona de prueba

En la zona de prueba, independiente del sentido del flujo, también existe una contracción súbita en el circuito de la tubería. Ocurre cuando el fluido deja la zona de prueba (D_1) y entra a la tubería (D_2). Para determinar el coeficiente de resistencia se utiliza la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Coeficiente de resistencia contracción súbita [10].

Velocidad en la tubería pequeña									
D_1/D_2	0,6 m/s	1,2 m/s	1,8 m/s	2,4 m/s	3 m/s	4,5 m/s	6 m/s	9 m/s	12 m/s
1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,1	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06
1,2	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,09	0,10	0,11
1,4	0,17	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18	0,19	0,20
1,6	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,25	0,25	0,25	0,24
1,8	0,34	0,34	0,34	0,33	0,33	0,32	0,31	0,29	0,27
2,0	0,38	0,37	0,37	0,36	0,36	0,34	0,33	0,31	0,29
2,2	0,40	0,40	0,39	0,39	0,38	0,37	0,35	0,33	0,30
2,5	0,42	0,42	0,41	0,40	0,40	0,38	0,37	0,34	0,31
3,0	0,44	0,44	0,43	0,42	0,42	0,40	0,39	0,36	0,33
4,0	0,47	0,46	0,45	0,45	0,44	0,42	0,41	0,37	0,34
5,0	0,48	0,47	0,47	0,46	0,45	0,44	0,42	0,38	0,35
10,0	0,49	0,48	0,48	0,47	0,46	0,45	0,43	0,40	0,36
∞	0,49	0,48	0,48	0,47	0,47	0,45	0,44	0,41	0,38

4.2.7.2 Estanque

El estanque es el componente del LH que se utiliza para que cumpla la función de fuente y sumidero de agua. Este presenta dos interacciones con el circuito del LH, una conexión directa de tubería, empleada para utilizar el estanque como fuente, y una entrada de agua de manera libre al estanque.

4.2.7.2.1 Contracción súbita

En el estanque se produce solo una pérdida causada cuando el agua deja el estanque, por la existencia de una contracción súbita.

Para calcular el coeficiente se utiliza Tabla 4.6.

4.2.7.2.2 Válvulas

Para calcular las válvulas, se consideran las que causan mayor pérdida de carga, esta es la válvula de globo.

Según Mott [10], esta válvula tiene un factor de fricción (f_t) de.

$$f_t = 0,019$$

Según Mott [10], el coeficiente de resistencia queda como sigue.

$$K = 340 * f_t$$

4.2.7.2.3 Codos

Para calcular las pérdidas producidas por los codos, se consideran codos de 90° los que tienen un factor de fricción según Mott [10] de:

$$f_t = 0,019$$

Según Mott [10], el coeficiente de resistencia se puede calcular de la siguiente forma.

$$K = 40 * f_t$$

4.2.8 Carga sobre la bomba

La carga sobre la bomba (h_a) es la energía necesaria para hacer circular el flujo con los requerimientos solicitados por el sistema, se calcula con la ecuación (17).

$$h_a = \frac{(P_2 - P_1)}{\gamma} + (Z_2 - Z_1) + \frac{(V_2^2 - V_1^2)}{2g} + h_{LTotal} \quad (17)$$

4.2.9 Nivel de succión y carga estática de bombeo

Para calcular el Net Positive Suction Head ($NPSH_A$) de la bomba, se utiliza la ecuación (18).

$$NPSH_A = h_{sp} + h_s - h_f - h_{vp} \quad (18)$$

Donde:

h_{sp} : Carga de presión estática en el fluido [m. c. a]

h_s : Diferencia de elevación [m. c. a]

h_f : Pérdida de carga en la tubería [m. c. a]

h_{vp} : Calor latente de evaporación del fluido [m. c. a]

Una vez calculado el $NPSH_A$, debe cumplir la ecuación (19).

$$NPSH_A > 1,10 NPSH_R \quad (19)$$

Donde el $NPSH_R$ es un dato proporcionado por el fabricante de la bomba.

4.2.10 Potencia requerida por el sistema hidráulico

Para calcular la potencia requerida para impulsar el fluido se debe obtener primero la potencia hidráulica del sistema y posteriormente la potencia del motor. La potencia hidráulica del sistema está dada por la ecuación (20).

$$W_{hs} = Q h_a \gamma \quad (20)$$

Donde:

W_{hs} : Potencia hidráulica del sistema [W, HP]

Q : Caudal del sistema [$\frac{m^3}{s}$]

h_a : Carga del sistema [m. c. a]

Para calcular la potencia hidráulica de la bomba (W_{hb}) se debe conocer el rendimiento (η_b) de ésta y se calcula según la ecuación (21).

$$W_{hb} = \frac{W_{hs}}{\eta_b} \quad (21)$$

4.2.11 Análisis preliminar del golpe de ariete

Es de importancia considerar el golpe de ariete en el dimensionamiento de la tubería para evitar que se produzca falla en ella.

Se calcula la velocidad de propagación de la onda de agua, mediante la ecuación de Allievi (22).

$$V_0 = \sqrt{\frac{1}{\gamma \left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{D_i}{Ee} \right)}} \quad (22)$$

Donde:

V_0 : Velocidad de propagación de la onda

ε : Módulo de elasticidad del agua

E : Módulo de elasticidad de la tubería

D_i : Diámetro interior de la tubería

e : Espesor de la tubería

4.2.11.1 *Tiempo de propagación de la onda de presión*

El tiempo de propagación es el tiempo (T_p) que tarda en propagarse una onda de presión en una tubería, desde la válvula hasta el punto de retorno de la onda (L). Como se muestra en la ecuación (23).

$$T_p = \frac{2L}{V_0} \quad (23)$$

4.2.11.2 *Determinación de la posibilidad de golpe de ariete*

Se considera el tiempo de cerrado de la válvula o de parada de una bomba como T_c .

Si $T_c \leq T_p$, existe un cierre instantáneo, ya que el tiempo que se demora la onda en recorrer la tubería de ida y regreso es mayor que el tiempo de cerrado de la válvula. Por lo tanto se produce golpe de ariete.

Si $T_c \geq T_p$, no existe cierre instantáneo, ya que la onda de presión regresa a la válvula sin que esté totalmente cerrada. Por lo tanto no se produce golpe de ariete.

4.2.11.3 *Cálculo de aumento de presión producido por golpe de ariete*

Para calcular el aumento de presión se utiliza la ecuación (24).

$$\Delta P = \rho V_0 \Delta V \quad (24)$$

Donde:

ΔP : Variación de presión $\left[MPa, \frac{Kgf}{cm^2} \right]$

ΔV : Variación de la velocidad de circulación del fluido $\left[\frac{m}{s} \right]$

ρ : Densidad del agua $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

4.2.11.4 Cálculo del esfuerzo de tracción producido por el aumento de presión en la tubería

La tracción generada (σ) por el aumento de presión (ΔP) se calcula según la ecuación (25).

$$\sigma = \frac{\Delta P D_i}{2e} \quad (25)$$

Finalmente se compara la tracción generada por aumento de presión con el esfuerzo admisible del material. Obteniendo así el factor de seguridad como se muestra en la ecuación (26).

$$N = \frac{\sigma_0}{\sigma} \quad (26)$$

Donde:

N : Factor de seguridad

σ_0 : Esfuerzo de fluencia del material $\left[MPa, \frac{kg}{cm^2}\right]$

4.3 Ingeniería Detalle del LH

4.3.1 Diseño de la zona de prueba

El diseño de la zona de prueba tiene como función representar las condiciones operacionales hidráulicas que tiene al elemento combustible del RECH-1 y además someter a éste a condiciones de operación máxima para su caracterización hidráulica.

A continuación se muestra un esquema de cada componente de la zona de prueba del LH.

4.3.1.1 Elemento combustible RECH-1

En la Figura 4.9 se muestra un esquema, con las medidas generales, del elemento combustible del RECH-1.

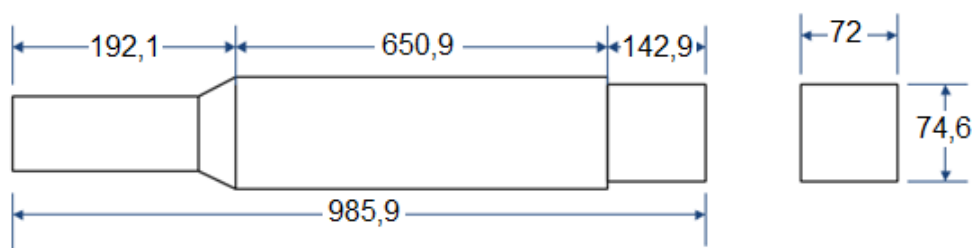


Figura 4.9: Esquema del elemento combustible, medidas en mm.

Éstas se toman como referencia para el diseño de los otros componentes, que se describen a continuación.

En la zona de prueba se puede identificar 2 sub componentes, la zona central y la zona externa. En el interior de cada sub componente se encuentran otros componentes que se describen más adelante.

4.3.1.2 Zona Central

En la Figura 4.10 se muestra el esquema de la zona central, es de sección cuadrada y falta por determinar los espesores e_1 . El espesor e_1 se determina con el cálculo de esfuerzos a los que está sometido el estanque, considerando que el material de éste es acero inoxidable.

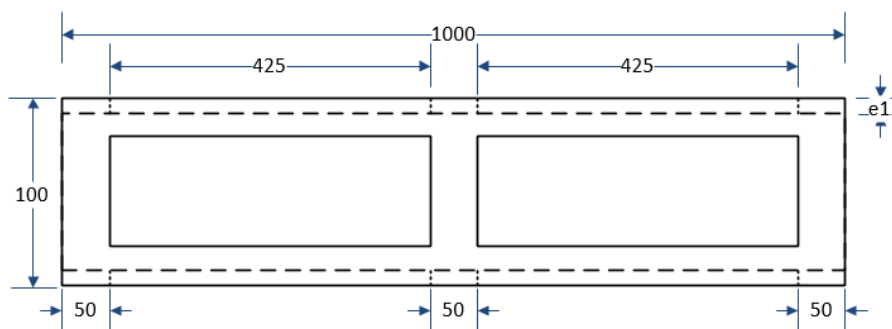


Figura 4.10: Esquema de la zona central de la zona de prueba.

4.3.1.3 Zona Externa

En la Figura 4.11 se muestra el esquema de la zona externa. En este componente falta determinar el largo L_1 . Que se determina por el largo del subcomponente de esta zona (Difusor). La zona externa es del mismo material de la zona central.

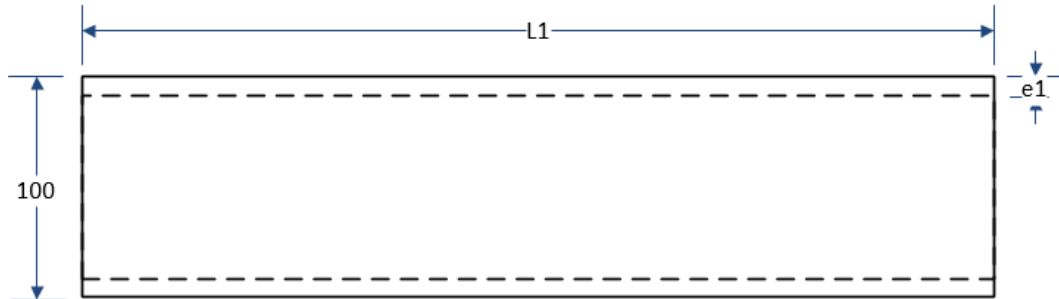


Figura 4.11: Esquema de la zona exterior.

4.3.1.4 Sujeción Inferior

En la Figura 4.12, se puede observar el esquema de la sujeción inferior, en éste existen variables por determinar como D_1 y e_2 . El diámetro está determinado por el perfil de la boquilla del elemento combustible RECH-1 y el espesor e_4 se determina con los esfuerzos solicitantes considerados en la zona central y exterior, a pesar que la sujeción inferior es del mismo material que la zona exterior, la sujeción inferior tiene un espesor distinto ya que posee una geometría circular.

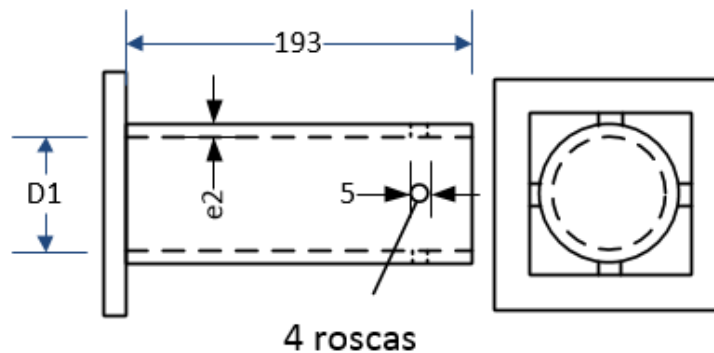


Figura 4.12: Sujeción Inferior.

4.3.1.5 Sujeción Superior

En la Figura 4.13 se muestra el esquema de la sujeción superior donde falta por determinar el lado L_2 y el espesor e_4 . El lado L_2 se determina por medio de la geometría de la caja de filtro del elemento combustible RECH-1, de tal manera que ésta entre ajustada.

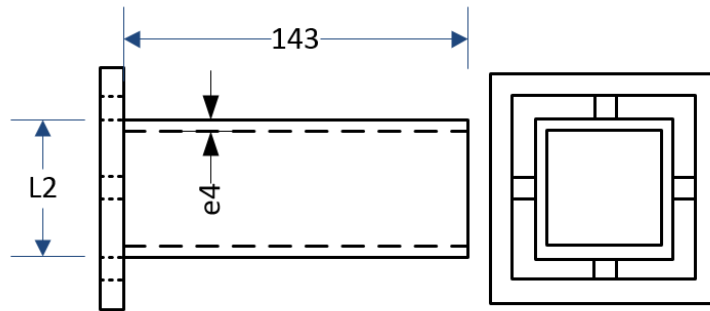


Figura 4.13: Sujeción superior del elemento combustible.

4.3.1.6 Caja de acrílico

En la Figura 4.14 se observa un esquema de la caja de acrílico que se ubica en el interior de la zona central de la zona de prueba con el objetivo de permitir la visibilidad hacia el interior de la misma y además asegurar que esta genera un sello hermético. Falta determinar el espesor de la caja de acrílico e_3 .

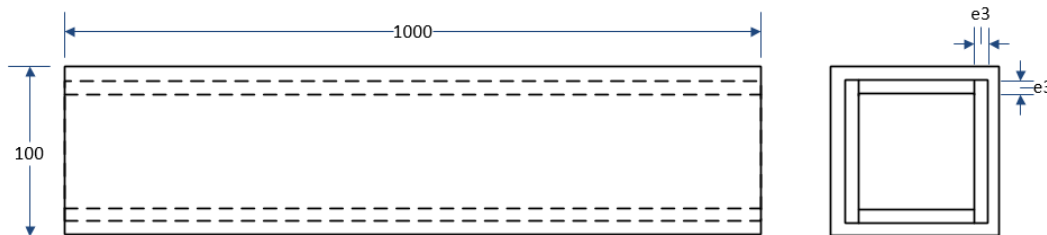


Figura 4.14: Caja de acrílico de la zona central de la zona de prueba.

4.3.2 Cálculo de los componentes de la zona de prueba

La zona de prueba, ver Plano N° LH-02-01, es la que se utiliza para montar el elemento combustible RECH-1. En ésta se puede observar el elemento combustible con el objetivo de tener apreciaciones visuales del comportamiento del fluido, donde se identifican posibles turbulencias en zonas del elemento combustible; con esto se tiene una retroalimentación para mejorar el diseño.

Para el diseño detallado se ha utilizado acero inoxidable 304 como material general para todos los componentes del LH, se deben considerar y calcular los parámetros indicados en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7: Parámetros por determinar.

Símbolo	Parámetro
e_1	Espesor de la pared de la zona central y externa
e_2	Espesor de la pared de la sujeción inferior
e_3	Espesor del acrílico
e_4	Espesor de la pared de la sujeción superior
L_1	Largo de la zona exterior
L_2	Lado de la sujeción superior
D_1	Perfil de la boquilla del elemento RECH-1

4.3.2.1 Zona central, externa, sujeción superior y caja de acrílico

Para determinar los espesores, primero se comienza por los espesores de las paredes de los componentes con sección cuadrada.

En las Figura 4.15 y Figura 4.16 se puede observar las distintas cargas solicitadas causadas por la presión interna y el momento de flexión para sección cuadrada [9].

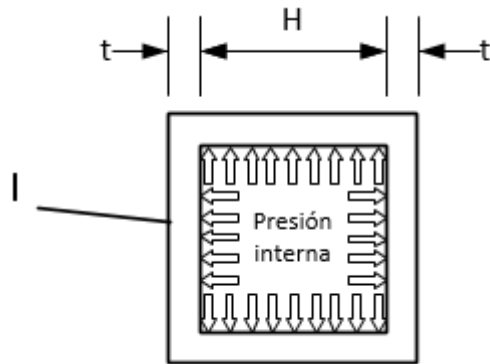


Figura 4.15: Cargas por presión interna [9].

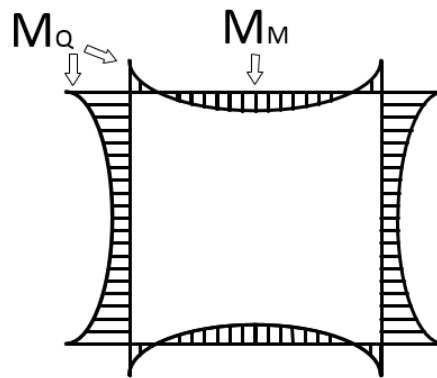


Figura 4.16: Diagrama de momento flector del recipiente debido a la presión interna [9].

La ecuación del esfuerzo máximo en la pared del elemento es la ecuación (27).

$$(S_t)_q = \frac{PH}{2t} + \frac{PH^2}{2t^2} \quad (27)$$

Donde:

P: Presión interna (MPa)

H: Lado interno del recipiente cuadrado (mm)

t: Espesor de la pared del recipiente cuadrado (mm)

$(S_t)_q$: Esfuerzo admisible del material (MPa)

La ecuación (27) es una ecuación cuadrática, cuya solución se muestra en la ecuación (28).

$$t = \frac{\frac{PH}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{PH}{2}\right)^2 - 4(S_t)_Q \left(-\frac{PH^2}{4}\right)}}{2(S_t)_Q} \quad (28)$$

Se calcula el espesor adecuado para los siguientes valores, Tabla 4.8.

Tabla 4.8: Valor de los espesores.

Material	Acero inoxidable 304 (e1)	Acero inoxidable 304 (e4)	Acrílico (e3)	Unidad
Presión interna (P)	0,1	0,1	0,1	MPa
Lado interno del recipiente (H)	84	75	74	mm
Esfuerzo admisible del material $(S_t)_Q$	290	290	47	MPa
Espesor de la pared del recipiente (t)	3	2	5	mm

Así se obtiene el valor de los espesores e1, e4 y e5, quedando determinados los componentes: zona central, ver Plano N° LH-02-10; zona externa, ver Plano N° LH-02-04; sujeción superior, ver Plano N° LH-02-09 y caja de acrílico, ver Plano N° LH-01-03.

4.3.2.2 Sujeción Inferior

Para calcular el espesor de la sujeción inferior se debe considerar una sección transversal circular tal como se muestra en la Figura 4.17.

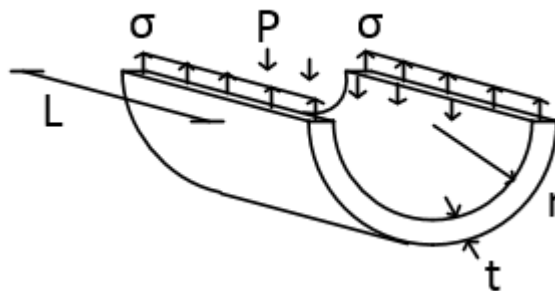


Figura 4.17: Esquema de un cilindro bajo esfuerzos por presión interna.

El espesor de la pared del cilindro se calcula con la ecuación (29)

$$t = \frac{Pr}{\sigma_0 + yP} \quad (29)$$

En la Tabla 4.9 se muestra los parámetros involucrados y el valor del espesor de la pared de la sujeción inferior, ver Plano N° LH-02-14, adecuado para las condiciones solicitadas según la ecuación (4).

Tabla 4.9: Valor de espesor de la sujeción cilíndrica.

Parámetros	Valor	Unidad
Presión interna (P)	1	MPa
Radio (r)	57,2	mm
Esfuerzo admisible del material (S_t)_Q	290	MPa
Espesor (t) (e2)	5	mm

4.3.2.3 Bridas

Las uniones que se utilizan entre los tubos de 2 pulgadas de PVC - zona de prueba y entre la zona central - externa de la zona de prueba son bridas. Estas bridas son comerciales y se selecciona según las especificaciones a las que están sometidas.

4.3.2.4 Difusor

El difusor, ver Plano N° LH-01-02, se utiliza para tener un perfil de velocidad uniforme y éste se compone de 162 tubos y 3 separadores.

4.3.2.4.1 Tubos

Los tubos están determinados por el diámetro interno, espesor y largo. Las dimensiones y propiedades del difusor se muestran en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10: Dimensiones y propiedades del tubo del difusor.

Parámetro	Valor	Unidad
Diámetro externo	6,35	mm
Espesor	0,89	mm
Diámetro interior	4,57	mm
Área Interna	16,40	mm ²

El largo del tubo se obtiene aplicando la condición de flujo desarrollado por cada tubo. La cantidad de tubos queda determinada por el tamaño de la sección de la zona exterior. Según esto, existe un total de 81 tubos con una separación entre ellos de 1,86 mm.

El caudal máximo es de aproximadamente 33,8 m³/h. El caudal que pasa por cada tubo es de 0,49 m³/h. Con el área interior del tubo y con este caudal se obtiene una velocidad en el interior del tubo de 8,36 m/s. El número de Reynolds en el tubo es de 3.8103.552, por lo tanto el flujo por el tubo es turbulento, entonces se aplica la ecuación (5) [10].

$$L = 1,359 * D * R_e^{1/4} \quad (5)$$

Finalmente el largo del tubo según la ecuación (5) es de 516 mm, ver Plano N° LH-02-06.

4.3.2.4.2 Separador

Para mantener los tubos del difusor paralelo y fijo se utiliza un separador ver Plano N° LH-02-05.

4.3.3 Selección de la instrumentación

De acuerdo a los parámetros de operación y los rangos de medición solicitados la selección de los instrumentos y sensores es la siguiente:

4.3.3.1 Medición de temperatura

Las zonas de medición de temperatura están determinadas por el tamaño del instrumento de medición, puesto que se requiere medir entre los canales de refrigeración del elemento combustible RECH-1 el instrumento debe ser de un tamaño pequeño.

El rango de medición requerido es de 0 – 100 [°C].

El instrumento que cumple con las solicitudes es un sensor PT100, como se ve en la Figura 4.18, en la Tabla 4.11 se muestra las características del sensor.

Tabla 4.11: Característica de la PT100.

Característica	Valor	Unidad
Uso	General	-
Protección	SS316	-
Cable de malla metálica	2	m
Largo de sensor (L1)	60	mm
Rango de temperatura	-50 a 200	°C
Diámetro de sensor	6,35	mm



Figura 4.18: Sensor de temperatura PT100.

4.3.3.2 Medición de presión

Se necesita versatilidad en la medición de la presión, ya que se quiere medir diferencia de presión interna (canales del elemento combustible) y diferencia de presión externa (superficie externa de

los elementos). El rango de presión de operación del Loop es de (119,8-130,6) [Pa] – (1,198-1,306) [mBar].

El instrumento que cumple las solicitaciones es un transmisor de presión diferencial mostrado en la Figura 4.19. Las características se indican en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12: Característica del transductor de presión.

Característica	Valor	Unidad
Salida	4 – 20	mA
Fluidos	Gases y líquidos no corrosivos	-
Precisión	± 0,5	%FSD
Alimentación	24	VDC
Compensación de temperatura	0 + 50	°C
Presión estática	300	%FSD
Temperatura de proceso	-20 + 85	°C
Conexión a proceso por manguera	8	mm
Rango de medición	0 – 40	mBar



Figura 4.19: Transductor de presión diferencial.

4.3.3.3 Medición de flujo

Se necesita medir el flujo de agua, ya que es necesario medir el caudal que está circulando por el LH. Este instrumento debe ser conectado después de la bomba cuando exista un flujo de agua desarrollado. El rango de operación del LH es de 15 – 33,8 [m³/h].

El instrumento seleccionado es un flujómetro tipo rotámetro, ver Figura 4.20, las características se muestran en la Tabla 4.13. En particular a este instrumento se le agregan 2 complementos necesarios, el fitting de ajuste a la cañería y una salida análoga para la adquisición de datos.

Tabla 4.13: Características del flujómetro.

Características	Valor	Unidad
Tipo de fluido	Líquidos limpios	-
Pantalla LCD	8 dígitos	-
Precisión	± 2	% FSD
Máxima presión de trabajo a 21 °C	300	PSI
Máxima temperatura de fluido a 93 °C	0	PSI
Alimentación	4 pilas AA o adaptador 16-24	VDC



Figura 4.20: Flujómetro seleccionado para el LH RECH-1.

4.3.3.4 Control de flujo ascendente y descendente

Es necesario tener flujo ascendente y descendente en la zona de prueba, para esto se diseña una configuración con electro válvulas, como se muestra en la Figura 4.21. Se puede observar en el Plano N° LH-01-04, específicamente en la zona de Manifold. Las características de las electro válvulas seleccionadas se muestra en la Tabla 4.14.

Tabla 4.14: Características de la electro válvula.

Características	Valor	Unidad
Hilo	2	in
Presión diferencial de trabajo	0 a 16	bar
Presión diferencial de trabajo mínimo	0,5	bar
Temperatura de trabajo	80	°C
Bobina 50/60 Hz	220	VAC
Montaje	Cualquier posición	-



Figura 4.21: Válvula solenoide.

4.3.3.5 Control de caudal

Para controlar el caudal de trabajo del LH se utiliza un variador de frecuencia, como se observa en la Figura 4.22, esto permite controlar la velocidad de rotación del impulsor de la bomba, trayendo como consecuencia el control del caudal. Las características del variador se muestran en la Tabla 4.15.



Figura 4.22: Variador de frecuencia.

Tabla 4.15: Característica del variador de frecuencia.

Característica	Valor	Unidad
Potencia	5,5	HP
Voltaje de salida 3 fases	380	VDC

4.3.3.6 Control de señales y conectividad

Para controlar las señales que se obtienen de los sensores, se utiliza un PLC (Controlador Lógico Programable) mostrado en la Figura 4.23, administra las señales de los sensores, manipula las electro válvulas y establece la comunicación con un computador. Las características del PLC adecuado se muestran en la Tabla 4.16.



Figura 4.23: Controlador PLC.

Tabla 4.16: Característica del PLC.

Característica	Valor	Unidad
Entrada	12 - 24	VDC
Salida 8 Rele	10	A (resistivo)

4.3.4 Cálculo del LH

Para realizar el cálculo del LH a nivel de ingeniería básica primero se consideran las condiciones de operación del sistema, luego se sigue con los procedimientos de cálculo de pérdidas de carga, posteriormente se calcula la carga sobre la bomba y se obtienen los parámetros característicos de esta, para finalmente seleccionar la bomba adecuada para el sistema.

4.3.4.1 Criterios de diseño del sistema

En el diseño del sistema se considera componentes del LH como el largo de la tubería de succión, el largo de la tubería de descarga, la cantidad de válvulas y la cantidad de codos.

En la Tabla 4.17 se muestran los parámetros de diseño del sistema

Tabla 4.17: Parámetros considerados para el diseño del LH.

Parámetro	Valor	Unidad
Largo de la tubería de succión	4,95 m	m
Largo de la tubería de descarga	16,05 m	m
Cantidad de válvulas	4	unidades
Cantidad de codos succión	4	unidades
Cantidad de codos descarga	8	unidades
Cantidad de TEE succión	0	unidades
Cantidad de TEE descarga	6	unidades
Diámetro de la tubería	2/50,8	in/mm
Rugosidad absoluta del PVC	0,0015	mm

4.3.4.2 Cálculo de Pérdidas de carga

Se calculan las pérdidas del sistema causadas por la fricción en las cañerías. Estas pérdidas se dividen en dos, pérdidas mayores y pérdidas menores (causadas por elementos puntuales en el sistema, como válvulas, codos y accesorios).

4.3.4.2.1 Pérdidas Mayores

4.3.4.2.1.1 Tubería de succión

Para determinar las pérdidas mayores primero se calculan las velocidades en la tubería de succión con el caudal de operación normal y con el caudal de operación máximo. Entrando con la rugosidad relativa y el factor de fricción se calcula el número de Reynolds para cada caudal.

En la Tabla 4.18 se muestran los valores obtenidos.

Tabla 4.18: Datos aplicables y condiciones de flujo en el tubo de succión.

Parámetro	Caudal Normal	Caudal Máximo	Unidad
Velocidad del fluido	2,1	5,1	m/s
Número de Reynolds	102.835	257.087	-
Rugosidad Relativa	33.867	33.867	-
Factor de fricción	0,018	0,015	-
Pérdida de carga	0,37	1,94	m.c.a

4.3.4.2.1.2 Tubería de descarga

Se reiteran los mismos cálculos realizados en la tubería de succión, pero ahora para la tubería de descarga. En la Tabla 4.19 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 4.19: Datos aplicables y condiciones de flujo en la tubería de descarga.

Parámetro	Caudal Normal	Caudal Máximo	Unidad
Velocidad del fluido	2,1	5,1	m/s
Número de Reynolds	102.835	257.087	-
Rugosidad relativa	33.867	33.867	-
Factor de fricción	0,018	0,015	-
Pérdida de carga	1,2	6,3	m.c.a

4.3.4.2.1.3 Zona de prueba

Para calcular las pérdidas mayores que se generan en la zona de prueba se considera el diámetro hidráulico. Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 4.20.

Tabla 4.20: Datos aplicables y condiciones de flujo en la zona de prueba.

Parámetro	Caudal Normal	Caudal Máximo	Unidad
Velocidad del fluido	0,524	1,310	m/s
Número de Reynolds	52.240	130.600	-
Rugosidad relativa	66.667	66.667	-
Factor de fricción	0,021	0,017	-
Pérdida de carga	0,01	0,03	m.c.a

Con los datos anteriores se calcula el total de las pérdidas mayores, para el caudal normal ($h_{Mntotal}$) y para el caudal máximo ($h_{Mmtotal}$).

$$h_{Mntotal} = 1,566 \text{ m. c. a}$$

$$h_{Mmtotal} = 8,240 \text{ m. c. a}$$

4.3.4.2.2 Pérdidas Menores

Los cálculos de las pérdidas menores de los componentes involucrados en el circuito del LH se presentan en la Tabla 4.21.

Tabla 4.21: Resumen de pérdidas menores en el circuito del LH.

Componente	K	Caudal normal		Caudal máximo	
		Velocidad Normal (m/s)	Pérdida (m)	Velocidad Máxima (m/s)	Pérdida (m)
Expansión súbita en la zona de prueba	0,153	0,002	$3,130 \times 10^{-8}$	0,052	$2,116 \times 10^{-5}$
Contracción súbita en la zona de prueba	0,490	0,863	$1,862 \times 10^{-2}$	5,076	$6,441 \times 10^{-1}$
Expansión súbita en el estanque	0,642	0,863	$2,440 \times 10^{-2}$	5,076	$8,441 \times 10^{-1}$
Válvulas	6,460	0,863	1,227	5,076	$4,246 \times 10^1$
Codos y TEE	0,570	0,863	$3,899 \times 10^{-1}$	5,076	$1,349 \times 10^1$
Total de Pérdidas menores			1,660		57,437

4.3.4.2.3 Pérdidas Totales

Las pérdidas totales se calculan sumando las pérdidas mayores con las pérdidas menores, para las condiciones de operación, caudal normal y caudal máximo. Estas se resumen en la Tabla 4.22.

Tabla 4.22: Resumen de pérdidas totales.

Tipo de pérdida	Pérdida en caudal normal (m)	Pérdida en caudal máximo (m)
Pérdidas Mayores	1,566	1,660
Pérdidas Menores	8,240	57,437
Pérdidas Totales	9,806	59,097

4.3.4.3 Dimensionamiento del estanque

Para dimensionar el estanque se calcula el volumen que contienen las tuberías y la zona de prueba, aplicando un factor de seguridad por pérdidas de fluido ante posibles filtraciones en el sistema o evaporación del fluido.

En la Tabla 4.23 se muestra el volumen que contiene la zona de prueba y las tuberías.

Tabla 4.23: Volumen contenido en cada componente del LH.

Componente	Volumen contenido	Unidad
Zona de prueba	20	L
Tubería de succión	10,03	L
Tubería de descarga	32,53	L
Sub Total	62,56	L
Factor de seguridad	5	-
Total	312,8	L

4.3.4.4 Carga de la bomba

La carga de la bomba, ya sea en caudal nominal o en caudal máximo se muestra en la Tabla 4.24.

Tabla 4.24: Carga de la bomba.

	Caudal normal (m.c.a / kg/cm ²)	Caudal máximo (m.c.a / kg/cm ²)
Carga de bomba	8,3 / 0,83	57,6 / 5,8

Por otro lado en la Tabla 4.25 se muestra el cálculo del espesor de la tubería considerando las presiones de operación a caudal normal y máximo.

Tabla 4.25: Cálculo del espesor de la tubería.

Parámetro	Caudal normal	Caudal máximo	Unidad
Presión solicitada	0,118 / 1,203	0,107 / 1,091	MPa / kg/cm ²
Diámetro interior de la tubería	50,8	50,8	mm
Esfuerzo de fluencia	16 / 162	16 / 162	MPa / kg/cm ²
Espesor tubería	0,189	0,172	mm

4.3.4.5 Nivel de succión y carga estática de bombeo

El NPSH de la bomba y sus componentes se muestra en la Tabla 4.26. El NPSH_R de la bomba es 7 m.c.a en caudal normal y 8 m.c.a en caudal máximo [11], por lo tanto la bomba no presenta el fenómeno de cavitación en ninguna condición de operación

Tabla 4.26: Nivel de succión y carga estática de bombeo.

Parámetro	Valor con caudal normal (m.c.a)	Valor con caudal máximo (m.c.a)
Carga de presión estática en el fluido (h_{sp})	10,33	10,33
Diferencia de elevación (h_s)	2,8	2,8
Pérdida de carga en la tubería (h_f)	3,722	12,086
Carga de presión de vapor del líquido (h_{vp})	0,18	0,18
$NPSH_R$	7	9
$1,1 NPSH_R$	7,7	9,9
$NPSH_A$	13,17	11,60

4.3.4.6 Potencia requerida por el sistema hidráulico

La potencia necesaria para la circulación del fluido por el LH se presenta en la Tabla 4.27.

Tabla 4.27: Potencia requerida por el sistema.

	Caudal nominal	Caudal máximo	Unidad
Carga de bomba	8,3 / 0,83	57,6 / 5,8	m.c.a / kg/cm ²
Potencia hidráulica	333 / 0,5	5.802 / 7,8	W / HP

4.3.4.7 Cálculo de golpe de ariete

Los parámetros necesarios para calcular el golpe de ariete, junto con los valores que resultan del análisis de ellos, se muestran en la Tabla 4.28. El espesor de la pared de la tubería se calcula considerando la presión causada por el golpe de ariete y la presión de operación.

Tabla 4.28: Resultados del análisis de golpe de ariete.

	Caudal nominal	Caudal máximo	Unidad
Módulo de elasticidad del agua	2,16	2,16	GPa
Módulo de elasticidad de la tubería (PVC)	3,04	3,04	GPa
Diámetro interior de la tubería	50,8	50,8	mm
Espesor de la tubería	3,2	3,2	mm
Velocidad de propagación	134	134	m/s
Velocidad de circulación	2,03	5,1	m/s
Variación de velocidad	2,03	5,1	m/s
Variación de presión	0,27	0,7	MPa
Presión solicitada	0,118	0,11	MPa
Espesor que debe tener	0,625	1,3	mm
Tracción mínima requerida	3,10	6,4	MPa
Límite de fluencia de la tubería	15,857	15,9	MPa
Factor de seguridad	5,1	2,5	-

En consecuencia, con los valores ya calculados queda determinado hidráulicamente el LH.

4.3.5 Especificaciones técnicas la adquisición de los equipos del LH

En la Tabla 4.29 se muestra el detalle técnico de los equipos que se deben adquirir para el LH.

Tabla 4.29: Detalle técnico de los equipos que se deben adquirir.

Componente	Modelo	Característica
Estanque	Estándar vertical	3.400 L
Bomba centrífuga	40-160/4,0	5,5 HP (12 a 42) m ³ /h (38,5 a 25,5) m.c.a
Zona de prueba		
Perfil cuadrado	100x100x3 mm	Material: Acero inoxidable 304
Plancha	8x1000x1000 mm	Material: Acero inoxidable 304
Tubo	2"x1,5x1000 mm	Material: Acero inoxidable 304
Macizo	120x120x120 mm	Material: Acero inoxidable 304
Piping y fitting		
Tubería	50 mm 22 m	Material: PVC
Codos	50 mm	Material: PVC – Cantidad: 10
Tee	50 mm	Material: PVC – Cantidad: 10
Conexión Universal	50 mm	Material: PVC – Cantidad: 10
Brida DN 50	50 mm	Material: PVC – Cantidad: 3
Brida DN 65	65 mm	Material: PVC – Cantidad: 1
Instrumentación		
Variador de frecuencia	6 HP	3 fases 380 V
Válvula solenoide	2 vias hilo 2"	Temperatura máxima 80 °C
Bobinas	DINPLUG	24 VDC
Flujómetro totalizador	+/-2% FSD	0-300 PSI
Sensor PT100	-50+200°C	
Transmisor de presión	Diferencial	4-20 mA
Controlador PLC		12 entradas

Con el detalle técnico de la Tabla 4.29 se pueden hacer las cotizaciones correspondientes para calcular el estimado de inversiones del proyecto.

4.3.6 Estimado de inversiones para materializar el proyecto

En la Tabla 4.30 se muestra el estimado de inversiones para materializar el proyecto, luego de escoger los productos después de las cotizaciones respectivas.

Tabla 4.30: Estimado de inversión para materializar el proyecto.

Componente	Valor (\$)
Estanque estándar vertical 3.400 L	249.990
Bomba centrífuga Ebara 5,5 HP Modelo 40-160/4,0	960.000
Zona de prueba	
Perfil cuadrado 100x100x3 mm Acero Inoxidable 304	210.000
Plancha 8x1000x1000 mm Acero Inoxidable 304	190.000
Tubo 2"x1,5x1000 mm Acero Inoxidable 304	12.000
Macizo 120x120x120 mm Acero Inoxidable 304	65.000
Piping y fitting	300.000
Bridas	100.000
Instrumentación	
Variador de frecuencia 6 HP 3 fases 380 V	441.228
Válvula solenoide	594.464
Bobina DINPLUG para válvulas solenoides 24 VDC	35.380
Flujómetro totalizador	607.259
Sensor PT 100	38.292
Transmisor de presión diferencial 4-20 mA	132.249
Controlador PLC	124.475
Total	3.810.347

Finalmente el estimado total de inversión que se debe hacer para materializar el proyecto es de \$ 3.810.347.

5 Discusión

En esta sección se discuten los resultados obtenidos en cuanto a los siguientes aspectos:

- i) Diseño general y aplicabilidad del LH CCHEN desarrollado

El diseño general del LH CCHEN se elabora tomando en cuenta satisfacer los requerimientos principales solicitados: medición pérdida de carga y prueba de la estabilidad estructural del ECN de RECH-1.

El LH CCHEN tiene la capacidad hidráulica de caracterizar cualquier ECN diseñado para operar en un reactor tipo piscina de potencia de 10 MW, puesto que los caudales operacionales que el LH puede otorgar son superiores a los caudales de refrigeración típicos que experimenta un ECN de un reactor tipo piscina de 10 MW.

El LH CCHEN tiene un diseño flexible, ya que tiene la ventaja de poseer una zona de prueba intercambiable para la instalación de ECN de geometrías distintas. Es posible aumentar su capacidad de otorgar caudales máximos, puesto que la bomba puede ser cambiada o pueden ser agregadas más bombas en configuración paralela.

La adquisición y almacenamientos de datos del LH se hace de manera automática, por medio de un computador que permite la configuración de operación y adquisición de datos tomados por el LH.

En la Tabla 5.1 se muestra una comparación entre el LH diseñado y los LH revisados en la literatura técnica.

Tabla 5.1: Comparación de características principales del LH diseñado con los LH revisados.

Característica	LH CCHEN	LH IPEN [8]	LH Petten [7]	Unidad
Potencia del reactor	5	5	20	MW
Caudal máximo	34	25	200	m ³ /h
Tipo de pruebas	Hidráulicas	Hidráulicas	Termo-Hidráulicas	-
Instrumentación	Digital	Análoga	Análoga	-
Adquisición de datos	Automática	Manual	Manual	-
Tipo de flujo	Ascendente y descendente	Descendente	Descendente	-
Operación	Automática	Manual	Manual	-

Como se observa en la Tabla 5.1, el LH CCHEN tiene un caudal máximo mayor al LH de IPEN, aunque los ECN diseñados sean del mismo tipo (MTR) y para reactores de la misma potencia. Esto se diseña así a propósito para asegurar que el LH desarrollado en este trabajo es capaz de otorgar flujos máximos que ponen a prueba la estabilidad estructural del ECN del RECH-1. El LH no se diseña para caudales máximos superiores a 34 m³/h, puesto que por decisiones de negocio solo se considera en un comienzo abordar el nuevo diseño de ECN para reactores de 5 MW.

El LH CCHEN solo es capaz de hacer pruebas hidráulicas. Aunque en su diseño se consideran sensores de medición y adquisición de datos de temperatura, pensando en una posible adaptación futura de la zona de prueba; para simular intercambio de calor.

La instrumentación del LH CCHEN es completamente digital, puesto que de esta forma se puede gestionar de manera automática la medición y adquisición de datos. Mientras que en los LH

revisados [7] y [8] la medición es por instrumentos análogos y la adquisición de datos es manual. Esto causa imprecisión en la medición, ya que se añade el error por factor humano.

La operación del LH CCHEN es automática, además es capaz de generar flujo ascendente y descendente en la zona de prueba. En cambio, los LH revisados operan manualmente con altos tiempos de operación en las experiencias de pruebas, lo cual puede generar error en la configuración de los flujos de operación y baja eficiencia en el uso de energía; ya que el control de los caudales de operación se hace por contracción del flujo del LH a través de válvulas de accionamiento manual. Por otro lado los LH revisados son incapaces de desarrollar flujo ascendente en la zona de prueba, limitando la cantidad de información que se puede adquirir sobre el comportamiento hidráulico de los ECN y también limitan la capacidad de negocio; ya que recientemente existen reactores que operan con flujo ascendente.

ii) Análisis de componentes que son críticos para la operación

a) Zona de Prueba

Se considera que el diseño de la zona de prueba es representativo en cuanto a la disposición espacial y geométrica del entorno que presenta un ECN en el núcleo del reactor RECH-1, puesto que el patrón hidráulicamente representativo de un ECN en el núcleo del RECH-1 es un ECN inscrito en un perímetro cuadrado de canales de refrigeración, condición que se satisface plenamente en la zona de prueba.

La zona de prueba presenta unas ventanillas que permiten la visualización del interior de la misma. En su interior se tiene una caja de acrílico transparente que sella herméticamente la zona central. Esta última es una sección crítica en cuanto a fugas de agua, por lo mismo es de importancia mantener el sellado correspondiente para evitarlas. Esto se consigue con un ensamble adecuado y con un posterior sellado de la zona central con las zonas externas de la zona de prueba, a través de las bridas que tienen O'ring. Si existe fuga, se debe revisar el sellado y cambiar los O'ring. Dependiendo de nivel de la fuga, puede provocar un mal funcionamiento del LH. Si la fuga es reducida solo se pierde agua que puede ser recuperada manteniendo el nivel constante del estanque. Si la fuga es considerable el LH no funciona adecuadamente.

b) Bomba

La bomba del LH CCHEN está calculada para responder a los caudales operacionales del sistema. Si la bomba no es capaz de cumplir con lo solicitado, el sistema está diseñado para solucionar fácilmente el inconveniente por medio de dos caminos. Uno es simplemente cambiar la bomba por una de mayor capacidad. La otra forma es implementar una segunda bomba de igual capacidad conectándose paralelamente con la bomba anterior. De estas dos formas se puede aumentar la capacidad del sistema.

c) Instrumentación y adquisición de datos

El sistema de instrumentación y adquisición de datos del LH CCHEN está diseñado para medir y registrar los parámetros deseados, pérdida de carga del ECN, temperatura y caudal. Así, también controla la configuración del funcionamiento y la adquisición de los datos por medio de un PLC y un ordenador portátil que hace de interfaz entre el operador y el sistema.

El sistema de control es una de las grandes diferencias que tiene el LH CCHEN en comparación con los LH revisados en la literatura, puesto que posee un variador de frecuencia que controla la

velocidad de rotación de la bomba y en consecuencia controla el caudal que entrega al sistema. Esto se verifica con un flujómetro que registra el caudal circulante por la zona de prueba a determinada revolución del impulsor de la bomba. La configuración de flujo ascendente y descendente se hace por medio de electro-válvulas controladas por el PLC. Adicionalmente entre cada electro-válvula existen válvulas de bolas, de accionamiento manual. Éstas se han dispuesto para hacer efectivo el mantenimiento de las electroválvulas y, también, hacen posible la selección del flujo (ascendente y descendente) cuando el sistema de electro-válvulas falla.

Si algunos de los instrumentos de medición no fuesen los adecuados, lamentablemente no registrarían correctamente las mediciones de los parámetros deseados. Para verificar que los instrumentos de medición están funcionando efectivamente se deben efectuar mediciones de calibración con la zona de prueba sin ECN.

6 Conclusiones

Sobre la base de todos los resultados obtenidos en el proyecto, incluyendo memorias, planos y especificaciones; se deducen las siguientes conclusiones:

- a) La ingeniería conceptual del LH permite identificar los tres componentes fundamentales del LH: estanque, bomba centrífuga y zona de prueba. Por otro lado, la ubicación definitiva es en la planta de tratamiento de agua; ubicada al costado norte de la PEC, ya que presenta las condiciones idóneas para la instalación del sistema: fuente de agua, sistema de purificación, conexión de corriente trifásica y la infraestructura correspondiente para asegurar el cuidado del sistema ante las condiciones climáticas del emplazamiento.

Se reconoce la instrumentación de medición y control que debe tener el LH según los requerimientos del sistema.

Se definen las condiciones operacionales del sistema con un criterio de diseño que sobrestima las condiciones operacionales habituales del elemento combustible nuclear.

La filosofía de control considera la seguridad del LH y del usuario, haciendo imposible la partida del sistema mientras no existan las condiciones adecuadas de funcionamiento: nivel del estanque, configuración adecuada de válvulas y condiciones externas de seguridad para el usuario. Además, la gestión de los datos registrados por los instrumentos de medición se hace de manera automática proporcionando una base de datos al final de cada experiencia realizada.

- b) La ingeniería básica del LH comprende el Layout, la dotación de equipos y el desarrollo de las formas de calcular las pérdidas de carga mayores y menores del sistema de piping y de los componentes del LH. La pérdida de carga máxima o de diseño del LH es de 9,8 m.c.a.

Se define el cálculo de la carga que debería ser capaz de realizar la bomba y, además se analiza el efecto de golpe de ariete que puede acontecer en las tuberías.

Por otro lado, se concluye que la mejor manera de dar versatilidad al LH es diseñar una zona de prueba con una zona central intercambiable; con el objetivo de que cada zona central tenga la configuración adecuada para la instalación del componente que se quiere ensayar. Para este proyecto se diseña la zona central adecuada para la instalación de un elemento combustible nuclear RECH-1.

- c) La ingeniería de detalle del LH comprende la instrumentación, las especificaciones técnicas de adquisición y el desarrollo de los planos de fabricación, construcción y montaje de la zona de prueba. El piping diseñado tiene una extensión de 21 m y es de PVC de 50 mm de diámetro y 2 mm de espesor. La bomba requerida por el LH es de 5,5 HP de potencia y puede operar entre 12 y 42 m³/h. La instrumentación considera: 04 electro-válvulas, 03 PT100, 01 transductor de presión, 01 flujómetro, 01 variador de frecuencia y 01 PLC.

Se debe invertir unos \$ 3.810.247 en equipos y componentes para materializar el proyecto del LH.

El diseño propuesto tiene capacidad para cumplir con los requerimientos solicitados, siendo capaz de medir pérdidas de carga del elemento combustible nuclear RECH-1 y registrar los datos de pérdidas de carga en función del caudal. Un factor distintivo de diseño es la posibilidad de hacer circular flujo ascendente y descendente por la zona de prueba.

Recomendaciones al momento de montar el ECN en la zona de prueba. Se recomienda que se ejecute con sumo cuidado pues es muy importante ensamblar correctamente la zona de prueba al sistema para evitar posibles fugas o registros de mediciones incorrectas.

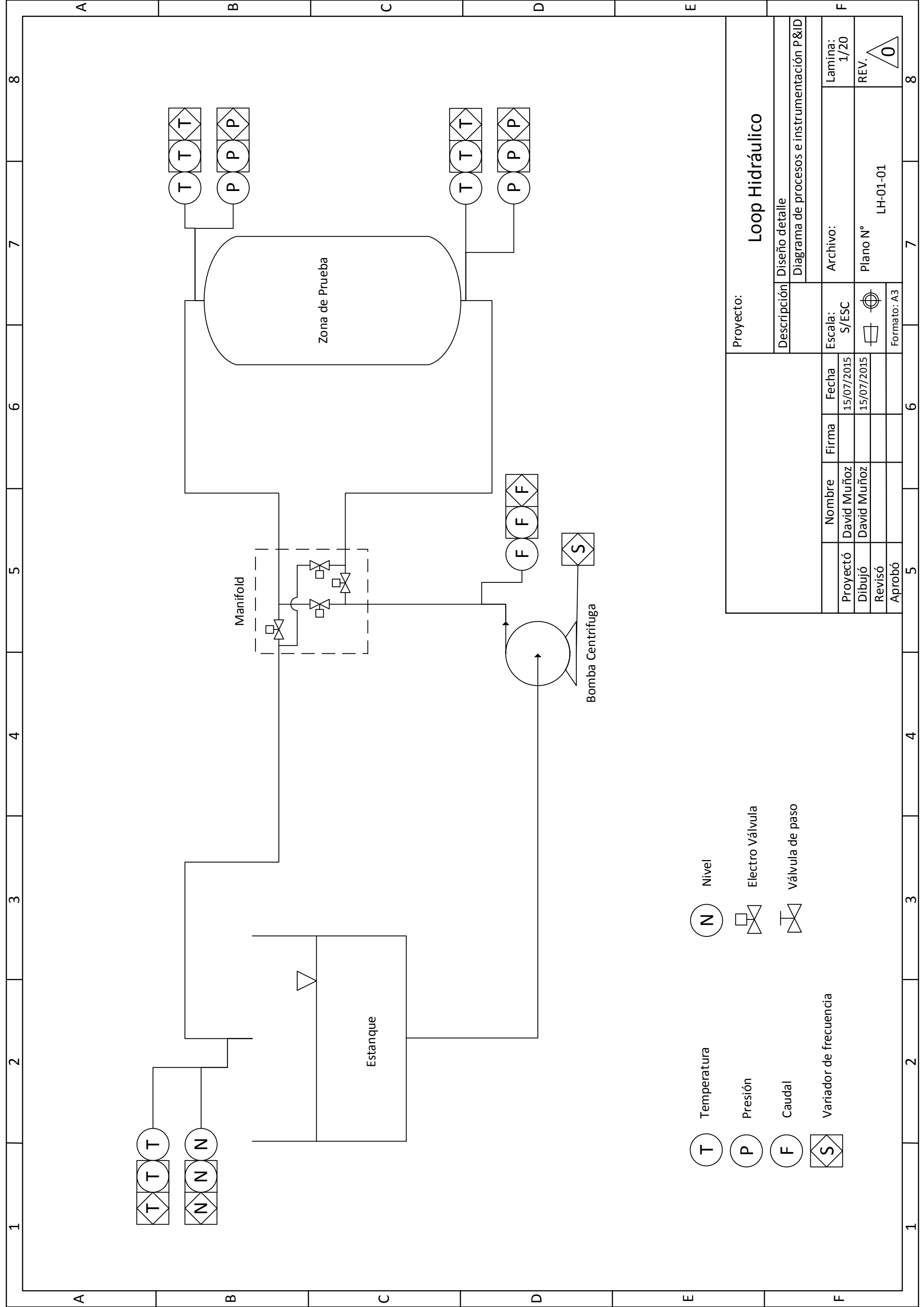
Si se quiere aumentar la capacidad el LH se recomienda recalcular las condiciones de presión para asegurar que el sistema permite el aumento de capacidad en cuanto a un aumento de caudal y así no causar fallas de la tubería o filtraciones por exceso de presión.

Si se desea hacer experiencias con intercambio térmico, el fluido que se encuentra transitoriamente en la zona de prueba no puede alcanzar una temperatura superior a 80°C; pues es la temperatura máxima de exposición de las electro-válvulas. Por otro lado, si se quiere asegurar que la temperatura de agua a la entrada de la zona de prueba sea a temperatura ambiente se debe calcular el nuevo contenido de agua en el estanque, puede que se deba aumentar el nivel de agua en el estanque, ya que de lo contrario es posible que la temperatura del agua a la entrada de la zona de prueba no sea la ambiente causando un error en la medición de intercambio térmico y el calentamiento del agua del estanque. Ante lo anterior no hay problema con el estanque, puesto que este tiene una capacidad sobrestimada con respecto a la cantidad de fluido que se utiliza para hacer las pruebas hidráulicas.

7 Bibliografía

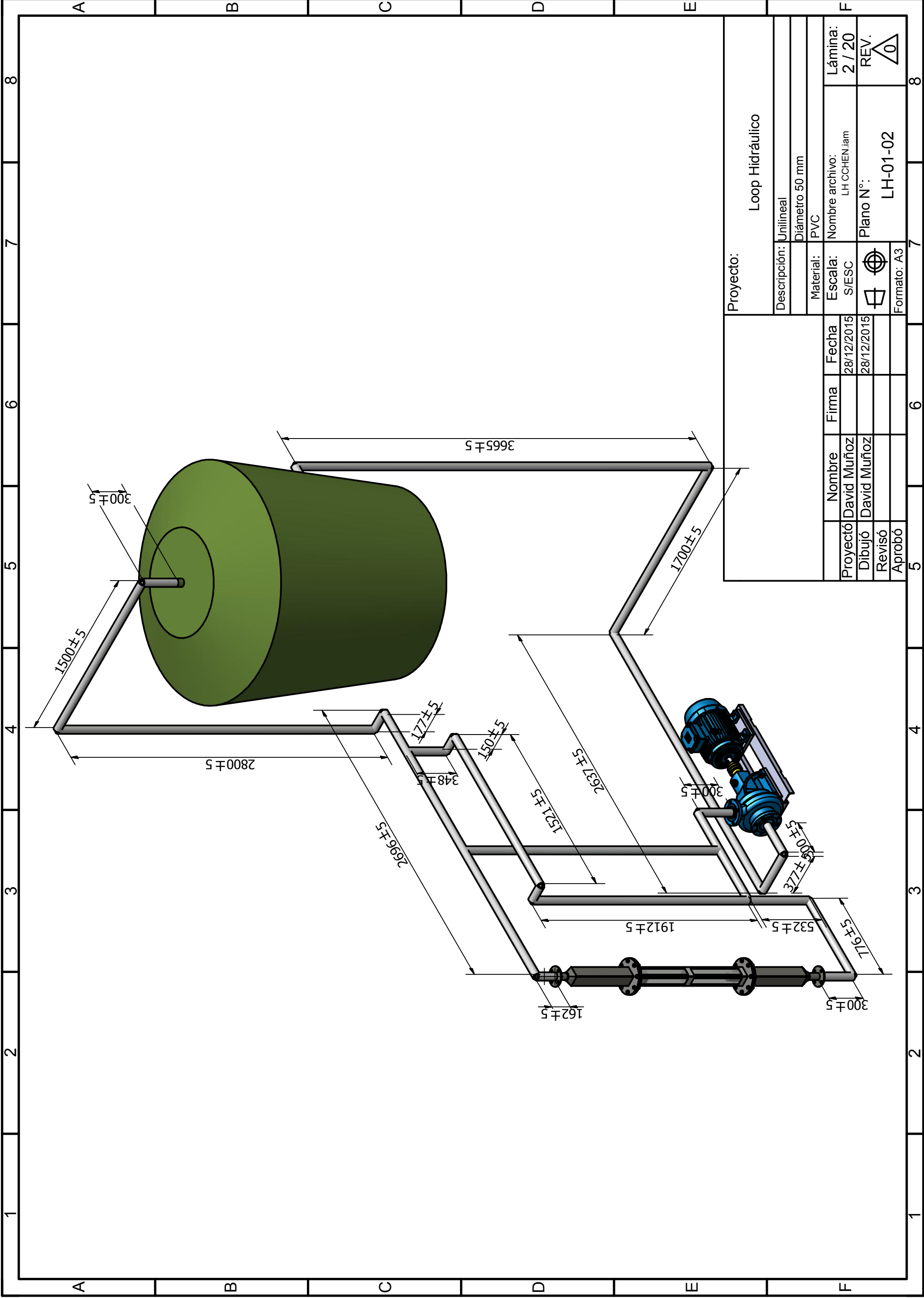
- [1] Foro Nuclear, «Foro Nuclear,» [En línea]. Available: http://www.foronuclear.org/en/press-room/photo-archives/foto-gallery/fuel/medicion-espacio-barras-combustible_1-246. [Último acceso: 2 Mayo 2015].
- [2] Foro Nuclear, «Foro Nuclear,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.foronuclear.org/es/energía-nuclear/energía-nuclear-en-el-mundo>. [Último acceso: 25 Abril 2015].
- [3] World Nuclear Association, «World Nuclear Association,» [En línea]. Available: <http://world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Power-Reactors/Nuclear-Power-Reactors/>. [Último acceso: 2015 Abril 30].
- [4] International Atomic Energy Agency, «IAEA,» International Atomic Energy Agency, 2013. [En línea]. Available: <https://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/Technical-Areas/RRS/home.html>. [Último acceso: 27 Abril 2015].
- [5] J. Daie, J. Medel, H. Torres, D. Calderón, L. Iturrieta, M. Loncomilla y J. Zamorano, «Descripción del reactor RECH-1,» CCHEN, Santiago, 2014.
- [6] G. Torres, H. Torres y A. Rocha, «Descripción del reactor RECH-2,» CCHEN, Santiago, 1988.
- [7] M. Kranenburg, «Hydraulic test loop for fuel element,» HFR, Petten, 2002.
- [8] W. Torres, P. Umbehaun, A. Andrade y A. Souza, «A MTR fuel element flow distribution measurement preliminary results,» IPEN, Sao Paulo, 2001.
- [9] ASME, ASME Boiler and Pressure Vessel Code VIII Division 1 Rules for Construction of Pressure Vessels, New York: ASME, 2010.
- [10] R. Mott, Mecánica de fluidos, México: Pearson Educación, 2006.
- [11] EBARA, «Bombas centrifugas normalizadas en acero inoxidable 304 y 316 L,» EBARA, Madrid, 2006.

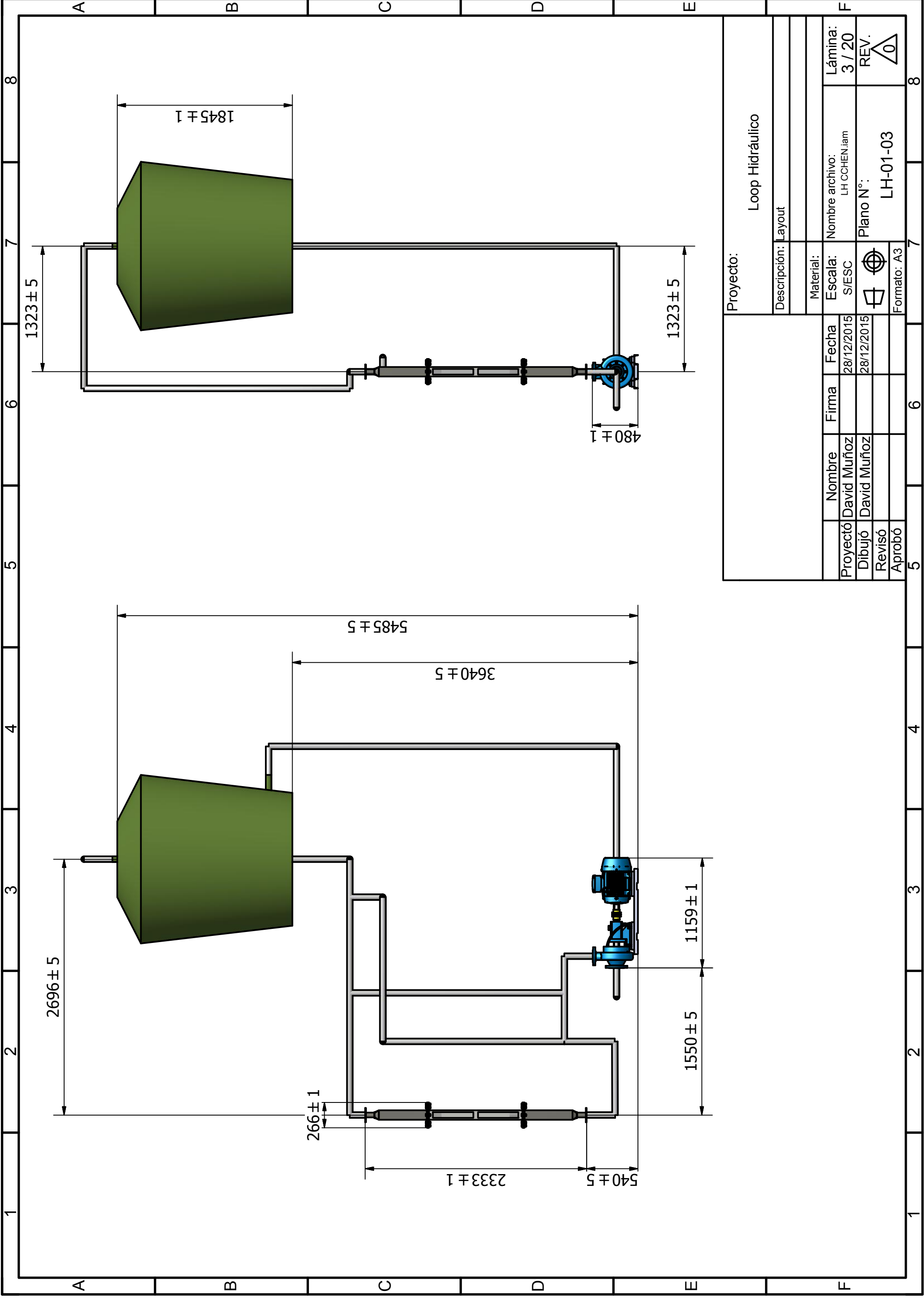
8 Anexo: Planos del LH



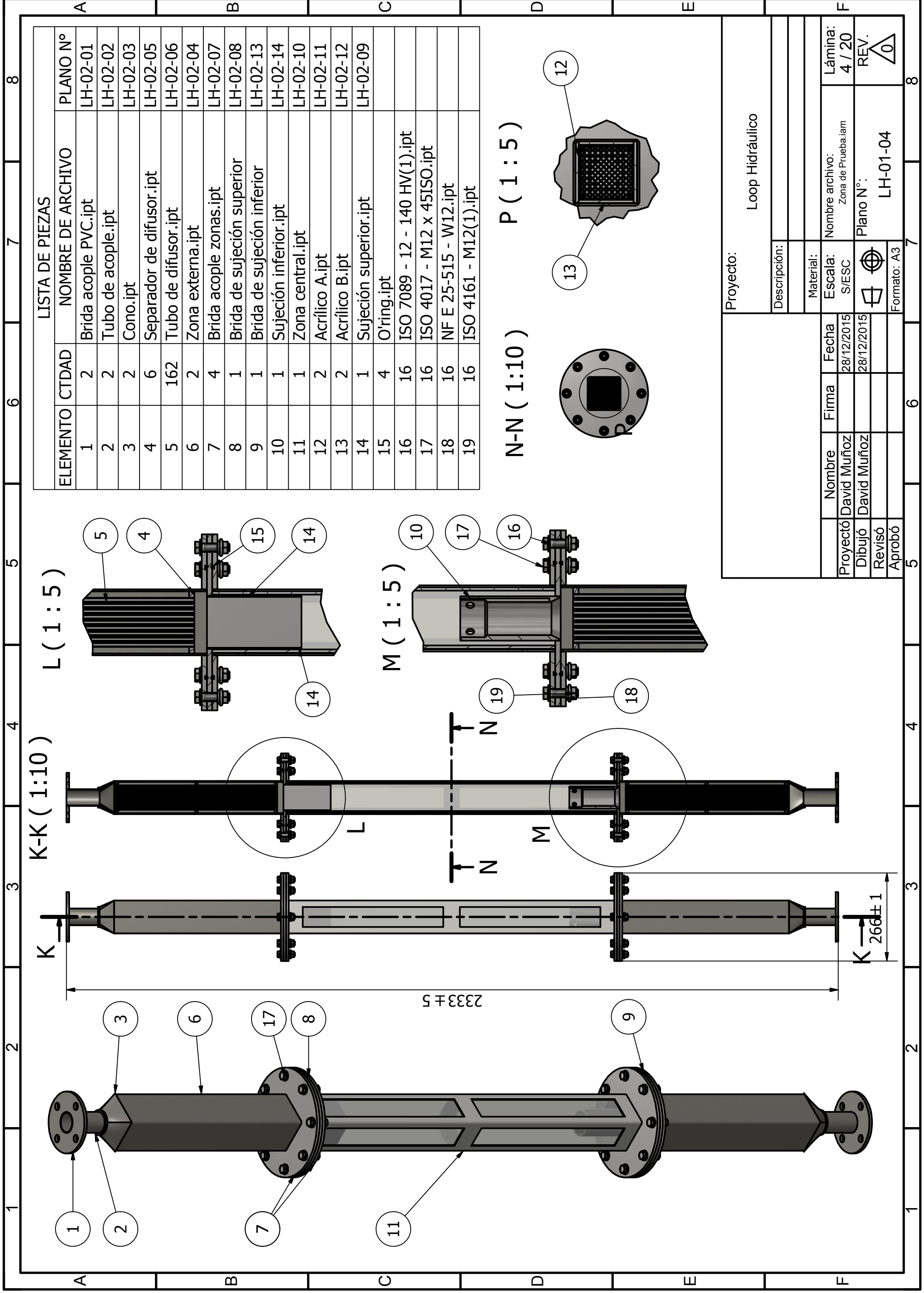
- T Temperatura
- P Presión
- F Caudal
- N Nivel
- S Variador de frecuencia
- Electro Válvula
- Válvula de paso

Proyecto:		Loop Hidráulico			
Descripción	Diagrama de procesos e instrumentación P&ID				
Nombre	Firma	Fecha	Archivo:	Lamina:	
Proyectó	David Muñoz	15/07/2015	S/ESC	1/20	
Dibujó	David Muñoz	15/07/2015	Plano N°	REV.	0
Revisó			Formato: A3		
Aprobó					





Proyecto:		Loop Hidráulico			
Descripción:		Layout			
Material:					
Proyectó	Nombre	Firma	Fecha	Lámina:	
Dibujó	David Muñoz		28/12/2015	Nombre archivo:	LH_CCHEN.iam
Revisó	David Muñoz		28/12/2015	Escala:	S/ESC
Aprobó				Formato:	A3
				Plano N°:	LH-01-03
				REV.	0



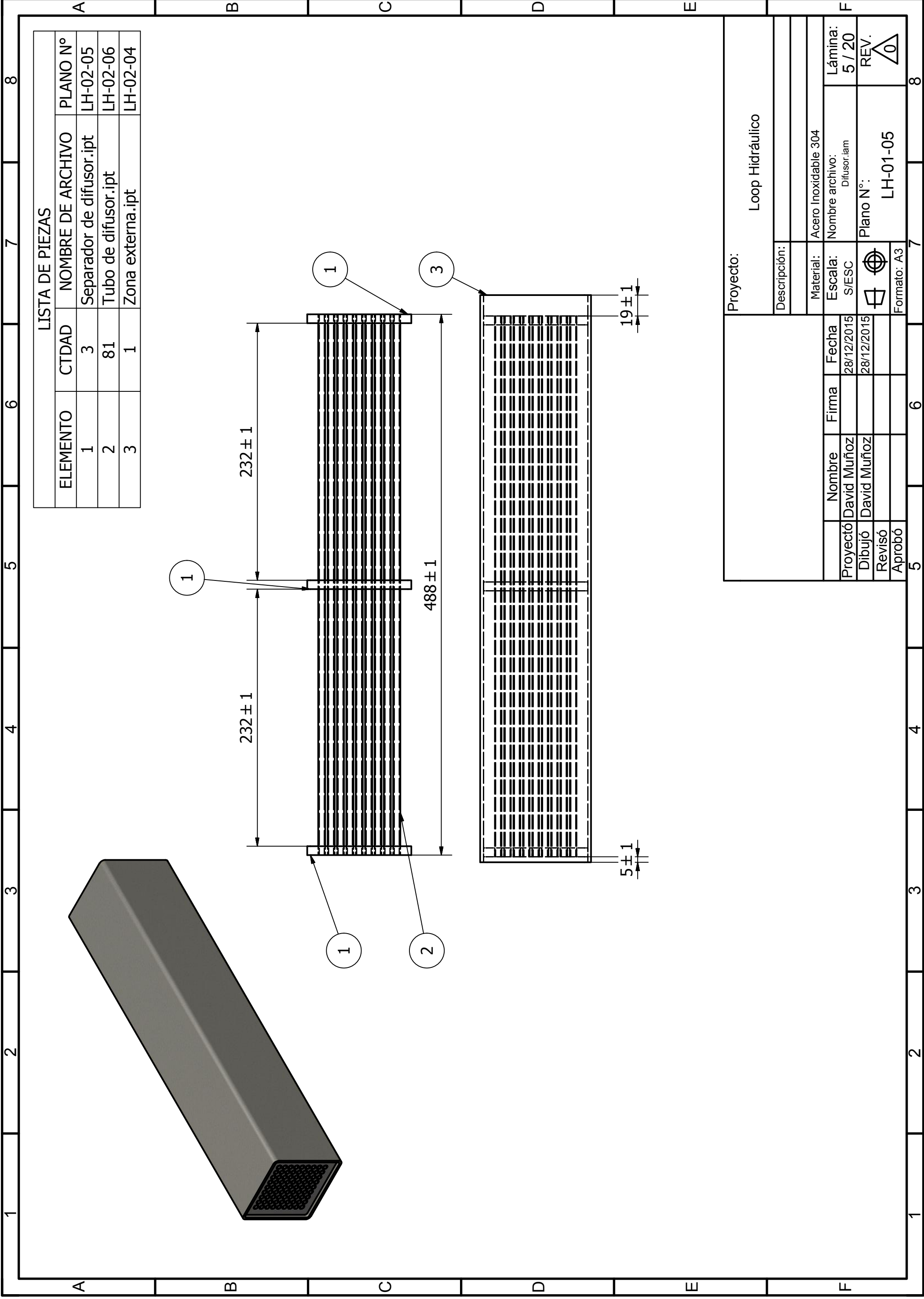
LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	NOMBRE DE ARCHIVO	PLANO N°
1	2	Brida acople PVC.ipt	LH-02-01
2	2	Tubo de acople.ipt	LH-02-02
3	2	Cono.ipt	LH-02-03
4	6	Separador de difusor.ipt	LH-02-05
5	162	Tubo de difusor.ipt	LH-02-06
6	2	Zona externa.ipt	LH-02-04
7	4	Brida acople zonas.ipt	LH-02-07
8	1	Brida de sujeción superior	LH-02-08
9	1	Brida de sujeción inferior	LH-02-13
10	1	Sujeción inferior.ipt	LH-02-14
11	1	Zona central.ipt	LH-02-10
12	2	Acrílico A.ipt	LH-02-11
13	2	Acrílico B.ipt	LH-02-12
14	1	Sujeción superior.ipt	LH-02-09
15	4	O'ring.ipt	
16	16	ISO 7089 - 12 - 140 HV(1).ipt	
17	16	ISO 4017 - M12 x 45ISO.ipt	
18	16	NF E 25-515 - W12.ipt	
19	16	ISO 4161 - M12(1).ipt	

N-N (1:10)

P (1 : 5)

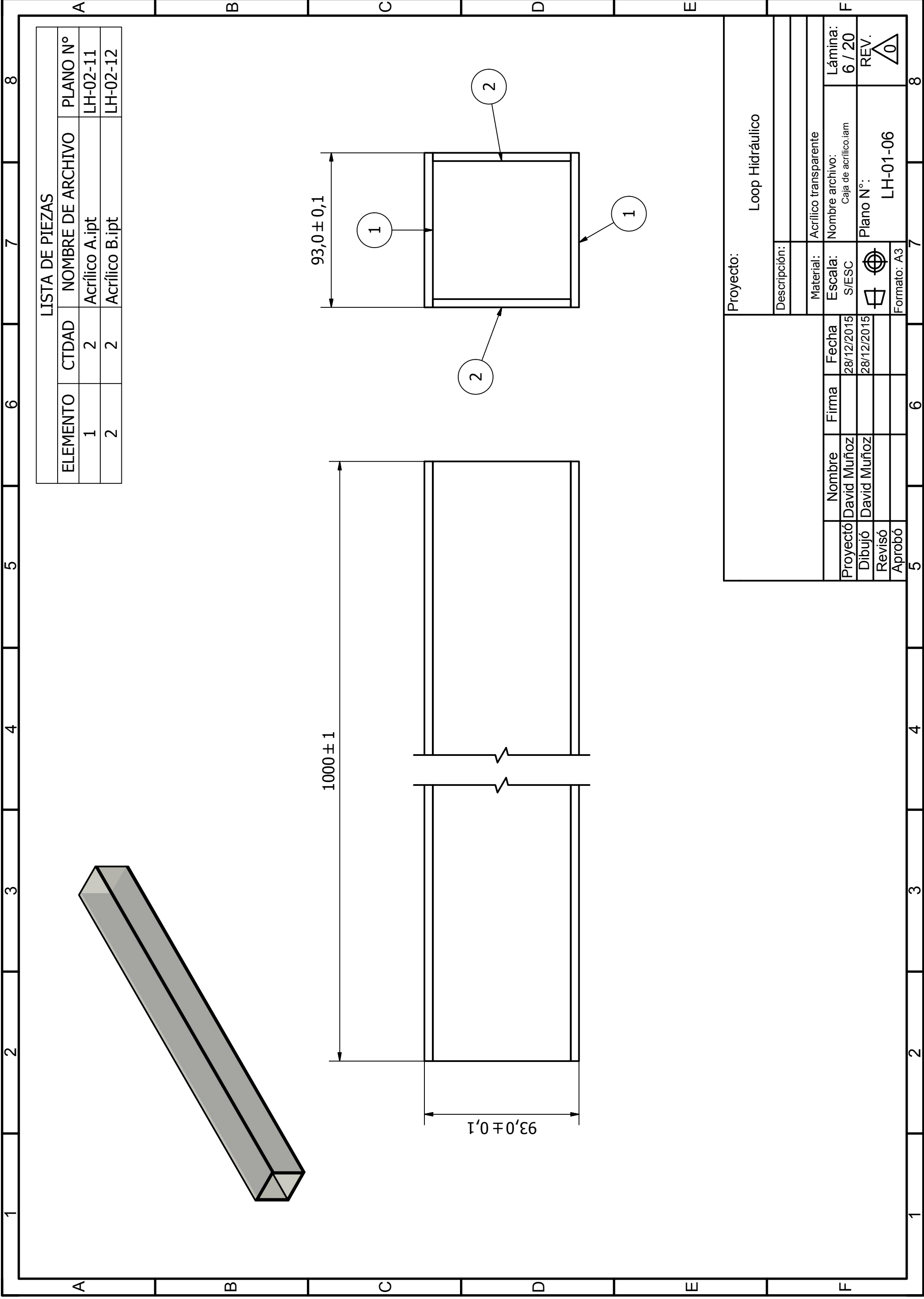
Proyecto:		Loop Hidráulico	
Descripción:			
Material:			
Nombre	Firma	Fecha	Escala:
Proyectó David Muñoz		28/12/2015	S/ESC
Dibujó David Muñoz		28/12/2015	
Revisó			
Aprobó			
Formato: A3		Lámina: 4 / 20	
Nombre archivo: Zona de Pruebas.iam		Plano N°: REV.	
LH-01-04			



LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	NOMBRE DE ARCHIVO	PLANO N°
1	3	Separador de difusor.ipt	LH-02-05
2	81	Tubo de difusor.ipt	LH-02-06
3	1	Zona externa.ipt	LH-02-04

Proyecto:		Loop Hidráulico	
Descripción:			
Material: Acero Inoxidable 304			
Proyectó		Nombre archivo:	
Dibujó		Difusor.lam	
Revisó		Plano N°:	
Aprobó		LH-01-05	
Escala:		Lámina:	
S/ESC		5 / 20	
Formato: A3		REV.	
Fecha		0	
28/12/2015			
28/12/2015			



LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	NOMBRE DE ARCHIVO	PLANO N°
1	2	Acrílico A.ipt	LH-02-11
2	2	Acrílico B.ipt	LH-02-12

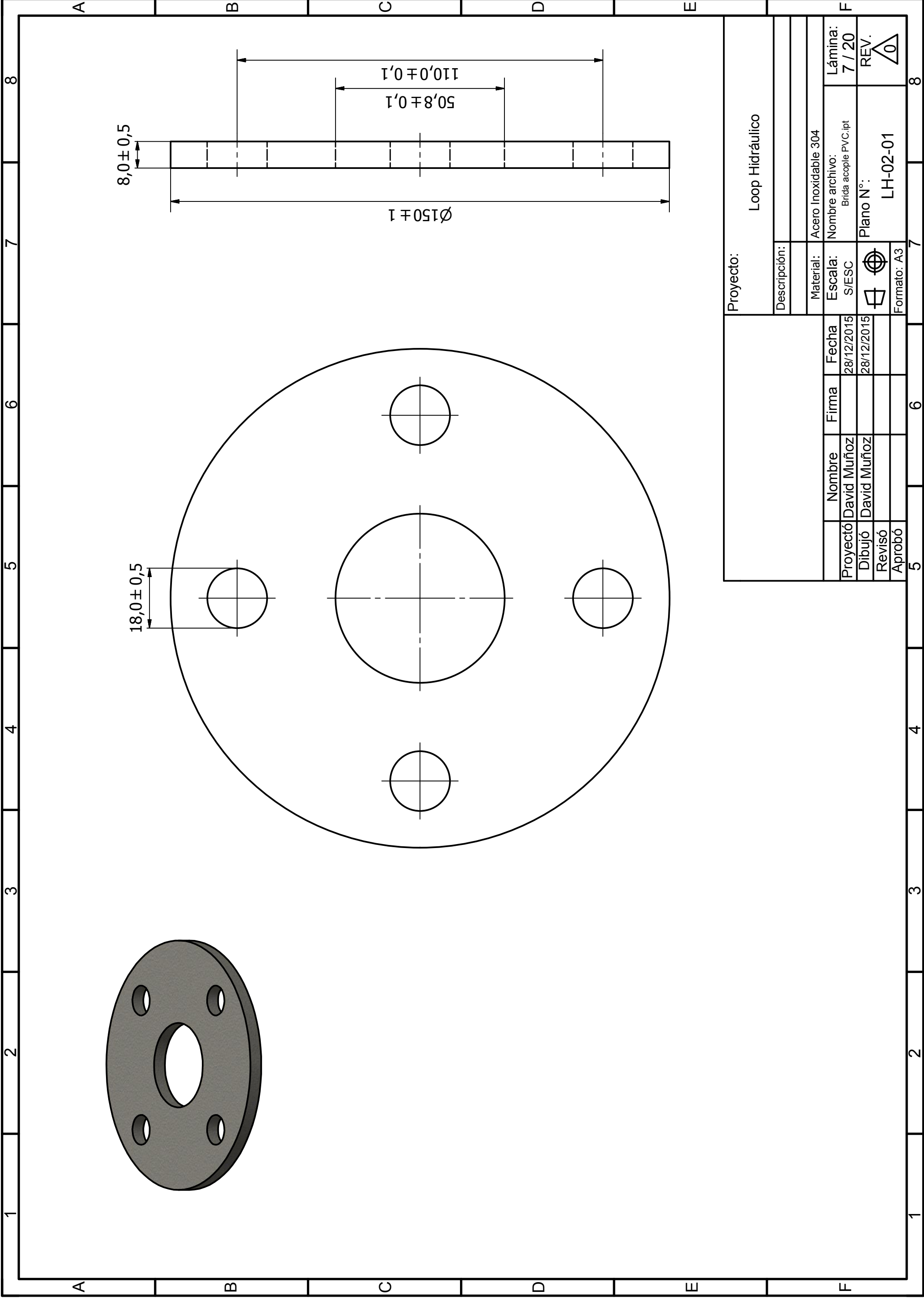
Proyecto:		Loop Hidráulico	
Descripción:			
Material: Acrílico transparente			
Escala: S/ESC		Nombre archivo: Caja de acrílico.iam	
Formato: A3		Lámina: 6 / 20	
Proyectó: David Muñoz		Piano N°: LH-01-06	
Dibujó: David Muñoz		REV.	
Revisó:			
Aprobó:			
Fecha: 28/12/2015			
Firma:			
Nombre: David Muñoz			

1 2 3 4 5 6 7 8

A B C D E F

1 2 3 4 5 6 7 8

A B C D E F

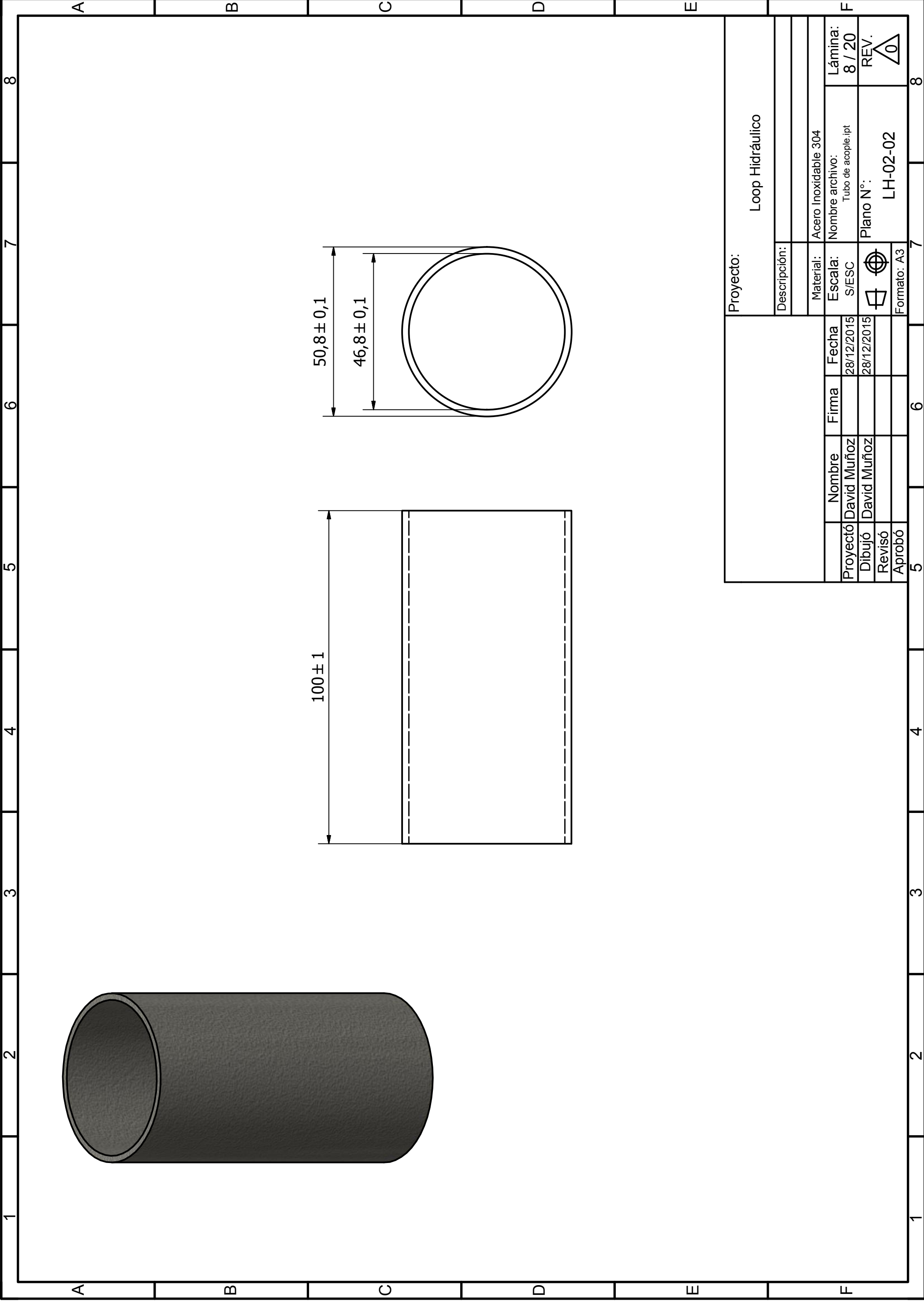


Proyecto:		Loop Hidráulico			
Descripción:					
Material:		Acero Inoxidable 304			
Escala:		S/ESC			
Nombre archivo:		Brida acople PVC.ipt			
Lámina:		7 / 20			
Piano N°:		REV.			
Formato:		A3			
Proyectó		Nombre		Fecha	
David Muñoz		David Muñoz		28/12/2015	
Dibujó		David Muñoz		28/12/2015	
Revisó					
Aprobó					

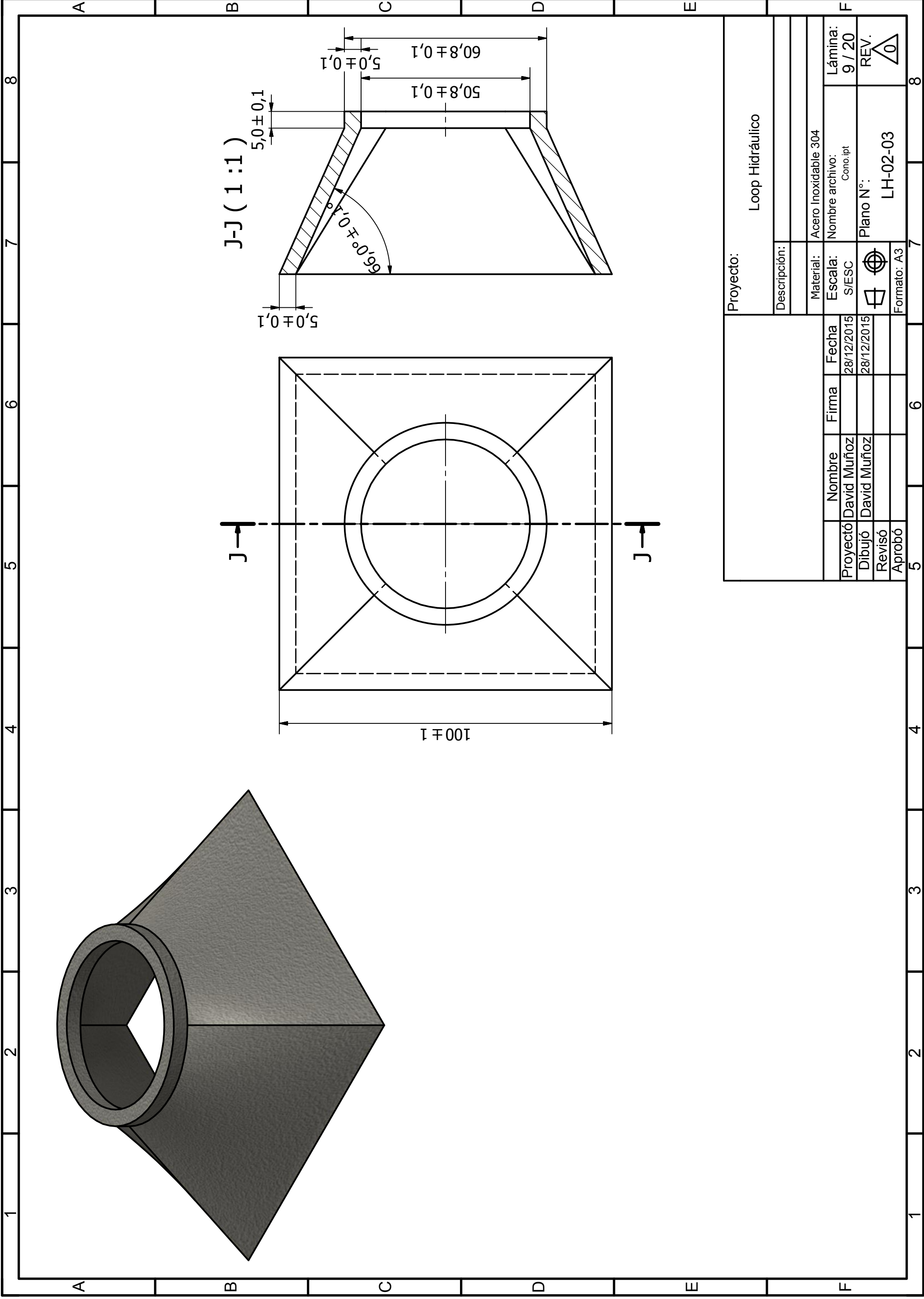
1 2 3 4 5 6 7 8

A B C D E

1 2 3 4 5 6 7 8

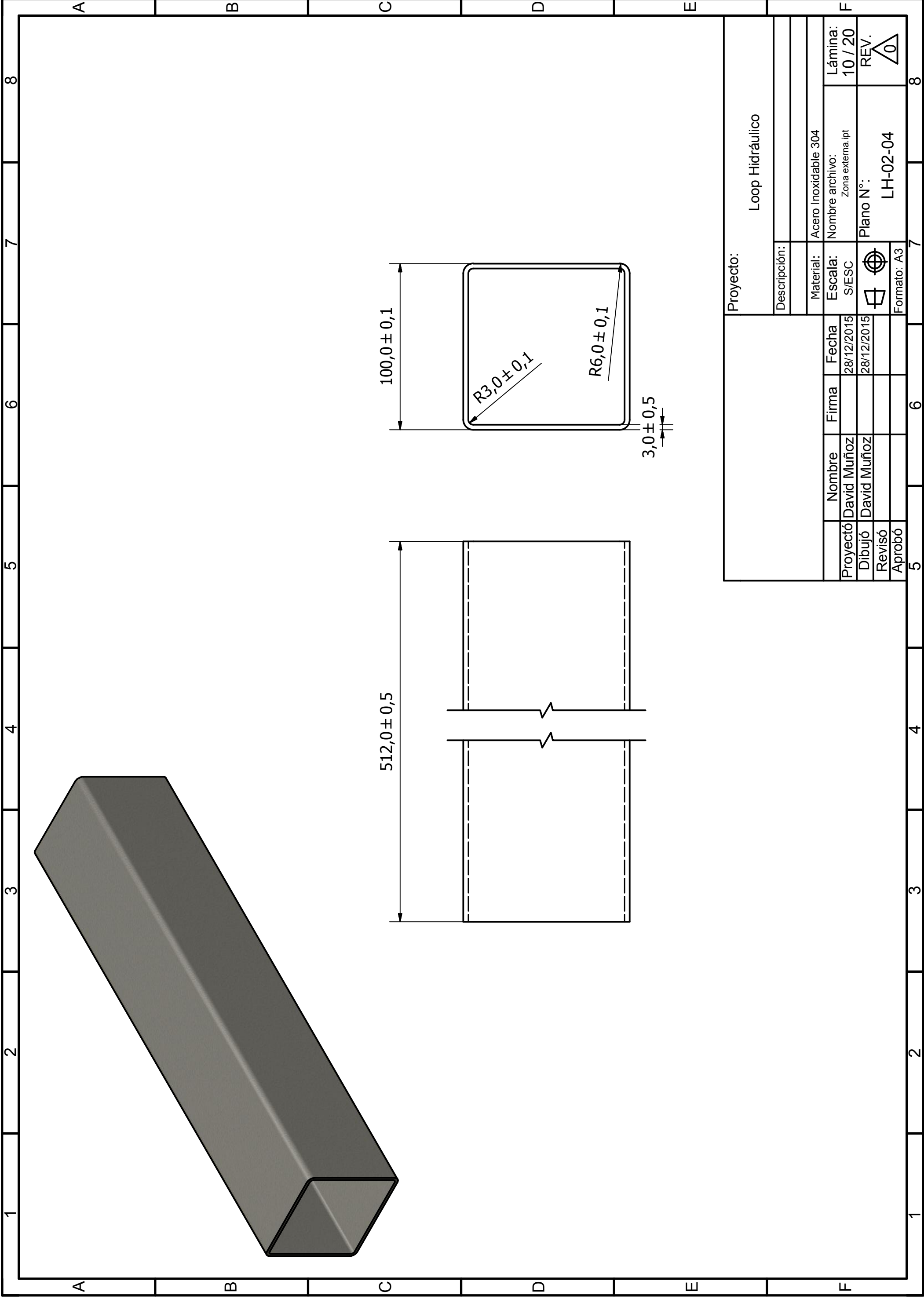


Proyecto:		Loop Hidráulico			
Descripción:					
Material:		Acero Inoxidable 304			
Escala:		S/ESC			
Nombre archivo:		Tubo de acople.ipt			
Lámina:		8 / 20			
Plano N°:		LH-02-02			
Formato:		A3		REV. 0	
Proyectó	Nombre	Firma	Fecha		
Dibujó	David Muñoz		28/12/2015		
Revisó	David Muñoz		28/12/2015		
Aprobó					

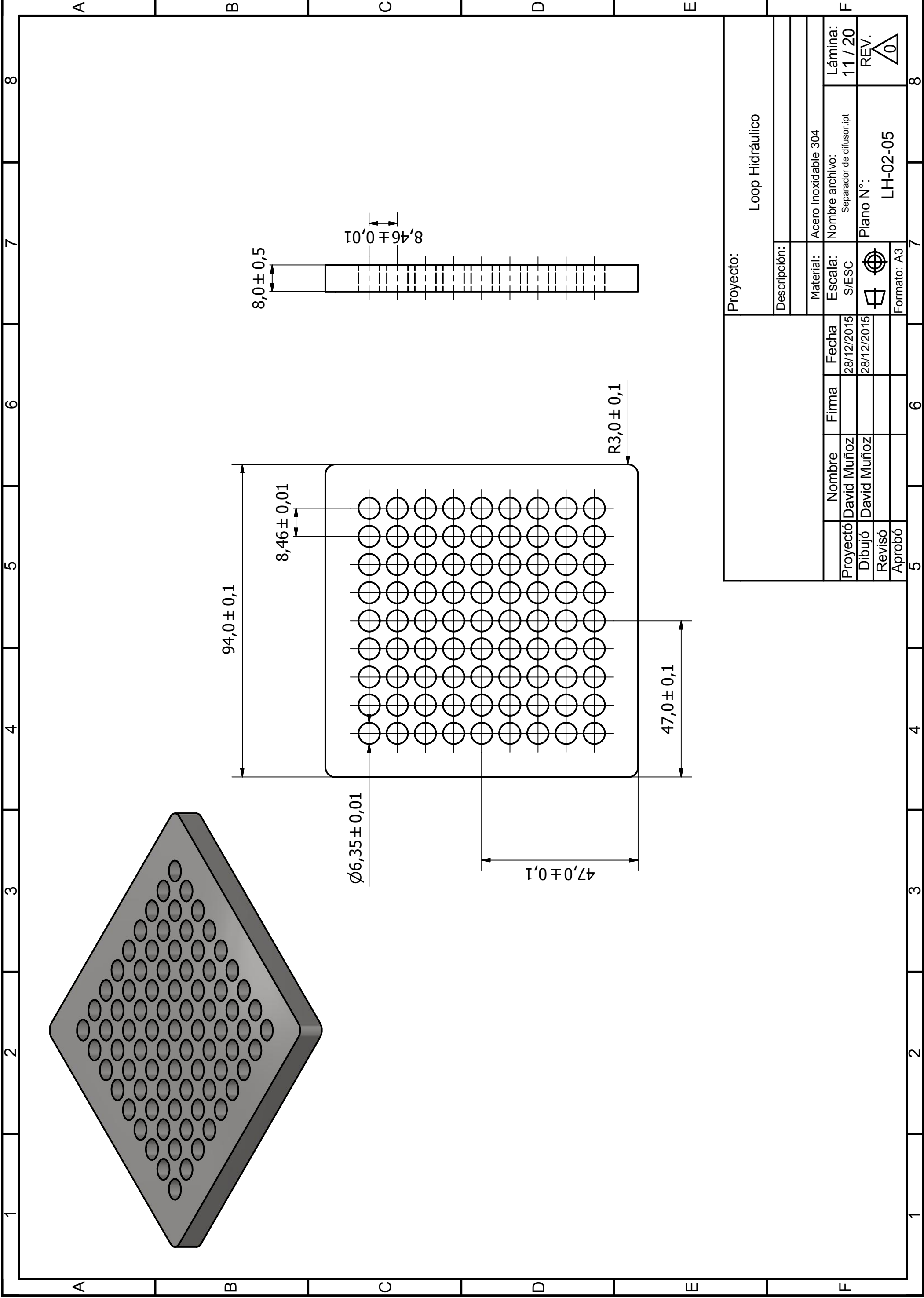


Proyecto:		Loop Hidráulico			
Descripción:					
Material:		Acero Inoxidable 304			
Escala:		S/ESC			
Nombre archivo:		Cono.ipt			
Lámina:		9 / 20			
Plano N°:		LH-02-03			
Formato:		A3			
Proyectó	Nombre	Firma	Fecha		
Dibujó	David Muñoz		28/12/2015		
Revisó	David Muñoz		28/12/2015		
Aprobó					

REV.

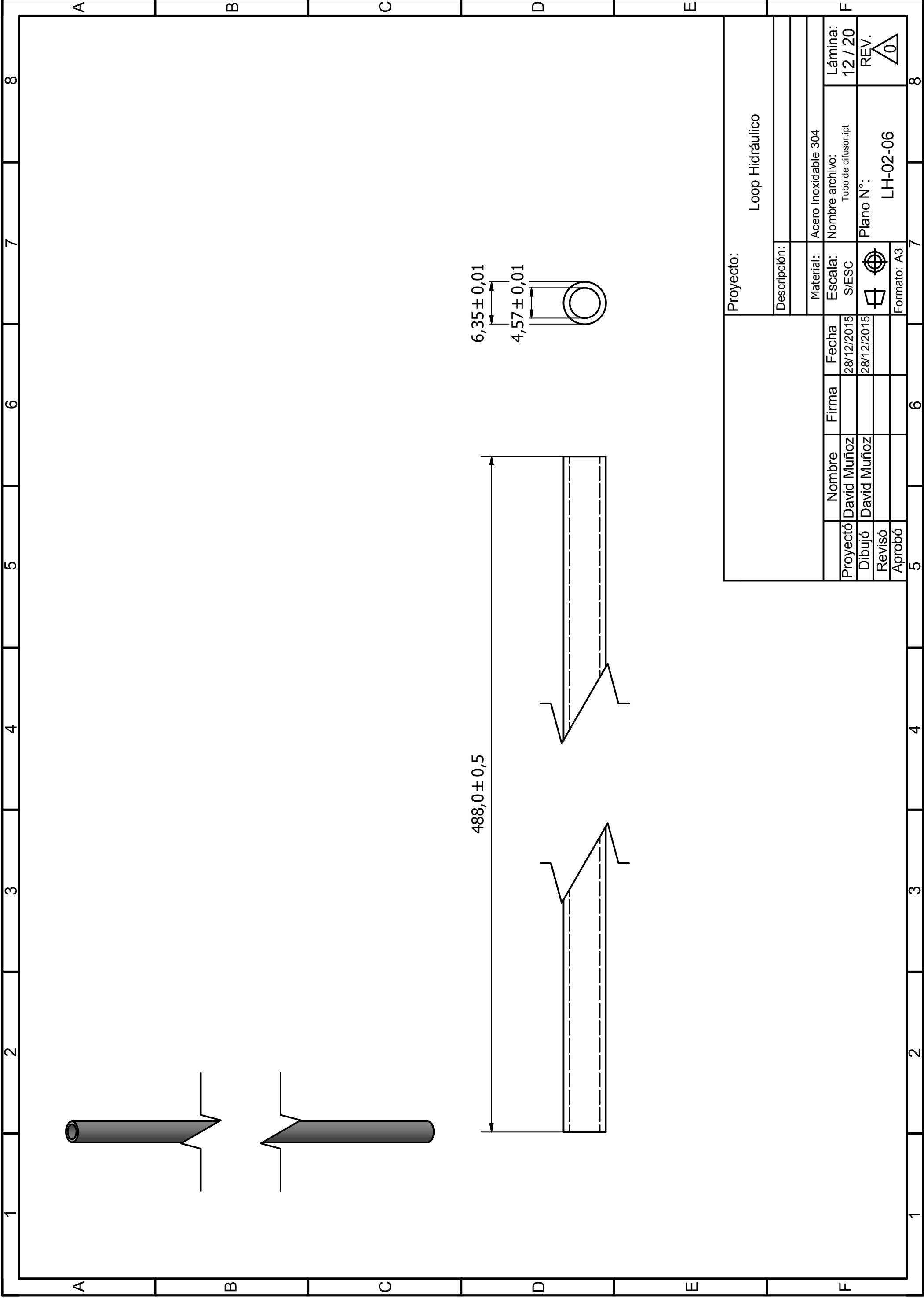


Proyecto:		Loop Hidráulico			
Descripción:					
Material:		Acero Inoxidable 304			
Escala:		S/ESC			
Nombre archivo:		Zona externa.ipt			
Lámina:		10 / 20			
Plano N°:		REV.			
Formato:		A3		LH-02-04	
Proyectó	Nombre	Firma	Fecha		
Dibujó	David Muñoz		28/12/2015		
Revisó	David Muñoz		28/12/2015		
Aprobó					



Proyecto:		Loop Hidráulico			
Descripción:					
Material:		Acero Inoxidable 304			
Escala:		S/ESC			
Nombre archivo:		Separador de difusor.ipt			
Lámina:		11 / 20			
Plano N°:		REV. 0			
Formato:		A3			
Nombre:		David Muñoz			
Firma:					
Fecha:		28/12/2015			
Proyectó:		David Muñoz			
Dibujó:		David Muñoz			
Revisó:					
Aprobó:					

1 2 3 4 5 6 7 8
 A B C D E F



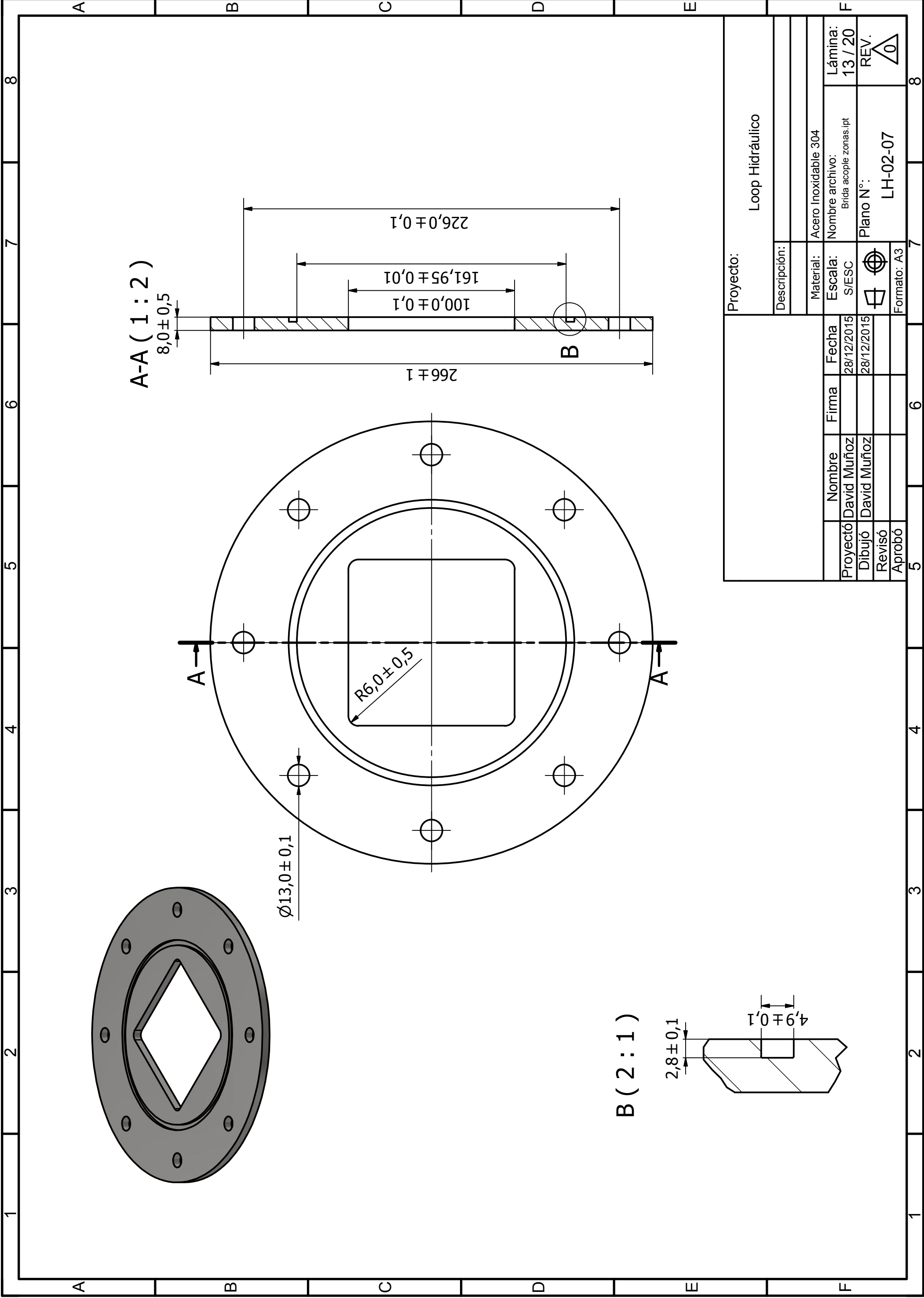
$6,35 \pm 0,01$
 $4,57 \pm 0,01$

$488,0 \pm 0,5$

Proyecto:		Loop Hidráulico			
Descripción:					
Material:		Acero Inoxidable 304			
Escala:		S/ESC			
Nombre archivo:		Tubo de difusor.ipt			
Lámina:		12 / 20			
Plano N°:		REV.			
Formato:		A3			
Proyectó	Nombre	Firma	Fecha		
Dibujó	David Muñoz		28/12/2015		
Revisó	David Muñoz		28/12/2015		
Aprobó					

1 2 3 4 5 6 7 8

A B C D E F



A-A (1:2)

8,0±0,5

226,0±0,1

161,95±0,01

100,0±0,1

266±1

R6,0±0,5

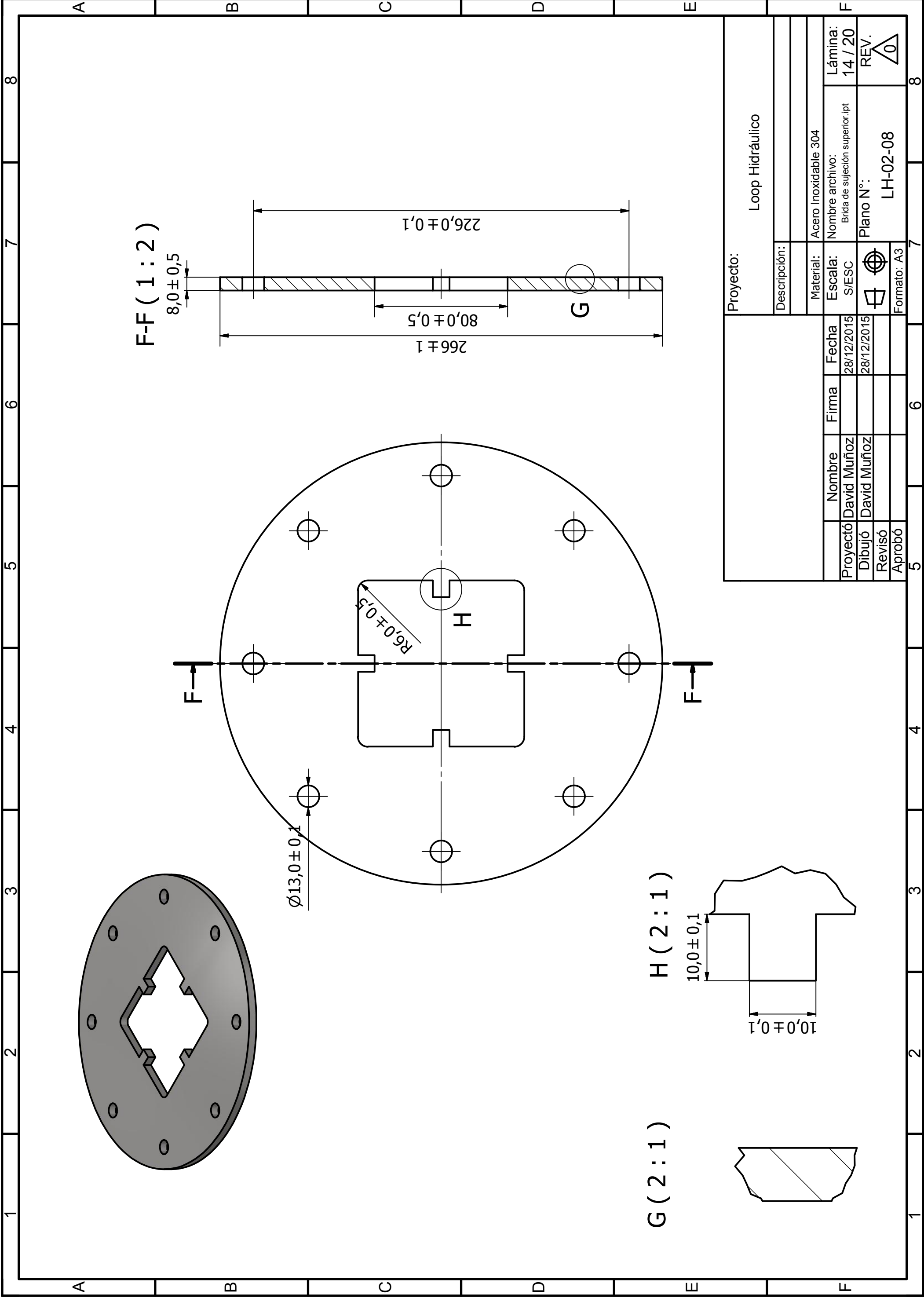
Ø13,0±0,1

B (2:1)

2,8±0,1

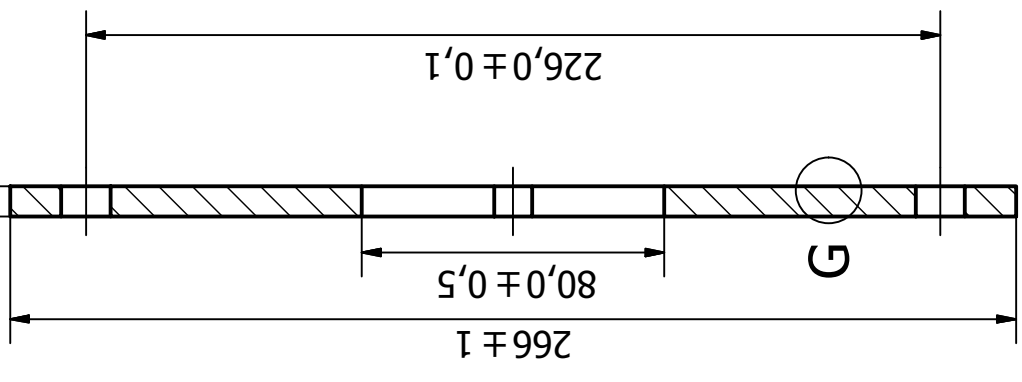
4,9±0,1

Proyecto:		Loop Hidráulico			
Descripción:					
Material:		Acero Inoxidable 304			
Escala:		S/ESC			
Nombre:		David Muñoz		Fecha	
Proyectó:		David Muñoz		28/12/2015	
Dibujó:		David Muñoz		28/12/2015	
Revisó:					
Aprobó:					
Formato:		A3		Lámina:	
Piano N°:		LH-02-07		13 / 20	
REV.:		0			



F-F (1:2)

8,0±0,5

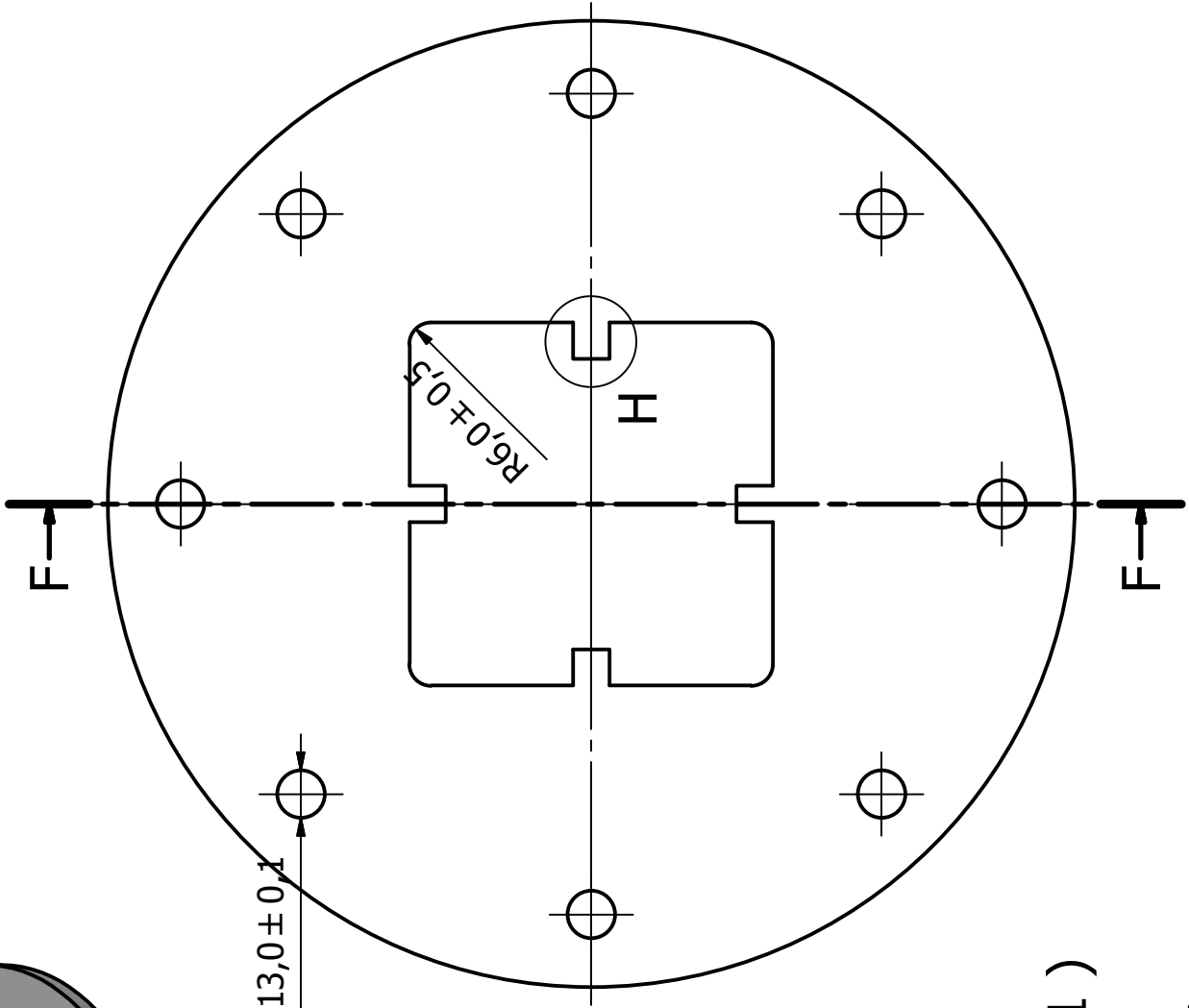


226,0±0,1

80,0±0,5

266±1

G



Ø13,0±0,1

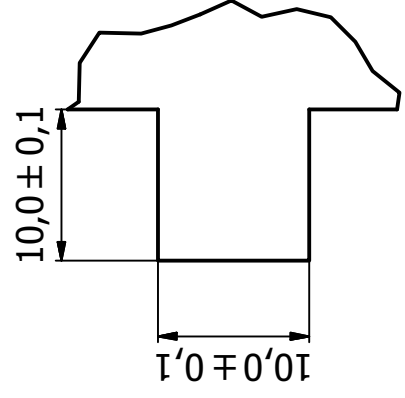
R6,0±0,5

H

F

F

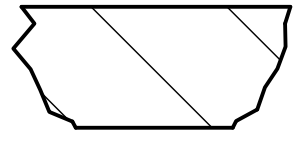
H (2:1)



10,0±0,1

10,0±0,1

G (2:1)



Proyecto:

Loop Hidráulico

Descripción:

Material: Acero Inoxidable 304

Escala: S/ESC

Nombre archivo: Brida de sujeción superior.ipt

Formato: A3

Plano N°: LH-02-08

Formato: A3

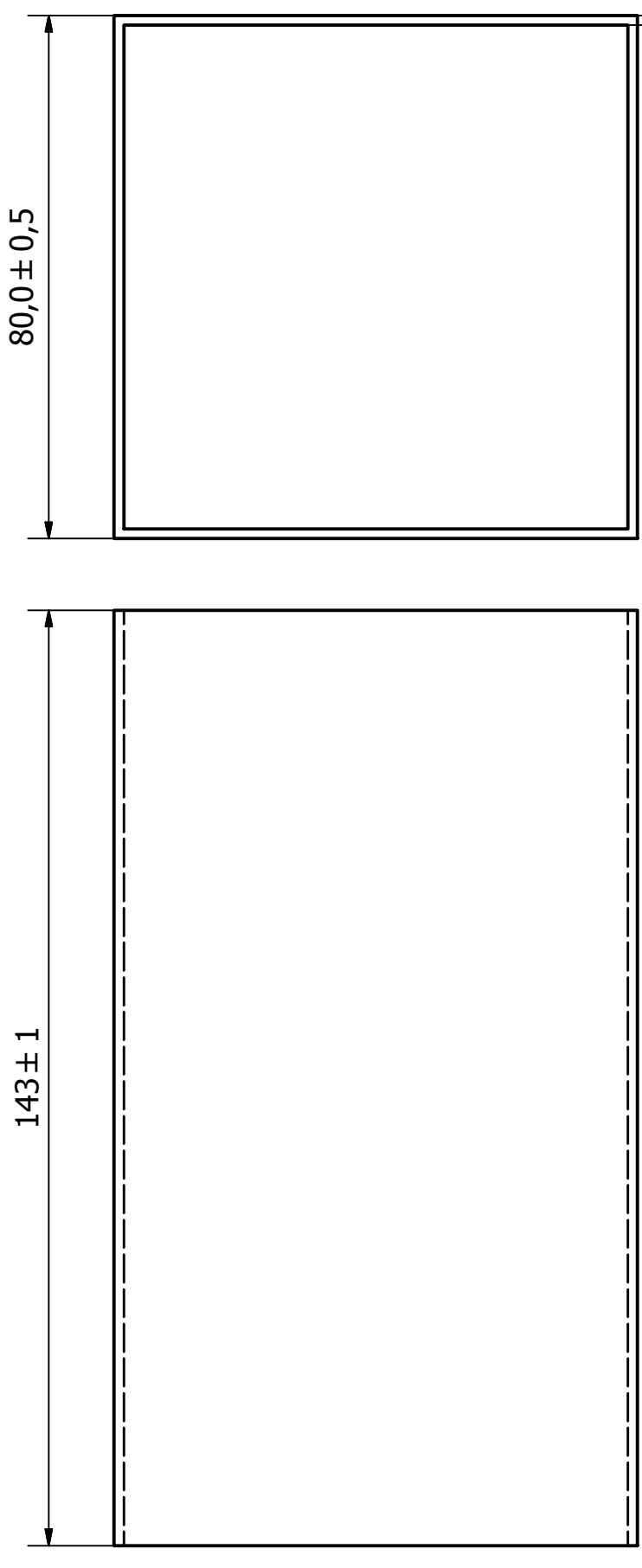
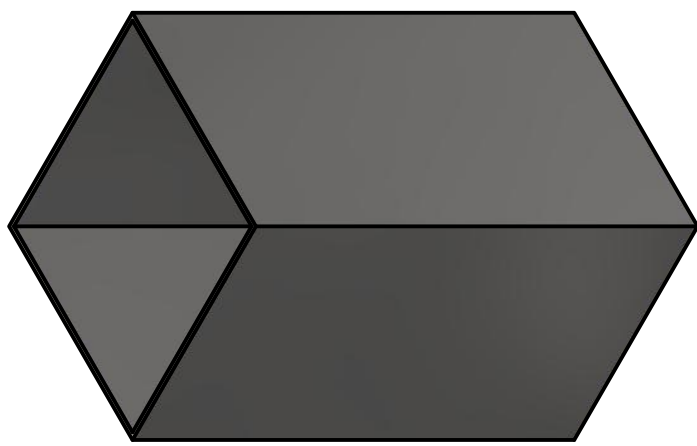
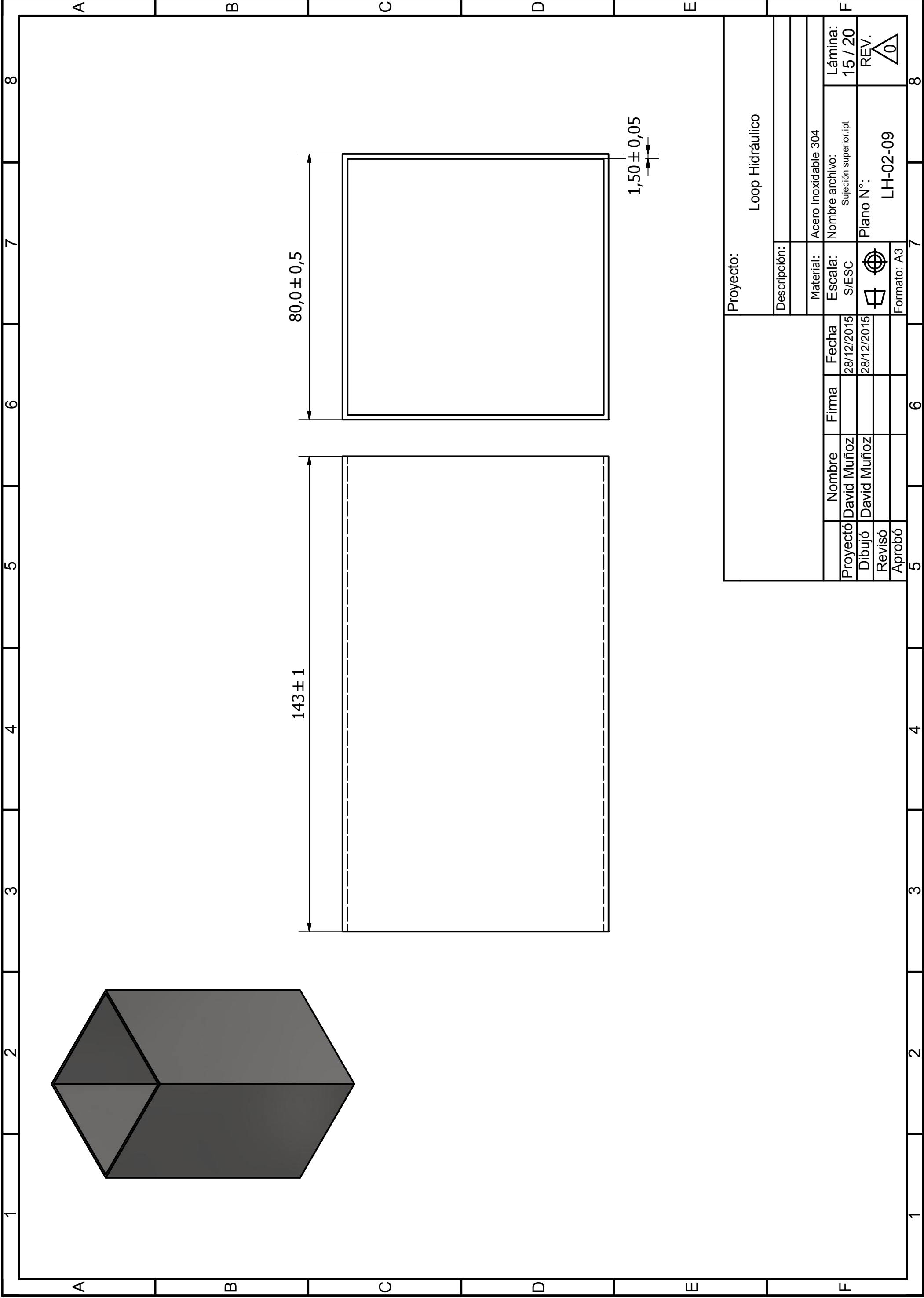
Lámina:

14 / 20

REV.

0

Proyectó	Nombre	Firma	Fecha
Dibujó	David Muñoz		28/12/2015
Revisó	David Muñoz		28/12/2015
Aprobó			

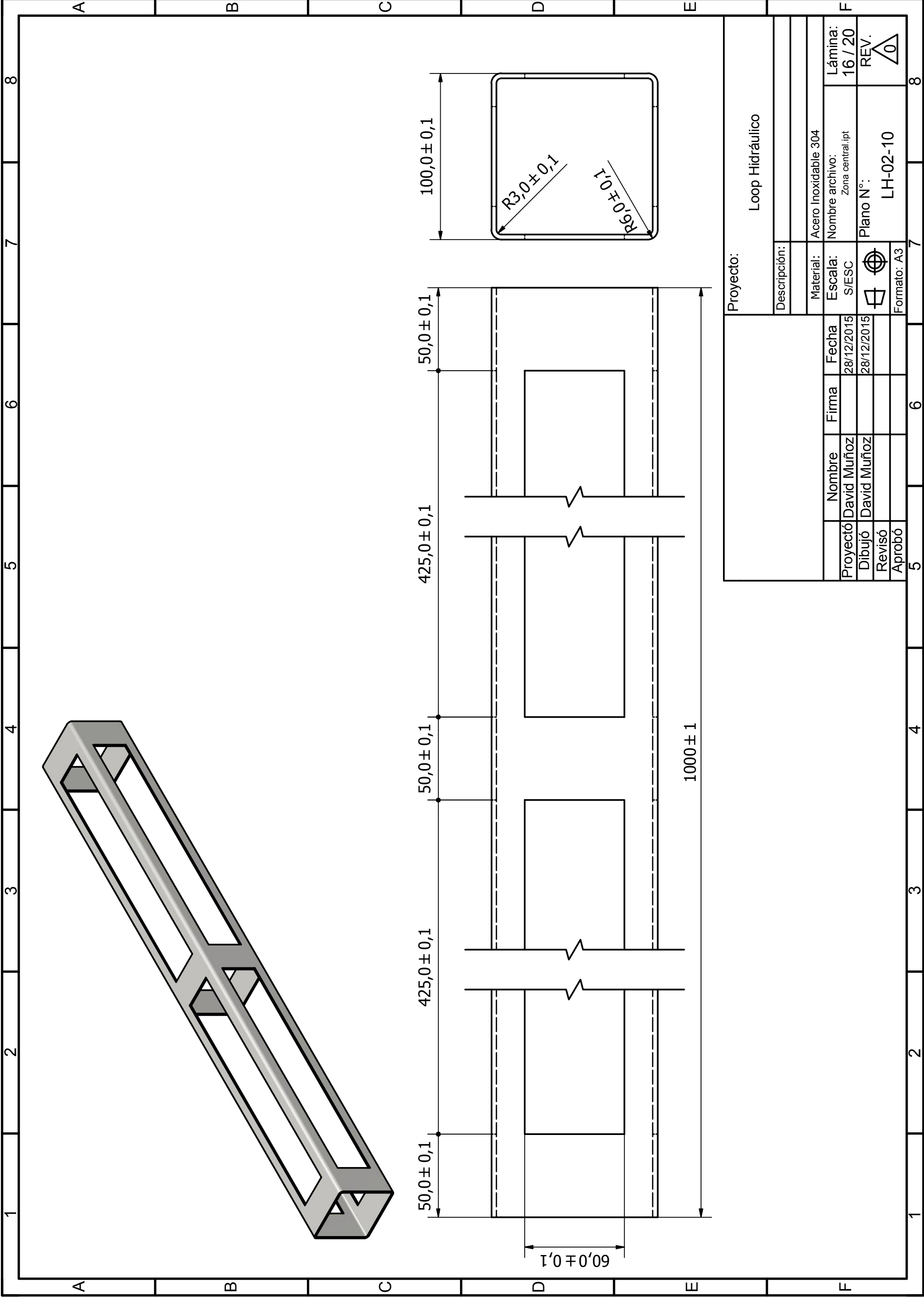


80,0 ± 0,5

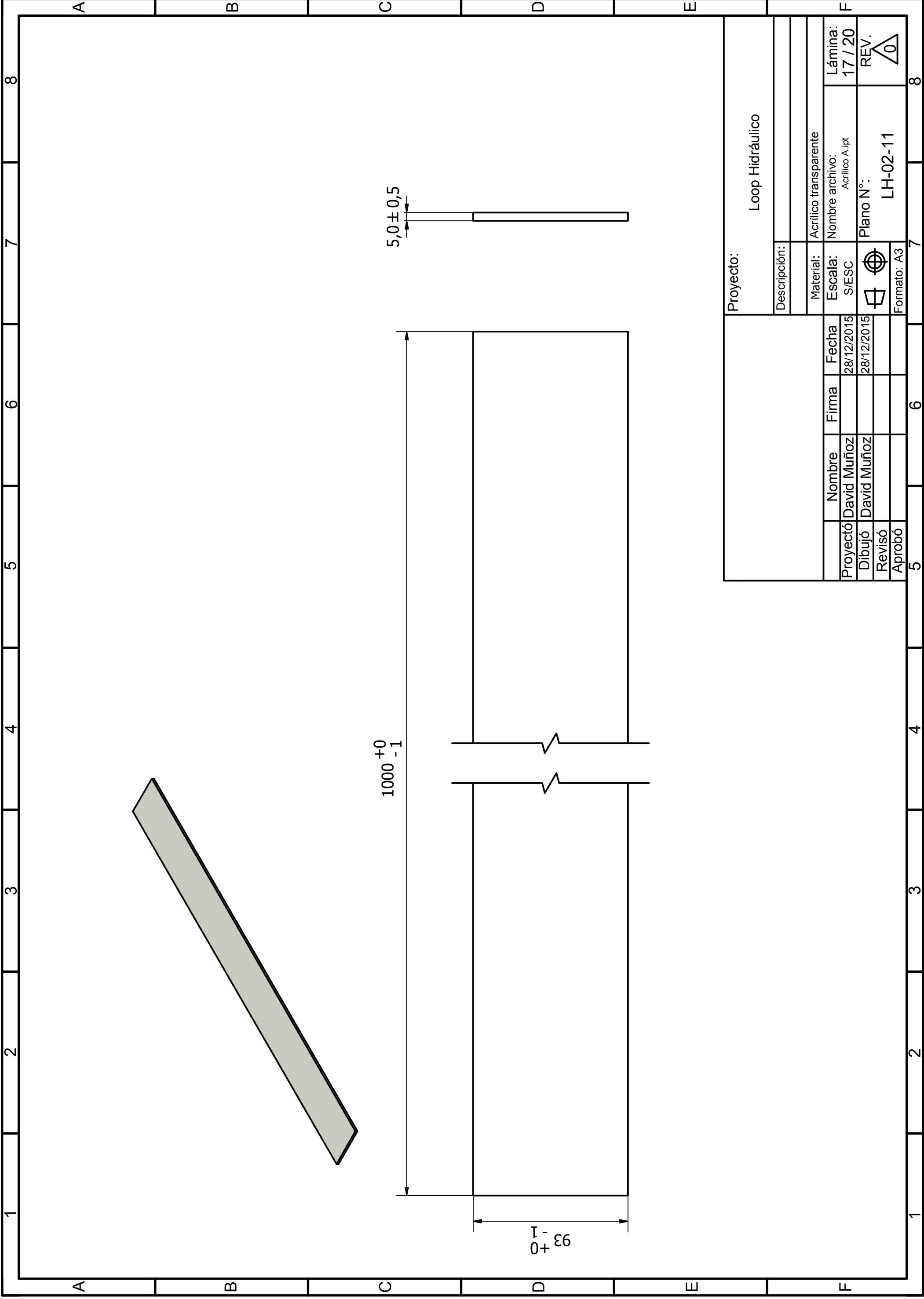
143 ± 1

1,50 ± 0,05

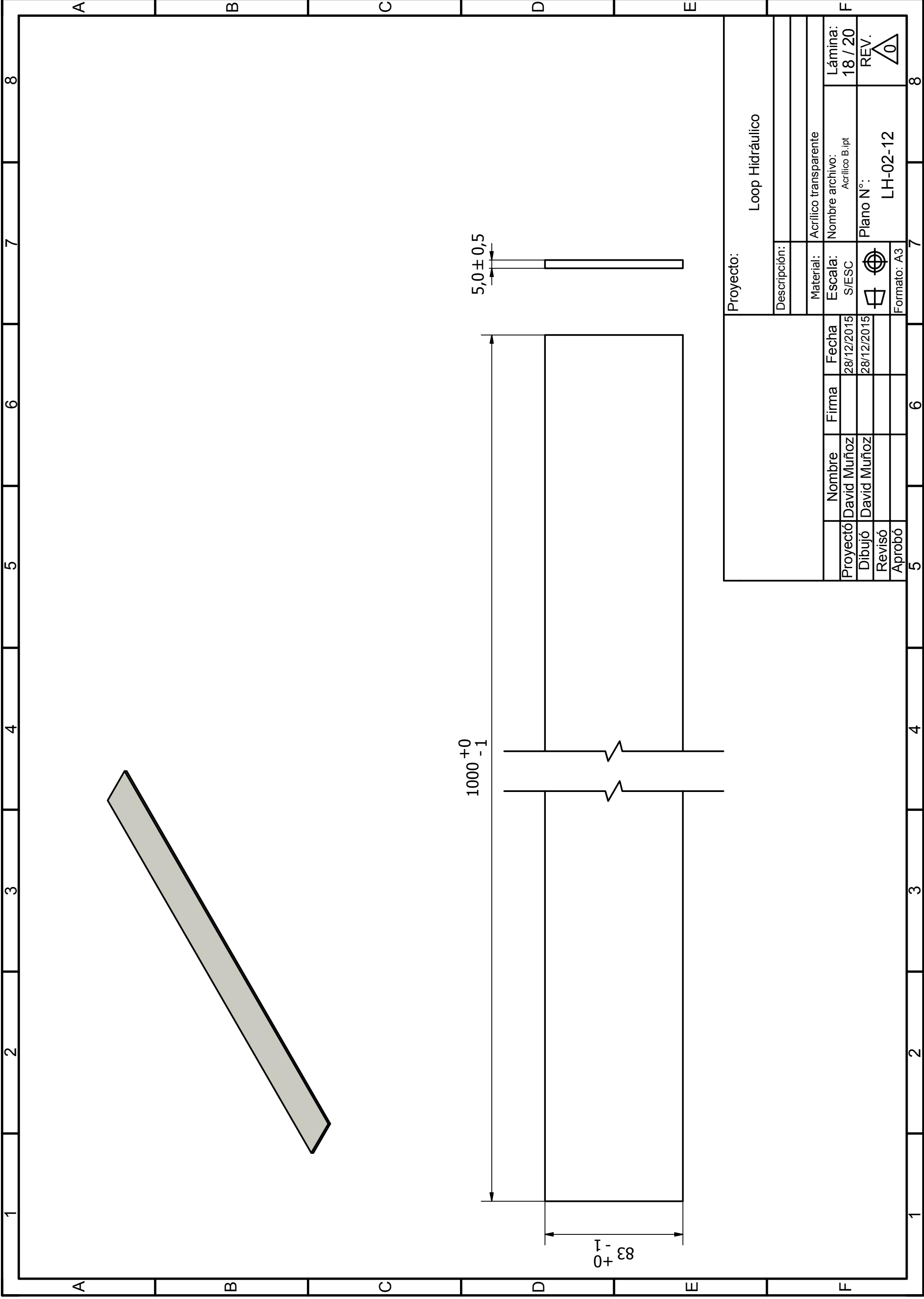
Proyecto:		Loop Hidráulico			
Descripción:					
Material:		Acero Inoxidable 304			
Escala:		Nombre archivo: Sujeción superior.ipt			
S/ESC		Lámina: 15 / 20			
Formato: A3		REV.			
Proyectó		Firma		Fecha	
Dibujó		Nombre		28/12/2015	
Revisó		David Muñoz		28/12/2015	
Aprobó					
Piano N°:		LH-02-09			



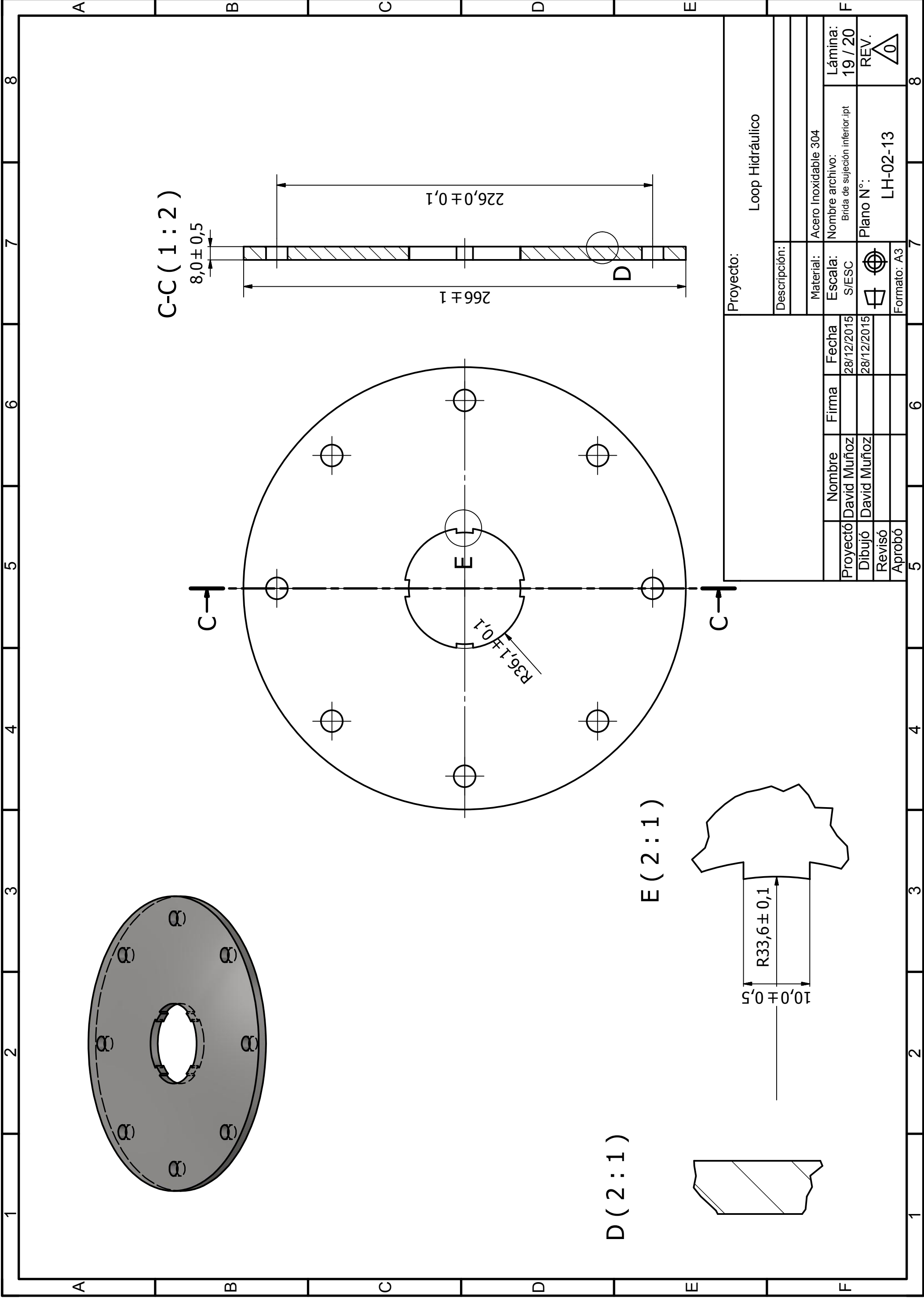
Proyecto:		Loop Hidráulico			
Descripción:					
Material:		Acero Inoxidable 304			
Escala:		S/ESC			
Nombre archivo:		Zona central.ipt			
Lámina:		16 / 20			
Revisó:		Piano N°:		REV.	
Aprobó:		LH-02-10		0	
Fecha:		Formato:		A3	
Proyectó:		Firma:		7	
Dibujó:		Nombre:		6	
Revisó:		Fecha:		5	
Aprobó:		28/12/2015		8	
		28/12/2015			



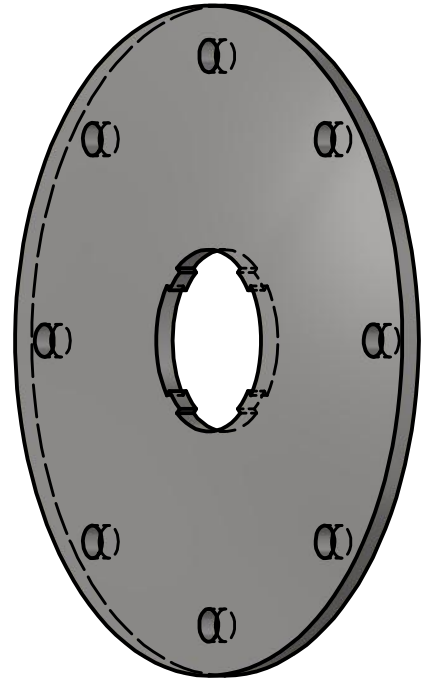
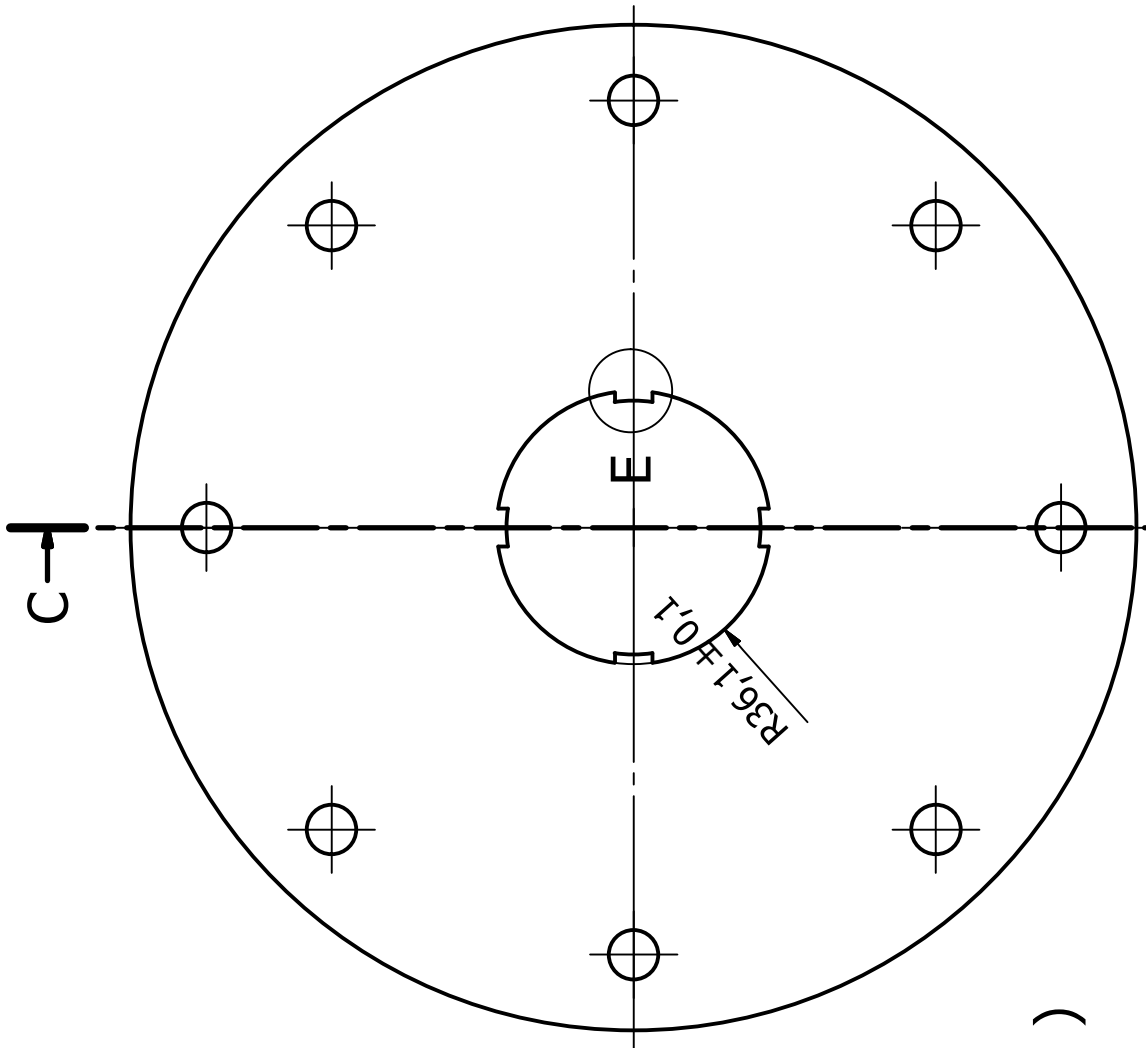
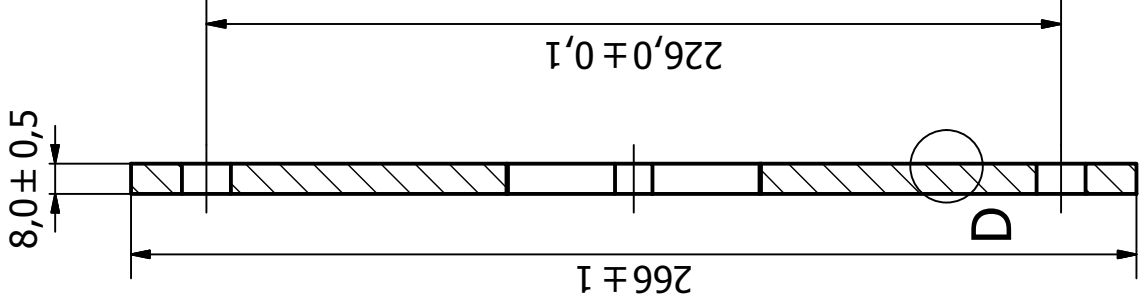
Proyecto:		Loop Hidráulico			
Descripción:					
Material:		Acrílico transparente			
Escala:		S/ESC		Nombre archivo: Acrílico A.ipt	
Proyectó		Nombre		Fecha	
Dibujó		Firma		28/12/2015	
Revisó				28/12/2015	
Aprobó					
				Lámina: 17 / 20	
				REV. 0	
		Piano N°:		LH-02-11	
		Formato: A3			



Proyecto:		Loop Hidráulico			
Descripción:					
Material:		Acrílico transparente			
Escala:		S/ESC		Nombre archivo: Acrílico B.ipt	
Proyectó		Nombre		Fecha	
Dibujó		Firma		28/12/2015	
Revisó		David Muñoz		28/12/2015	
Aprobó		David Muñoz			
Formato: A3		Piano N°:		LH-02-12	
Lámina:		REV.		18 / 20	
				0	

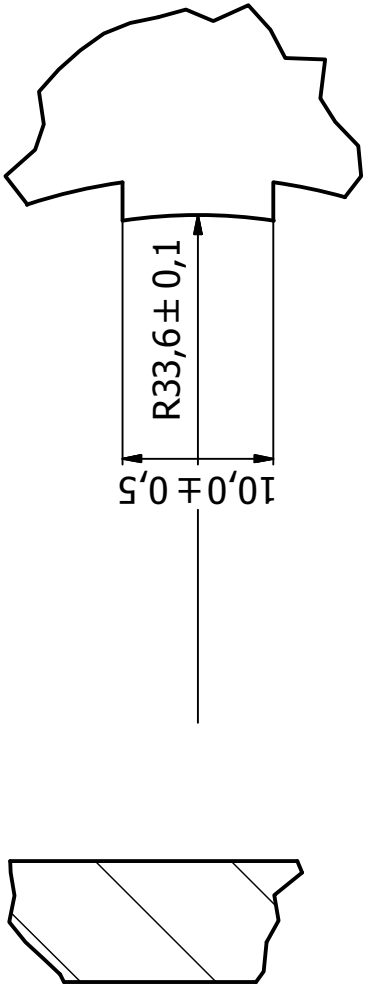


C-C (1:2)

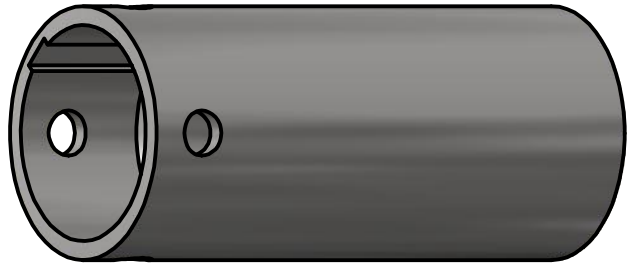


D (2:1)

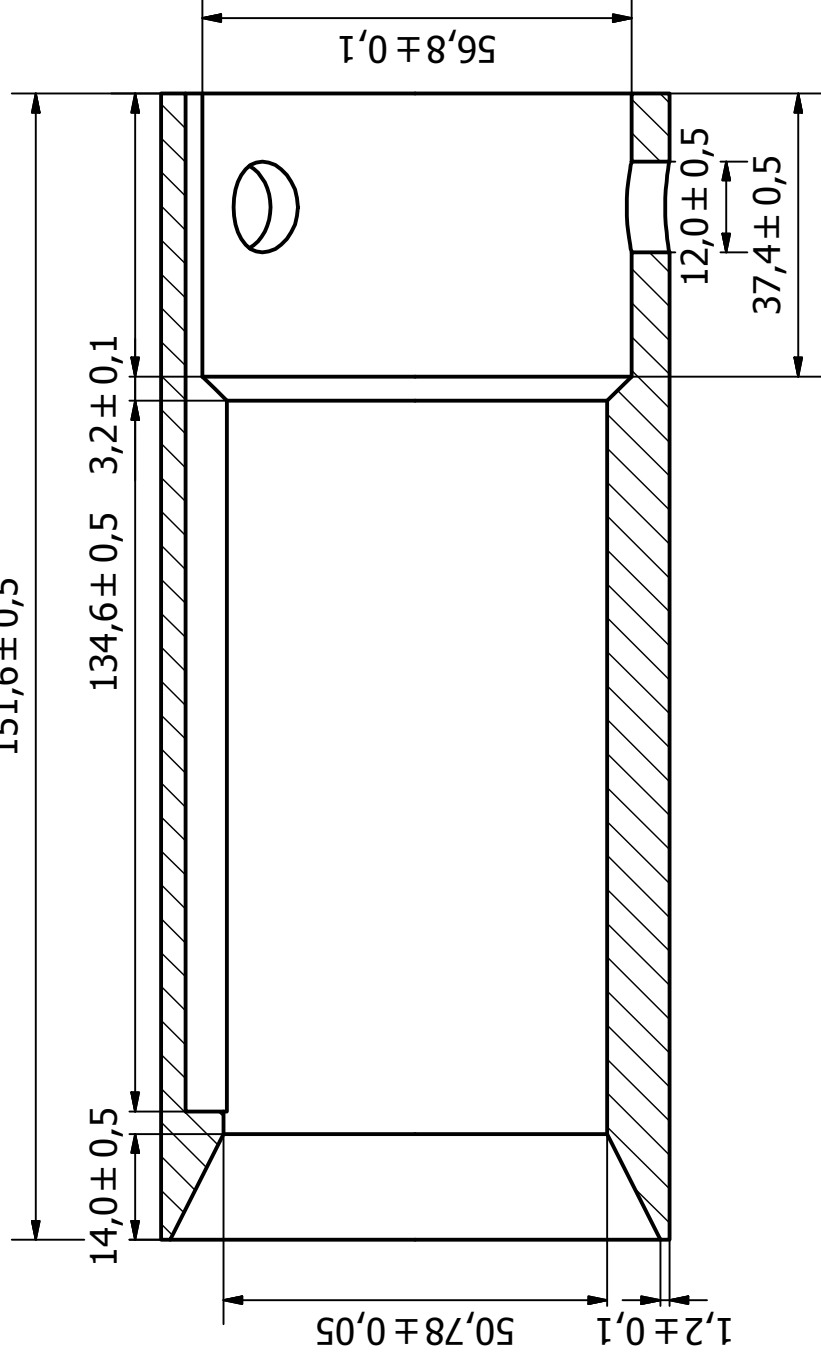
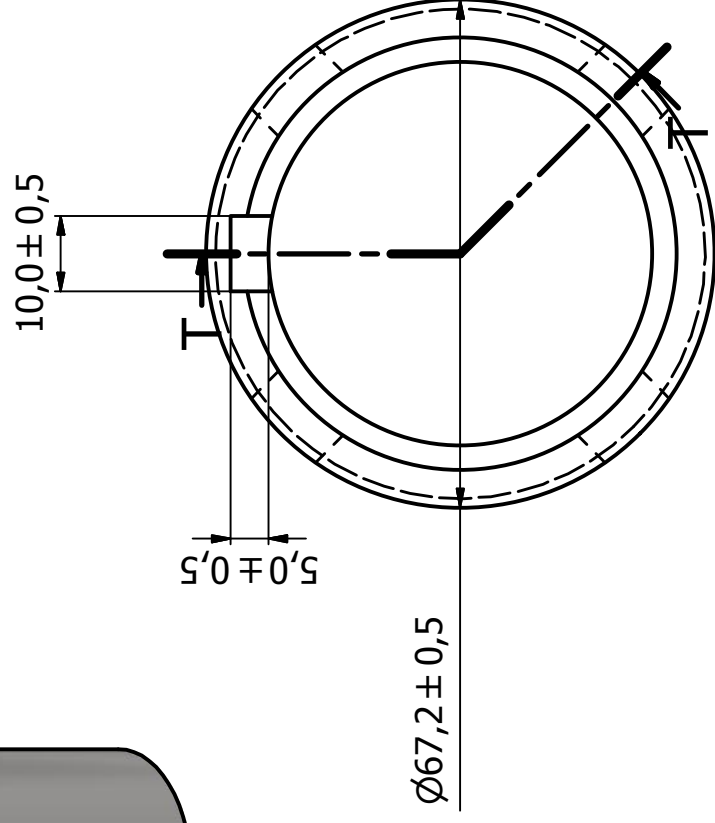
E (2:1)



Proyecto:		Loop Hidráulico			
Descripción:					
Material:		Acero Inoxidable 304			
Escala:		Nombre archivo:		Lámina:	
S/ESC		Brida de sujeción inferior.ipt		19 / 20	
Formato: A3		Plano N°:		REV.	
		LH-02-13		0	
Proyectó	Nombre	Firma	Fecha		
David Muñoz	David Muñoz		28/12/2015		
Dibujó	David Muñoz		28/12/2015		
Revisó					
Aprobó					



T-T (1:1)
151,6 ± 0,5



Proyecto:		Loop Hidráulico			
Descripción:					
Material:		Acero Inoxidable 304			
Escala:		S/ESC			
Nombre:		David Muñoz		Fecha	
Dibujó:		David Muñoz		28/12/2015	
Revisó:				28/12/2015	
Aprobó:					
Formato:		A3		LH-02-14	
Lámina:		20 / 20		REV.	
Sujeción inferior:		ipt		0	