



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis dimensional e
integración de la estructura
mecánica del instrumento
DDRAGO para el Telescopio
Colibrí**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

José David Verduzco Tornel

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Alejandro Farah Simón



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, mi alma mater, a la Facultad de Ingeniería y el Instituto de Astronomía, que fundaron a un profesional orgulloso de su patria y del conocimiento dispuesto en él. Abrieron las puertas de mi futuro y la esperanza arde brillante gracias a ustedes. Que en mi vida actúe con base en su digna enseñanza.

A mis mentores Beni, Diego, D.I. Rosalia Langarica, Ing. Silvio Tinoco, M.I. Jaime Ruíz, Dr. Jorge Fuentes y Dr. Alejandro Farah, por recibirme con los brazos abiertos y estar siempre dispuestos a compartir sus innumerables conocimientos y experiencias conmigo. Por ello tienen mi más grande respeto, gratitud y aprecio. Que este trabajo sea digno de su ejemplo.

A Alex Farah, en quien encontré una aspiración profesional, hoy encuentro además un amigo. Una persona con inmensas experiencias y conocimientos, siempre dispuesto a compartirlos por el beneficio de la sociedad y la ciencia. Lo tendré en el más alto respeto, y en el más profundo aprecio.

A mis padres, Verónica y Marco, por haberme dado la vida e infundido en ella los valores y enseñanzas por los cuales me siento profundamente orgulloso de llamarme su hijo. Este trabajo es el fruto de su amor y guía a lo largo de mi vida.

A mi abuelita Graciela, tu infinita bondad y amor por tu familia es lo que nunca olvidaré. Gracias por quererme, motivarme y permitirme creer en lo que sentía era correcto. El llegar a este punto es gracias a tu existencia. Donde sea que estés, te quiero.

A mis hermanos Montserrat y Marco, su apoyo y amor incondicional me permitieron salir adelante. Los admiro y quiero profundamente.

A Mikoyan, un ser que con una mirada permite llenar mi mundo de felicidad.

A mis amigos Johanna, Andy, Quique, Memo, Daniel, Toshio, Ulises, Gunter, Diego, Beto, José Eduardo, Joseph, Antony, Tona; ustedes me han hecho alcanzar las estrellas, su amor y amistad son el impulso para seguir adelante. Este trabajo es tanto logro suyo como mío, sin ustedes no me encontraría hoy aquí.

A mi familia Verduzco, y a mi familia Tornel.

*“Entonces habló el valiente Horacio,
El Capitán de la Puerta:
A todo hombre sobre esta tierra
La muerte llega tarde o temprano.
¿Y cómo puede el hombre morir mejor
que enfrentar probabilidades terribles,
Por las cenizas de sus padres,
y los templos de sus dioses?”*

Extracto de Cantos de la Antigua Roma, por Thomas B. Macaulay.

Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo de las últimas etapas del diseño ingenieril de la estructura de soporte del instrumento astronómico DDRAGO, orientado a las etapas productivas y evaluación de calidad de las mismas, basada en los requerimientos técnicos de diseño a detalle apoyados en tecnologías CAD para elaboración de modelos digitales y planos de manufactura, mediante análisis metrológicos y estadísticos con diferentes instrumentos de precisión como una mesa de medición por coordenadas y calibradores Vernier. Mostrando resultados generalmente positivos con base en predicciones y experiencia previa en un instrumento piloto denominado DDRAGUITO, resultados tales que permitieron dar seguimiento a la etapa productiva y realizar ajustes pertinentes en piezas con defectos, para permitir así aceptar y garantizar la integración exitosa de la estructura de soporte del instrumento DDRAGO y su posterior acoplamiento con el telescopio COLIBRÍ para la detección, observación y análisis de destellos de rayos gamma (GRB) en el Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir.

Abstract

This work presents the development of the latest stages of the engineering design of the support structure of the astronomical instrument DDRAGO, focused on the production stages and quality evaluation, based on detailed technical design requirements supported by CAD technologies for the elaboration of digital models and manufacturing plans, through metrological and statistical analyses with different precision instruments such as a coordinate measurement machine and Vernier calipers. Results generally positive were shown based on predictions and previous experience with a pilot instrument called DDRAGUITO, allowing for the follow-up of the production stage and the implementation of relevant adjustments in defective parts, thus enabling the acceptance and guarantee of the successful integration of the support structure of the DDRAGO instrument and its subsequent coupling with the COLIBRÍ telescope for the detection, observation, and analysis of gamma-ray bursts (GRB) at the National Astronomical Observatory of San Pedro Mártir.

Índice general

Agradecimientos	I
Resumen	V
Abstract	VII
1 Introducción	1
1.1 Destellos de rayos gamma (GRB)	1
1.1.1 Detección y análisis de destellos de rayos gamma (GRB)	2
2 Marco de Referencia	7
2.1 El telescopio: funcionamiento e historia	7
2.1.1 Instrumentación astronómica	10
2.2 Metrología	13
2.2.1 Historia y descripción de metrología e ingeniería de metrología	13
2.2.2 Tipos de metrología	14
2.2.3 Importancia del control dimensional en el proceso de diseño	15
2.2.4 Autoridades en metrología y jerarquía de regulaciones y estándares: ISO, ANSI, ASME, NOM, VIM, NPL y CSIR	16
2.3 Sistemas de unidades	17
2.4 Instrumentos de medición de precisión	17
2.4.1 Instrumentos de medición convencionales	18
2.4.2 Máquina de Medición por Coordenadas (CMM)	19
2.5 Justificación del proyecto	21
2.5.1 SVOM	21

2.5.2	COLIBRÍ	22
2.5.3	DDRAGO	23
2.6	Justificación de la tesis	23
3	Marco Teórico	25
3.1	Propiedades mecánicas del aluminio y sus aleaciones	25
3.1.1	Influencia de la temperatura en el comportamiento mecánico del aluminio	26
3.2	Fundamentos teóricos y prácticos sobre metrología	27
3.2.1	Principios y fundamentos básicos de la ingeniería de metrología	27
3.2.2	Objetivos de un análisis dimensional	31
3.2.3	Conceptos generales de medición	32
3.2.4	Normas y lineamientos asociados a un análisis metrológico	33
3.2.5	Errores en medición	34
3.2.6	Análisis del error	37
3.2.7	Análisis de la incertidumbre	42
3.2.8	Fundamentos de tolerancias dimensionales y geométricas	45
3.3	Diseño mecánico del instrumento DDRAGO	45
3.3.1	Componentes de DDRAGO	46
3.3.2	Estructura de soporte de DDRAGO	48
3.3.3	Análisis por elementos finitos y presupuesto de error	52
3.4	Integración y aceptación	54
3.4.1	Integración	54
3.4.2	Aceptación	54
4	Desarrollo experimental y resultados	55
4.1	Procesos previos al análisis dimensional	55
4.2	Análisis metrológico	64
4.2.1	Análisis metrológico de taller	65
4.2.2	Análisis metrológico de precisión	85
4.3	Trabajo futuro	108

4.3.1	Análisis metrológico del ensamble del instrumento	110
4.3.2	Integración con el telescopio COLIBRÍ y observación de GRB . . .	112
5	Conclusiones	115
	Anexos	121
A	Anexo I: Planos de manufactura para acabados en el TMP-CU	123
B	Anexo II: Planos de metrología	169

Índice de figuras

1.1	Ilustración de un destello de rayos gamma. Imagen con autoría de la NASA, ESA y M. Kornmesser. URL: https://www.nasa.gov/feature/goddard/2019/hubble-studies-gamma-ray-burst-with-highest-energy-ever-seen	2
1.2	Telescopio espacial Fermi (Izquierda) y el satélite SWIFT (Derecha). Imágenes extraídas de la NASA. URL: https://fermi.gsfc.nasa.gov/ y https://www.nasa.gov/centers/goddard/universe/swift_media.html .	3
1.3	Observatorio HAWC en el volcán Sierra Negra en Puebla, México. Imagen extraída de [16].	5
2.1	Vasija vidriada de la época de Thutmose III, expuesta en el Museo de Múnich. Imagen con autoría de Einsamer Schütze.	8
2.2	Modelo del telescopio de Galileo. Imagen extraída de [2].	9
2.3	Una réplica del segundo telescopio reflector de Newton, el cual fue presentado a la Royal Society en 1672. Imagen con autoría de Andrew Dunn.	9
2.4	Telescopio espacial James Webb (Izquierda) y Hubble (Derecha). Imágenes extraídas de la NASA. URL: https://solarsystem.nasa.gov/missions/james-webb-space-telescope/in-depth/ y https://hubblesite.org/ .	10
2.5	Detectores CCD empleados en el instrumento DDRAGO, nótese que analizan diferentes porciones del espectro electromagnético. Imágenes extraídas de [17].	12
2.6	Torre del instrumento DDRAGO en donde se aprecia un dicroico (dichroic 1) así como uno adicional situado debajo de la torre (dichroic 2). Imágenes extraídas de [17].	12

2.7	Miembros del Comité Conjunto para las Guías en Metrología,(JCGM). Imagen extraída de https://bioanalisaldia.com/tema-de-hoy/vim/	16
2.8	Secciones de medición de un calibrador Vernier. (A) Para medir dimensiones externas, (B) para medir dimensiones internas y (C) para medir profundidad. Imagen extraída de [7].	18
2.9	Micrómetro y las partes que lo componen. Imagen extraída de [7].	19
2.10	Máquina de Medición por Coordenadas Mitutoyo modelo 7106, modelo que se encuentra en el laboratorio de metrología del Instituto de Astronomía. Imagen extraída de [14].	20
2.11	Instrumentos que integran a SVOM, nótese la participación mexicana en el segmento terrestre (ground). Imagen extraída de https://www.svom.eu/en/the-svom-mission/	21
2.12	El telescopio COLIBRÍ visto desde el archivo CAD empleado por el Instituto de Astronomía para su diseño. Imagen extraída de [17].	22
2.13	El telescopio COLIBRÍ junto al instrumento DDRAGO vistos desde el archivo CAD empleado por el Instituto de Astronomía para su diseño. Imagen extraída de [17].	24
3.1	Ejemplificación de exactitud y precisión (a) Preciso pero inexacto, (b) Exacto pero impreciso, (c) Preciso y exacto, (d) Impreciso e inexacto. Imagen extraída de [15].	29
3.2	Elementos de una medición. Imagen extraída de [15].	32
3.3	Efectos de la histéresis de un manómetro, notando cómo las lecturas otorgan diferentes mediciones al realizar la medición en un modo ascendente y descendente, mostrado en un gráfico que relaciona las mediciones de presión como una función del valor real de la medición. Imagen extraída de Instrumentation Today	35

3.4	Ejemplo didáctico de una distribución normal o Gaussiana, en ocasiones también conocida como distribución en forma de montículo. Dicha gráfica relaciona la frecuencia de aparición de un cierto valor x dentro de un conjunto de datos analizados, y dicho conjunto está caracterizado por su media aritmética μ y su desviación estándar σ . Imagen extraída de [13].	36
3.5	Ejemplo de la curva de precisión de una serie de mediciones, demostrando en azul la altura de la distribución normal como la precisión del instrumento. Imagen extraída de [9].	39
3.6	Ejemplo de una distribución normal con mayor y menor altura, para (a) la altura es mayor, implicando que la desviación estándar de la muestra es menor; para (b) la altura es menor, implicando en este caso una desviación estándar mayor. Imagen extraída de [3].	39
3.7	Confiabilidad de una serie de mediciones representadas en una distribución normal, nótese que la línea que denota la altura de la distribución no es continua, lo que denota que el instrumento de medición es confiable . Imagen extraída de [9].	40
3.8	Representación estadística de la exactitud de una serie de mediciones caracterizada por la media y el valor real de la cantidad física sometida a medición. Imagen extraída de [9].	42
3.9	Método general empleado por el CENAM (Centro Nacional de Metrología) para calcular la incertidumbre asociada a la medición. Imagen extraída de [4].	44
3.10	Una tolerancia dimensional es la anchura del intervalo de medidas permitidas para una dimensión, estas tolerancias se aplican a dimensiones de forma (A, B y E) y dimensiones de posición (C y D). Imagen extraída de [7]. . . .	45
3.11	Componentes soportados por la estructura de soporte de DDRAGO: (1) Barril L1L2, (2) D1 y módulo CP, (3) Soporte D2, (4) Soporte L3, (5) Detector de azul con mecanismo de punta/inclinación, (6) Soporte L4, (7) Detector de rojo con mecanismo de punta/inclinación, (8) WOB (Warm Optical Bench), (9) Criostato CAGIRE y (10) electrónica de CAGIRE. Imagen extraída de [17].	46

3.12	Representación esquemática de las ópticas de DDRAGO. Imagen extraída de [17].	48
3.13	(Izquierda) Estructura de soporte de DDRAGO. (1) Vista frontal de los detectores, (2) vista desde los detectores de DDRAGO, (3) vista desde el lado del criostato, (4) vista desde el desrotador del telescopio. (Derecha) Vista en explosivo de la estructura de soporte. Imagen extraída de [17]. . .	49
3.14	Soporte para la electrónica de CAGIRE. Imagen extraída de [17].	50
3.15	Estructura de soporte del criostato junto a la vista en explosivo del mismo. Imagen extraída de [17].	51
3.16	Cobertura de WOB junto a una vista en explosivo del mismo. Imagen extraída de [17].	51
3.17	Componentes estructurales incluidos en el análisis por elementos finitos para la estructura de soporte. Imagen extraída de [17].	53
4.1	Análisis del rectificado de una de las placas base de la estructura de soporte de DDRAGO. Imagen de elaboración propia.	56
4.2	Vista frontal de la pieza P1 del instrumento DDRAGO. Imágenes extraídas de Solidworks mediante elaboración propia.	56
4.3	Archivo en formato dxf enviado para la manufactura de las piezas. Nótese las instrucciones para el maquinado con referencia a colores que indican profundidades de corte. Imagen de elaboración propia del Instituto de Astronomía.	57
4.4	Placas de la estructura de soporte de DDRAGO, el criostato y la electrónica de CAGIRE después de ser sometidas a limpieza e inspección preliminar. Imagen obtenida por elaboración propia.	58
4.5	Extracto del plano de detalle de la pieza DD-Cg-ME-SST-P3, en donde se muestra una vista isométrica de la misma y una vista lateral, en la cual se detalla la vista AN remarcando la existencia de un plano inclinado respecto a la cara frontal así como el arreglo de barrenos existente en la cara lateral. Imagen obtenida por elaboración propia de Solidworks.	59

4.6	Uso de las regletas de MDF para la evaluación de un arreglo de barrenos sobre una de las caras de la placa DD-ME-SST-PX. Nótese el código de la misma así como la notación marcada sobre la cara de la placa. El sentido de uso de la regleta es marcado con una flecha que coincide con una marcada en la cara frontal de la placa. Imagen de autoría propia.	60
4.7	Roscado de barrenos laterales para la placa DD-ME-SST-P7 con un taladro de columna (Izquierda) y maquinado de barrenos laterales para la placa DD-ME-SST-CES1A con una fresadora convencional manual (Derecha) en el TMP. Imagen de autoría propia.	61
4.8	Maquinado oblicuo para la placa DD-ME-SST-P3 con una fresadora convencional manual en el TMP. Imagen de autoría propia.	61
4.9	Maquinado y barrenado oblicuo para la placa DD-ME-SST-P7 con una fresadora convencional manual para generar los planos oblicuos en las caras superior e inferior de la pieza y el arreglo de barrenos con caja oblicuos paralelos a dichas caras. Imagen de autoría propia.	62
4.10	Placa DD-ME-SST-P20 completamente terminada con un acercamiento al maquinado oblicuo relizado (Derecha). Imagen de autoría propia.	63
4.11	Placas DD-ME-SST-P2 (Izquierda), DD-ME-SST-P8B y DD-ME-SST-P19 (Derecha) completamente terminadas. Nótese que en la DD-ME-SST-P2 se aprecian las regletas empleadas en ella. Imagen de autoría propia.	63
4.12	Calibrador Vernier Mitutoyo empleado para la metrología de taller. Imagen obtenida de Mitutoyo, URL: https://www.mitutoyo.com/products/small-tool-instruments-and-data-management/calipers/digimatic-calipers/absolute-digimatic-caliper/	66
4.13	Puntos de referencia del calibrador Vernier empleados para la metrología de taller. Imagen elaborada en Powerpoint.	68
4.14	Distribución normal de las mediciones de la dimensión A de la placa DD-ME-SST-P3 con des. est. 0.023 y promedio 628.76 [mm]. Nótese el valor de la altura de la distribución. Imagen de elaboración propia en Microsoft Excel.	81

4.15	Distribución normal de las mediciones de la dimensión B de la placa DD-ME-SST-P3 con des. est. 0.031 y promedio 225.52 [mm]. Nótese el valor de la altura de la distribución. Imagen de elaboración propia en Microsoft Excel.	81
4.16	Distribución normal acumulada de las mediciones de la dimensión A de la placa DD-ME-SST-P3 con des. est. 0.023 y promedio 628.76 [mm]. Nótese que la curva tiende al valor de 1. Imagen de elaboración propia en Microsoft Excel.	82
4.17	Distribución normal acumulada de las mediciones de la dimensión A de la placa DD-ME-SST-P3 con des. est. 0.031 y promedio 225.52 [mm]. Nótese que la curva tiende al valor de 1. Imagen de elaboración propia en Microsoft Excel.	82
4.18	La regla empírica ejemplificada con intervalos de porcentaje de descripción para una distribución normal. Imagen extraída de [15].	83
4.19	Paralelismo aproximado interpretado con base en la desviación estándar de las mediciones. Imagen extraída de Powerpoint por elaboración propia. . .	84
4.20	Mesa de medición por coordenadas (CMM) disponible en el Instituto de Astronomía en Ciudad Universitaria. Imagen obtenida por elaboración propia y extraída del boletín No.1957 de Mitutoyo.	86
4.21	Placa DD-ME-SST-P2 rotulada en tinta verde indicando puntos, líneas y planos a generar con la CMM y MCOSMOS.Imagen de elaboración propia.	89
4.22	Placa DD-ME-SST-P4 rotulada en tinta verde indicando puntos, líneas y planos a generar con la CMM y MCOSMOS.Imagen de elaboración propia.	89
4.23	Placa DD-ME-SST-P10 rotulada en tinta verde indicando puntos, líneas y planos a generar con la CMM y MCOSMOS.Imagen de elaboración propia.	90
4.24	Placa DD-ME-SST-P10 rotulada en tinta verde indicando puntos, líneas y planos a generar con la CMM y MCOSMOS.Imagen de elaboración propia.	90
4.25	Representación de la placa DD-ME-SST-P10 y de los puntos y la línea 13 obtenidos del análisis metrológico de precisión Imagen obtenida de Solid-works y Powerpoint por elaboración propia.	97

4.26	Procedimiento de medición erróneo realizado por el software MCOSMOS, mostrando la diferencia entre las dimensiones obtenidas por el ángulo existente entre la cara definida por la dimensión A de la placa DD-ME-SST-P10 y el eje y de la CMM. Imagen obtenida de Powerpoint por elaboración propia.	98
4.27	Definición matemática de los planos y rectas utilizadas a partir de los puntos obtenidos del análisis metrológico de precisión. Imagen obtenida de Powerpoint por elaboración propia.	99
4.28	Definición matemática de las rectas en el plano de análisis a partir de los puntos obtenidos del análisis metrológico de precisión junto a las distancias calculadas para cada iteración del análisis. Imagen obtenida de Powerpoint por elaboración propia.	100
4.29	Estructura de soporte de DDRAGO ensamblada de manera preliminar, nótese la ausencia de la placa DD-ME-SST-P1 que va hacia el puerto nasmyth del telescopio y la placa DD-ME-SST-CYSP5B. Imagen de elaboración propia.	108
4.30	Otra toma de la estructura de soporte de DDRAGO ensamblada de manera preliminar. Imagen de elaboración propia.	109
4.31	Error de alineación de los barrenos entre la placa DD-ME-SST-P20 y DD-ME-SST-P4, notando que el barreno con caja no se alinea de manera adecuada con el barreno roscado, impidiendo así su correcto ensamble. Imagen de elaboración propia.	110
4.32	Comparación entre el ensamble preliminar de la estructura de soporte de DDRAGO, el criostato y CAGIRE con el modelo CAD de diseño en Solidworks. Imagen de elaboración propia.	111
4.33	El telescopio COLIBRÍ junto al instrumento DDRAGO en vista isométrica desde un renderizado del modelo CAD empleado por el Instituto de Astronomía para su diseño. Imagen obtenida de Solidworks.	112
4.34	Instrumento DDRAGUITO apreciado en diferentes vistas. Imagen obtenida de Solidworks.	113

Capítulo 1

Introducción

1.1. Destellos de rayos gamma (GRB)

Los destellos de rayos gamma, comúnmente conocidos por sus siglas del inglés Gamma-Ray Burst (GRB), son luminiscencias repentinas provenientes del universo relacionadas con la muerte de estrellas masivas. Ocurren habitualmente y tienen una duración muy reducida, siendo estos eventos los más luminosos en presentarse en el universo. Estos eventos fueron descubiertos en la década de 1960 por los satélites Vela¹ que verificaban el cumplimiento del Tratado de Prohibición de Pruebas Nucleares elaborado por los Estados Unidos y la Unión Soviética.

Los brotes de rayos gamma son los eventos energéticos más extremos que ocurren en el universo. La fase inicial tiene una duración típica de 100 segundos y poseen un alto contenido energético, lo que resulta en una luminosidad de un millón de veces más grande que la mayor luminosidad electromagnética emitida por la supernova de una estrella en explosión.

El estudio de los GRB en el ámbito astronómico y físico debido a que proporciona información valiosa sobre eventos cósmicos extremos permitiendo identificar eventos cósmicos extremos, como la colisión de estrellas de neutrones o la explosión de supernovas. Estos eventos no solo son interesantes desde el punto de vista astronómico, sino que también pue-

¹Astrophysics Science Division, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA. [8]



Figura 1.1: *Ilustración de un destello de rayos gamma. Imagen con autoría de la NASA, ESA y M. Kornmesser. URL: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2019/hubble-studies-gamma-ray-burst-with-highest-energy-ever-seen>*

den proporcionar información importante sobre la evolución del universo y la comprensión de su estructura debido a que los GRB son producidos por objetos que están muy lejos de la Tierra, por lo que su estudio puede proporcionar información sobre la distribución de la materia y la energía en el universo. También resulta relevante su estudio para la física de alta energía, el análisis de la distribución espectral de los rayos gamma puede ayudar a los físicos a comprender mejor los procesos físicos que ocurren en el universo, como la aceleración de partículas. Por último, la tecnología espacial también se beneficia de su estudio ya que los instrumentos utilizados para detectar y medir los destellos de rayos gamma pueden proporcionar información valiosa para el diseño de futuros sistemas de detección y medición en el espacio.

1.1.1. Detección y análisis de destellos de rayos gamma (GRB)

Actualmente existen dos misiones espaciales relevantes en el análisis y detección de los destellos de rayos gamma: SWIFT y Fermi. La misión SWIFT (Swift Gamma-Ray Burst Mission) fue lanzada en noviembre de 2004 con el objetivo de estudiar los destellos de rayos gamma y sus fuentes en el universo. SWIFT tiene tres instrumentos: el Telescopio de Alerta de Destellos (BAT por sus siglas en inglés de Burst Alert Telescope), el Telescopio de Rayos X (XRT por sus siglas en inglés de X-Ray Telescope) y el Telescopio Óptico de UV (UVOT por sus siglas en inglés de UV Optical Telescope); siendo el primero el que

detecta y localiza destellos de rayos gamma en el espacio, y envía información inmediata a telescopios terrestres y espaciales para su seguimiento. Además, SWIFT también estudia las supernovas y las estrellas variables.

Por otro lado, la misión Fermi (Fermi Gamma-ray Space Telescope) fue lanzada en junio de 2008 y tiene como objetivo estudiar el universo en rayos gamma y radiación de alta energía. Fermi cuenta con dos instrumentos principales: el Telescopio de Área Amplia (LAT por sus siglas en inglés de Large Area Telescope) y el Monitor de Destellos de Rayos Gamma (GBM por sus siglas en inglés de Gamma-ray Burst Monitor). El LAT es un telescopio de rayos gamma de gran área que puede detectar rayos gamma desde energías de 20 mega-electronvoltios (MeV) hasta más de 300 gigaelectronvoltios (GeV), mientras que el GBM detecta destellos de rayos gamma de baja energía y realiza un seguimiento de los cambios de intensidad de las fuentes de rayos gamma a lo largo del tiempo.

Ambas misiones, SWIFT y Fermi, han sido cruciales para la comprensión de los destellos de rayos gamma y la astrofísica en general, y han hecho descubrimientos importantes, como la detección de agujeros negros supermasivos y la confirmación de la teoría de la relatividad general de Einstein.



Figura 1.2: Telescopio espacial Fermi (Izquierda) y el satélite SWIFT (Derecha). Imágenes extraídas de la NASA. URL: <https://fermi.gsfc.nasa.gov/> y https://www.nasa.gov/centers/goddard/universe/swift_media.html.

Es importante mencionar que Fermi y SWIFT son las misiones más recientes en lo

relativo a detección y análisis de GRB's, pero existieron misiones contemporáneas que también fueron relevantes en su estudio, dichas misiones fueron BATSE (por sus siglas en inglés de Burst and Transient Source Experiment), BeppoSAX y HETE II (por sus siglas en inglés de High-Energy Transient Explorer). Dichas misiones junto a óptica terrestre, infrarroja y radiotelescopios fueron los primeros en causar revolución en el entendimiento de los destellos de rayos gamma.

Estudio de los rayos gamma en México

En México existen tres instrumentos que permiten el estudio de los rayos gamma y los destellos de rayos gamma, dos de ellos están exclusivamente diseñados para este propósito: el telescopio BOOTES-5 y el Observatorio HAWC, y el tercero es el Gran Telescopio Milimétrico (GTM) que no fue diseñado específicamente para este propósito pero se permite emplear para estudiar las emisiones de rayos gamma de algunos objetos astronómicos.

BOOTES-5 es un telescopio robótico de 0.6 [m] de diámetro localizado en el Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir, BOOTES-5 está conectado a una red global de telescopios robóticos nombrada BOOTES que proporciona una respuesta inmediata a la detección de destellos de rayos gamma, su evaluación y localización de éstos a los pocos segundos o minutos de ser detectados por satélites en órbita. Además, realiza tareas de vigilancia del cielo y apoyo a observaciones de misiones espaciales y satélites varios.

Por otro lado, el observatorio HAWC (por sus siglas en inglés de High-Altitude Water Cherenkov) se dedica exclusivamente a la detección de rayos gamma de alta energía. El observatorio está ubicado en Puebla en el volcán Sierra Negra y tiene una superficie de detección de 22 000 [m²] mediante detectores de efecto Cherenkov sumergidos en agua, véase la Figura 1.3.

El objetivo principal de HAWC es detectar rayos gamma de alta energía para estudiar la astrofísica y la física de partículas en los objetos más violentos del universo, como los agujeros negros, los púlsares y las explosiones de supernova.



Figura 1.3: *Observatorio HAWC en el volcán Sierra Negra en Puebla, México. Imagen extraída de [16].*

Con la introducción del instrumento DDRAGO y el telescopio COLIBRÍ, objetos de estudio del presente trabajo, México dispondrá de nuevas herramientas con las cuales se podrá profundizar más en el estudio de los destellos de rayos gamma, ofreciendo la capacidad de obtener una localización rápida de estos destellos en la bóveda celeste, estimar la distancia desde la fuente hasta el observador mediante la técnica del desplazamiento hacia el rojo, así como el análisis de la emisión óptica e infrarroja de los mismos, en el cual destaca como el único instrumento capaz de detectar y monitorear eventos de alto desplazamiento al rojo, es decir, objetos bastante alejados de la Tierra en el marco de referencia de los giga años luz, eventos que ocurren durante los primeros mil millones de años del Universo y los destellos de rayos gamma oscuros que constituyen aproximadamente el 30 % de los eventos que se han detectado por razones que aún no están del todo claras, abriendo así la puerta a una mayor participación en el estudio y comprensión de la física fundamental.

Capítulo 2

Marco de Referencia

2.1. El telescopio: funcionamiento e historia

Un telescopio es un instrumento que permite amplificar una imagen proveniente de un objeto lejano, permitiendo así su estudio a mayor profundidad y detalle. Este instrumento es uno de los muchos inventos que permitieron revolucionar la forma en que el ser humano ve y entiende a la naturaleza misma, con una importancia tal que al momento de su creación inicia una nueva era en la astronomía¹ y se convierte en una ciencia. Para comprender al telescopio, se debe entender que es una consecuencia de tres fenómenos consecutivos: la aparición del vidrio, la óptica y el estudio de la visión.

Con base en hallazgos históricos, la creencia de la aparición del vidrio es que fue un invento accidental en Mesopotamia al coincidir un pedazo de carbonato sódico, conocido como natrón y como jabón para los habitantes de Mesopotamia, arena y una fogata, al combinarse estos tres elementos a altas temperaturas es como aparece el vidrio. A partir de dicho hallazgo y su observación, se repitió y perfeccionó la técnica para hacer vidrio. De Mesopotamia el conocimiento emigró a Egipto, con base en registros arqueológicos que muestran cuentas de vidrio fabricadas alrededor del 2500 a.C. En Grecia se dieron las técnicas del soplado de vidrio y con ella se hicieron muchos recipientes huecos y es justamente en esta época que se inicia el reflexionamiento de la luz y el fenómeno de la visión, además,

¹El telescopio y su historia, por Beatriz Sanchez y Salvador Cuevas.

utilizaban lentes cóncavas para encender fuego. Sin embargo, fue en el siglo XIII cuando el científico persa Al-Farisi describió el primer instrumento óptico conocido como "lente de lectura" para ampliar la letra escrita.



Figura 2.1: *Vasija vidriada de la época de Thutmose III, expuesta en el Museo de Múnich. Imagen con autoría de Einsamer Schütze.*

Uno de los grandes hitos en la historia del telescopio fue su invención en 1608 por parte de Hans Lippershey, aunque algunos argumentan que otros, como Zacharias Janssen o Jacob Metius, también pudieron haber participado en su desarrollo. Sin embargo, fue en el siglo XVII cuando el inventor y astrónomo italiano Galileo Galilei logró un gran avance en el campo de la astronomía al construir y utilizar un telescopio refractor, el cual utilizaba una lente convergente para enfocar y ampliar la luz. Fue con este instrumento que Galileo fue capaz de hacer importantes observaciones astronómicas, como las fases de Venus y las lunas de Júpiter. El telescopio refractor de Galileo consistía en una lente objetivo grande en el extremo de un tubo y una lente ocular en el otro extremo. La lente objetivo capturaba y enfocaba la luz y la lente ocular la ampliaba, permitiendo al observador ver los objetos lejanos de forma más clara y detallada. Este tipo de telescopio se utilizó ampliamente durante muchos años hasta la invención del telescopio reflector.

Durante el siglo XVII, el científico inglés Isaac Newton también hizo importantes contribuciones al desarrollo de los telescopios. En 1668, diseñó un telescopio reflector que usaba



Figura 2.2: *Modelo del telescopio de Galileo. Imagen extraída de [2].*

un espejo parabólico para enfocar la luz, en lugar de las lentes cóncavas utilizadas en los telescopios refractores. Este telescopio, conocido como el telescopio de Newton, ofrecía una ventaja importante: el espejo parabólico no presentaba las aberraciones cromáticas de las lentes y permitía obtener imágenes más nítidas. El telescopio de Newton se convirtió rápidamente en un instrumento popular para la observación astronómica y fue utilizado por muchos astrónomos notables, incluyendo a William Herschel, quien lo usó para descubrir Urano en 1781. En la actualidad, los telescopios reflectores son ampliamente utilizados en la observación astronómica debido a su capacidad para producir imágenes claras y nítidas.



Figura 2.3: *Una réplica del segundo telescopio reflector de Newton, el cual fue presentado a la Royal Society en 1672. Imagen con autoría de Andrew Dunn.*

A medida que la tecnología avanzaba, los telescopios se hicieron más grandes y sofisticados. En 1845, el irlandés William Parsons construyó el telescopio reflector más grande

del mundo en su época, con un diámetro de espejo de 1.8 metros. En 1917, el telescopio Hooker de 2.5 metros de diámetro fue el más grande del mundo durante más de 30 años. En la década de 1930, la tecnología de la óptica avanzó lo suficiente como para permitir la fabricación de telescopios de espejo de gran tamaño y mejor calidad. En 1948, el telescopio Hale de 5 metros de diámetro en el Observatorio Palomar en California, EE. UU., se convirtió en el telescopio más grande del mundo.

En la actualidad, se utilizan telescopios terrestres y espaciales para realizar observaciones astronómicas. Los telescopios terrestres, como el telescopio Keck en Hawái, utilizan espejos gigantes y técnicas de óptica adaptativa para corregir la distorsión causada por la atmósfera terrestre. Los telescopios espaciales, como el Hubble y el James Webb, evitan este problema ya que se encuentran fuera de la atmósfera de la Tierra.

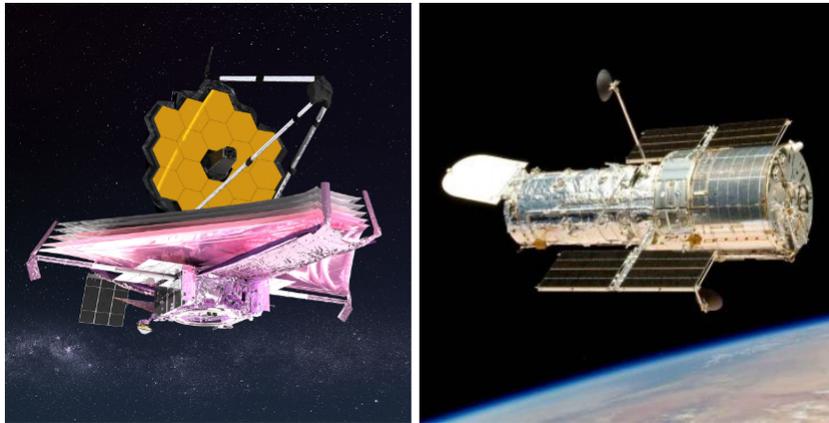


Figura 2.4: Telescopio espacial James Webb (Izquierda) y Hubble (Derecha). Imágenes extraídas de la NASA. URL: <https://solarsystem.nasa.gov/missions/james-webb-space-telescope/in-depth/> y <https://hubblesite.org/>

2.1.1. Instrumentación astronómica

La instrumentación astronómica se refiere a la construcción, diseño y desarrollo de los instrumentos utilizados en la observación y medición de objetos celestes, así como en la obtención y análisis de datos astronómicos. Esta área de la astronomía abarca desde la creación de lentes, espejos, filtros, telescopios y cámaras hasta la elaboración de herramientas de análisis de datos y software especializado para el procesamiento de información para

todas las longitudes de onda del espectro electromagnético. La instrumentación astronómica es esencial para la exploración del universo, ya que permite la obtención de datos precisos y detallados de los objetos celestes, lo que permite a los astrónomos profundizar en nuestra comprensión del cosmos y su evolución. El desarrollo de nuevas técnicas de observación y análisis, así como el uso de datos de múltiples instrumentos, han permitido a los astrónomos hacer avances significativos en la comprensión de la naturaleza de la materia y la energía en el universo, así como en la búsqueda de planetas habitables y la comprensión de la evolución del universo, como es posible apreciar en las publicaciones científicas de la instrumentación astronómica, involucrando desde la relevancia de la interferencia satelital en las observaciones del telescopio espacial Hubble, observación de agujeros negros, análisis de misiones como DART y su impacto en el asteroide Dimorphos, así como observaciones de exoplanetas del telescopio espacial James Webb. En resumen, la instrumentación astronómica es un elemento crucial en la investigación astronómica y su constante evolución es esencial para seguir avanzando en nuestra comprensión del universo. El desarrollo de los instrumentos DDRAGUITO y DDRAGO permiten a México involucrarse en mayores ámbitos científicos, permitiendo estudiar áreas inexploradas para la ciencia mexicana.

Abordando lo mencionado anteriormente sobre cámaras y lentes con mayor detalle, resulta relevante mencionar lo que es una cámara o detector CCD y un filtro dicróico. El detector CCD, del inglés Charge Coupled Device, se encarga de la conversión de una señal luminosa en una señal eléctrica. Esta técnica introducida en 1969 es utilizada en astronomía desde el final de los años 70, proporcionando detectores en los dominios visible, infrarrojo y ultravioleta (UV) cercano. En la Figura 2.5 se aprecian los detectores CCD a emplear en el instrumento DDRAGO, analizando dos porciones diferentes del espectro electromagnético, dichos CCD son 4k x 4k Q7452-01.

Ahora bien, un filtro dicróico es un elemento con semejanza a un filtro pasabandas empleado en la electrónica, a grandes rasgos, su funcionamiento consiste en filtrar porciones del espectro electromagnético para así permitir el análisis específico de éste. Dos dicróicos pueden ser apreciados en la Figura 2.6.

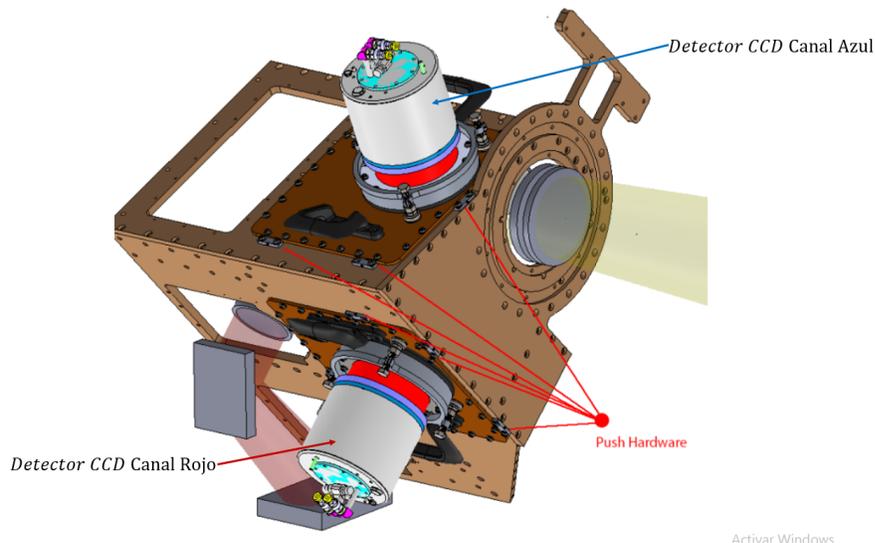


Figura 2.5: Detectores CCD empleados en el instrumento DDRAGO, nótese que analizan diferentes porciones del espectro electromagnético. Imágenes extraídas de [17].

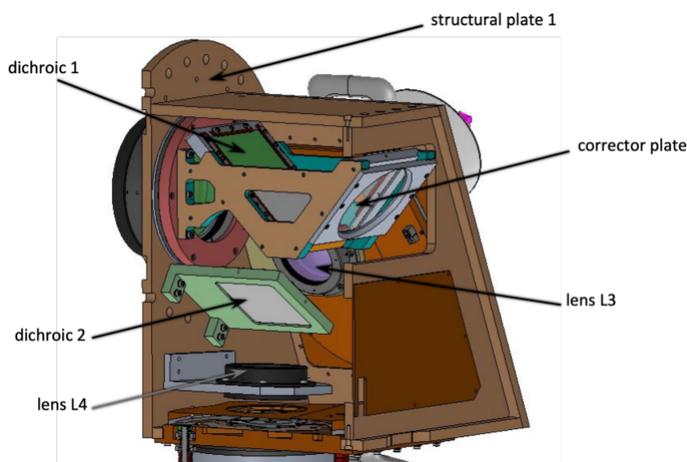


Figura 2.6: Torre del instrumento DDRAGO en donde se aprecia un dichroico (dichroic 1) así como uno adicional situado debajo de la torre (dichroic 2). Imágenes extraídas de [17].

Ambos elementos permiten analizar porciones específicas de interés del espectro electromagnético, porciones conocidas como bandas de luz. A continuación se definen ciertas bandas de relevancia para los fines del presente trabajo y facilitar su comprensión, las cuales son:

- Banda *gri*: La luz gri es una combinación de tres bandas de longitud de onda de la luz, la banda verde, la banda roja y la banda infrarroja cercana. La luz *gri* se refiere

específicamente a la combinación de estas tres bandas de luz.

- Banda *zy*: La banda *zy* es una combinación de dos bandas de filtro estrechas centradas en las longitudes de onda de 920 y 990 [nm], respectivamente. Se utilizan para estudiar la emisión de los cuerpos celestes en el infrarrojo cercano.
- Banda *grizy*: La luz *grizy* se refiere a una combinación de bandas de luz en el espectro visible, incluyendo el color gris y otros colores como el verde, el rojo y el azul. La luz *grizy* es una combinación de cuatro bandas de longitud de onda de la luz, la banda verde, la banda roja, la banda infrarroja cercana y la banda Y, que es una banda de longitud de onda más larga que la infrarroja cercana.
- Banda *JH*: "JH" se refiere a una banda de luz en el espectro infrarrojo cercano. La banda *JH* es una de las muchas bandas de luz infrarroja que se utilizan para estudiar objetos astronómicos, como estrellas y galaxias.

2.2. Metrología

2.2.1. Historia y descripción de metrología e ingeniería de metrología

El origen de la metrología se remonta a tiempos antiguos en su forma más elemental, sin embargo, adquiere su sentido actual en el siglo XIX con la revolución industrial, periodo en donde se presenta una transición de los modelos productivos de procesos manuales a mecanizados rompiendo con el paradigma de la producción artesanal a los modelos de producción masiva, dando pie a la aparición y establecimiento de fábricas en diversos tipos de industrias, siendo los pioneros en esto las industrias del hierro y textiles. Esto también provoca un cambio en los modelos productivos, pasando de un estilo de prueba y error del tipo artesanal a un modelo más especializado, en el cual solamente se aceptaban las partes buenas producidas y la capacidad del trabajador se medía con una relación de producción de piezas con el tiempo de trabajo. Por lo tanto, se volvió necesario establecer en qué consistía una buena pieza, llevando a la creación de galgas de inspección y la necesidad

de un inspector que tuviera la capacidad de decidir si una pieza producida era buena o no. Para ello, en 1913 el industrial norteamericano Henry Ford perfecciona el sistema de la línea de ensamblaje para producir automóviles, y para poder asegurar la calidad de sus productos dentro de grandes tasas de producción se crean nuevos métodos de inspección y control de calidad, los cuales forman las bases de la metrología moderna.

Metrología significa literalmente ciencia de la medición, proveniente de la palabra griega “metrologia” cuyo significado es medir. En la práctica se entiende como la ejecución, verificación y validación de estándares previamente establecidos. La metrología, en un contexto ingenieril conocida como ingeniería de metrología, se acota a mediciones de longitud, ángulos y otras cantidades que son expresadas en términos de éstos, involucrándose también en la inspección industrial. Además, ésta se involucra en el establecimiento de las unidades de medición y su reproducción en formato de estándares, asegurando la uniformidad en las mediciones, desarrollando nuevos métodos de medición, analizando la precisión de los métodos de medición, estableciendo la incertidumbre en las mediciones e investigando las causas de los errores de medición y la forma de eliminarlos. Además, está encargada de aplicar la ciencia de la medición en los procesos de manufactura. Provee un medio para poder asistir en la elección adecuada de los instrumentos de medición, su calibración y el control de calidad de los componentes manufacturados.

2.2.2. Tipos de metrología

La metrología se divide en tres subcampos básicos, los cuales son:

- *Metrología científica.* Establece los sistemas de calidad, sistemas de unidades, desarrollo de métodos y estándares de medición.
- *Metrología aplicada, técnica o industrial.* Aplicación de la metrología científica en procesos de manufactura y en la sociedad, garantizando los instrumentos de medición, calibrarlos y el control de calidad.
- *Metrología legal.* Reglamenta todo aquello que afecta a las mediciones, las unidades, los instrumentos y métodos de medición. Estos requisitos reglamentarios provienen

de la necesidad de proteger la salud, seguridad pública, el medio ambiente, entre otros.

2.2.3. Importancia del control dimensional en el proceso de diseño

El diseño es uno de los mayores aspectos de todas las ramas de la ingeniería. Todo objeto deberá ser diseñado adecuadamente para realizar las funciones requeridas por él, para ello, se prueba el funcionamiento de los elementos que constituyen al elemento diseñado para asegurar que cumplen con las expectativas del diseño y si el sistema funciona y se comporta adecuadamente en conjunto mediante mediciones de diversas índoles, involucrando análisis dimensionales. El realizar mediciones permite obtener datos importantes y necesarios para poder dar la mejor operación y mantenimiento del diseño, aspectos ingenieriles que de no ser cuidados y tratados apropiadamente causan que la función del sistema completo no sea la esperada.

Por lo tanto, las mediciones son requeridas para estudiar y entender el comportamiento de un objeto. Es en este punto en donde la metrología es una herramienta importante en el proceso de diseño, ya que permite la capacidad de extraer información de alta fidelidad que involucra la finalización de los productos, las condiciones de trabajo y el estado de los procesos en un entorno operacional. Resulta interesante citar las palabras de Lord Kelvin² (1824-1907) acerca de la importancia del análisis metrológico: “Cuando puedes medir lo que estás hablando y lo expresas en números, sabes algo al respecto; pero cuando tú no puedes medirlo, cuando no puedes expresarlo en números, tu conocimiento de él es de un escaso y tipo insatisfactorio. Puede ser el comienzo del conocimiento, pero apenas has avanzado en tu pensamiento a la etapa de la ciencia.” Adicionalmente, Galileo Galilei³ (1564 - 1642) desarrolló una de las primeras iteraciones del objetivo de la metrología, citando sus palabras: “Mide todo lo que sea medible, y haz que sea medible aquello que no lo es”.

En la industria de manufactura, las piezas normalmente se producen en volúmenes al-

²Cita de Lord Kelvin extraída de [15]

³Cita de Galileo Galilei extraída de [15]

tos. Se define el proceso de manufactura una única vez para producir piezas iguales muchas veces. El caso de la instrumentación astronómica es muy distinto, en el cual existen ocasiones en que ninguna pieza es exactamente igual y adicionando que dichos instrumentos son siempre instrumentos de alta precisión ocasiona que tengan tolerancias de diseño más pequeñas y estrictas, por lo que se añade un requisito de mucha importancia en el control de la calidad.

Es por ello que la metrología juega un papel importante en la infraestructura científica del mundo moderno y resulta de vital importancia para poder obtener una alta calidad y un gran control de la misma en los productos diseñados bajo este contexto. Por lo tanto, la metrología deberá estar firmemente involucrada en el proceso de diseño, dejando ver claramente que es un elemento clave inseparable de los procesos de manufactura.

2.2.4. Autoridades en metrología y jerarquía de regulaciones y estándares: ISO, ANSI, ASME, NOM, VIM, NPL y CSIR

La primera autoridad relevante a mencionar en el ámbito internacional es el Vocabulario Internacional de Metrología: Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM), es un documento que compila y estandariza los conceptos que rigen las ciencias de la medición. Organizado por el Comité Conjunto para las Guías en Metrología (JCGM por sus siglas en inglés de Joint Committee for Guides in Metrology), del cual forma parte entre otros la ISO (International Standard Organization por sus siglas en inglés), brinda los conceptos que deben de ser empleados en los laboratorios encargados de análisis metrológicos.



Figura 2.7: Miembros del Comité Conjunto para las Guías en Metrología,(JCGM). Imagen extraída de <https://bioanalisisaldia.com/tema-de-hoy/vim/>.

En parámetros nacionales, el 1 de julio de 1992 se publicó en el Diario Oficial de la

Federación la Ley Federal sobre Metrología y Normalización (LFMN), la cual ha representado un avance muy importante para el desarrollo del país en este ámbito. Para mayor referencia a los contenidos de dicha ley se puede consultar la obra de Escamilla, *Metrología y sus Aplicaciones*. Los frutos de dicha ley se analizarán posteriormente en la sección 3.2.4 Normas y lineamientos asociados a un análisis metrológico, con los cuales las normas se acoplan para cumplir con los estándares y acuerdos internacionales.

2.3. Sistemas de unidades

En el ámbito nacional, se adopta el Sistema Internacional de Unidades (SI) como norma oficial mexicana, la cual es la NOM-008-SCFI-2002: Sistema General de Unidades de Medida. El SI se fundamenta en siete unidades base: *metro*, *kilogramo*, *segundo*, *ampere*, *kelvin*, *mol* y *candela*, las cuales hacen alusión a longitud, masa, tiempo, corriente eléctrica, temperatura, cantidad de materia e intensidad luminosa, respectivamente. A partir de estas unidades base se obtienen 21 unidades derivadas. Para mayor información de ellas se puede consultar la norma citada previamente, o bien la obra de Escamilla⁴.

2.4. Instrumentos de medición de precisión

En un entorno científico, un instrumento de medición es una herramienta que es empleada para realizar la comparación de magnitudes físicas mediante un proceso de medición, de acuerdo con la obra de Dieter⁵. Como unidades de medida se utilizan objetos y sucesos previamente establecidos, como estándares o patrones, y de la medición resulta un número que es la relación entre el objeto de estudio y la unidad de referencia. El medio a través del cual el objeto de estudio permite ser caracterizado y estudiado a detalle es el instrumento de medición, el cual resulta ser básicamente una herramienta de comparación.

⁴Unidades base y derivadas se pueden consultar en las Tablas 1.1, 1.2 y 1.3 de la obra de Escamilla [7]

⁵Con base en lo estipulado en la obra de Dieter: Engineering Design [5]

2.4.1. Instrumentos de medición convencionales

Los instrumentos más usados para poder estudiar piezas manufacturadas son todos aquellos que permiten medir longitudes. Entre los instrumentos más conocidos y comúnmente empleados para tal efecto se encuentran el calibrador Vernier, el micrómetro y el reloj comparador.

Calibrador Vernier

El calibrador Vernier es un instrumento de precisión empleado para la medición de longitudes pequeñas, en el orden de centésimas de milímetros. Este instrumento de medición tiene la capacidad de medir longitudes y diámetros externos e internos, y profundidades, todo usando el mismo instrumento. Los calibradores generalmente emplean la escala en el nonio de $0.05 [mm]$, $0.02 [mm]$, $1/128 [in]$ y $0.001 [in]$. En la Figura 2.8 se aprecia un ejemplo de este instrumento.

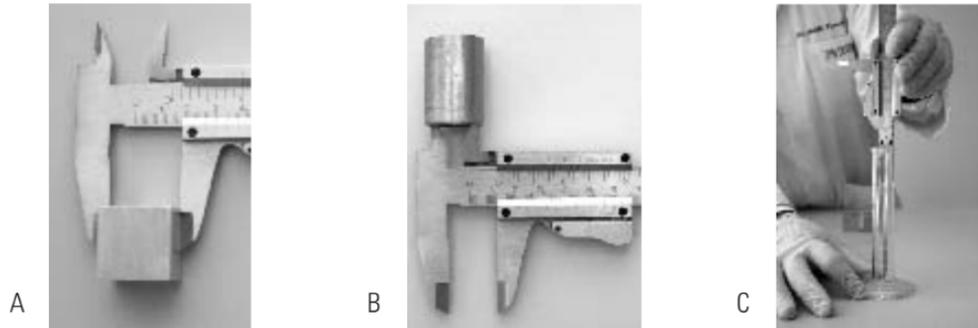


Figura 2.8: Secciones de medición de un calibrador Vernier. (A) Para medir dimensiones externas, (B) para medir dimensiones internas y (C) para medir profundidad. Imagen extraída de [7].

Micrómetro

Un micrómetro, también conocido como Palmer, es un instrumento de precisión empleado para la medición de dimensiones exteriores, interiores y profundidades. El principio de funcionamiento de un micrómetro se basa en un tornillo micrométrico que convierte el movimiento rotacional del tambor en un movimiento lineal del husillo debido al avance del paso de la rosca. Este instrumento sirve para medir el tamaño de un objeto con gran

precisión, en un rango del orden de centésimas o de milésimas de milímetro, $0.01 [mm]$ y $0.001 [mm]$, respectivamente. En la Figura 2.9 se aprecia un ejemplo de este instrumento.

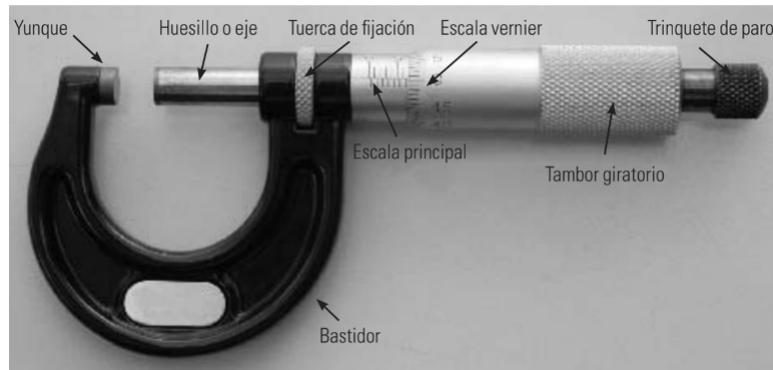


Figura 2.9: *Micrómetro y las partes que lo componen. Imagen extraída de [7].*

En la obra de Escamilla se exponen diversas técnicas de uso de un calibrador Vernier y de un micrómetro, así como ejemplos, para hacer el mejor uso de estos instrumentos y los datos proporcionados por ellos.

2.4.2. Máquina de Medición por Coordenadas (CMM)

De acuerdo con la norma ISO 10360-2: 1994⁶, una Máquina de Medición por Coordenadas (CMM del inglés Coordinate-measuring machine) es un dispositivo de medición fijo diseñado para tomar medidas de al menos tres desplazamientos lineales o angulares generados por la máquina. Al menos uno debe ser una medición lineal. En términos más generales, una CMM es un instrumento de medición directa que utiliza un puntero o palpador físico con el que el operador puede ir tocando el objeto a medir y enviando coordenadas a un fichero de dibujo. El puntero puede ir unido al sistema de registro de coordenadas mediante un brazo o codificador, o puede ser localizado y trazado por un sistema óptico. En la Figura 2.10 se puede apreciar una imagen de la CMM empleada, la cual es una Mitutoyo modelo Crysta-Plus M Series 7106.

Existen muchas ventajas al emplear una CMM, lo cual la convierte en una excelente opción para realizar mediciones de precisión, entre ellas está la respuesta en tiempo real de

⁶Definición de CMM extraída de la obra de Grous [9] con base en la norma ISO 10360-2: 1994.



Figura 2.10: *Máquina de Medición por Coordenadas Mitutoyo modelo 7106, modelo que se encuentra en el laboratorio de metrología del Instituto de Astronomía. Imagen extraída de [14].*

la medición en el orden de fracciones de segundos, la máquina es insensible a las variaciones de temperatura (dentro de los límites del lugar de análisis) y la prácticamente ausencia de fricción entre sus componentes causa la eliminación de la incertidumbre inicial. Por lo tanto, para piezas con geometría compleja, estas son las máquinas idóneas, ya que se puede medir prácticamente cualquier dimensión, desde profundidad, excentricidad, paralelismo y dimensiones lineales y angulares. Los resultados se obtienen como coordenadas, lo cual también facilita su uso para fines científicos, ya que se puede utilizar en conjunto con un sistema CAD o incluso comparar con el código máquina de una herramienta CNC.

2.5. Justificación del proyecto

2.5.1. SVOM

La misión SVOM, siglas que provienen del inglés Space-based multi-band astronomical Variable Objects Monitor, es una misión de cooperación entre China y Francia con la finalidad de estudiar las explosiones estelares más distantes, los destellos de rayos gamma (GRB). La misión consiste en un satélite que tendrá 4 instrumentos principales: el primero es un telescopio de ECLAIRs que detecta y localiza los GRB, el segundo es un telescopio de rayos X (MXT) para observar los GRB en el rango de los rayos X, el tercero es un monitor de GRBs (GRM) que miden el espectro energético de los destellos, y por último, el cuarto es un telescopio de luz visible (VT) que detecta y observa la emisión visible producida inmediatamente después de la emisión de rayos gamma. Todos estos instrumentos se aprecian en la Figura 2.11.

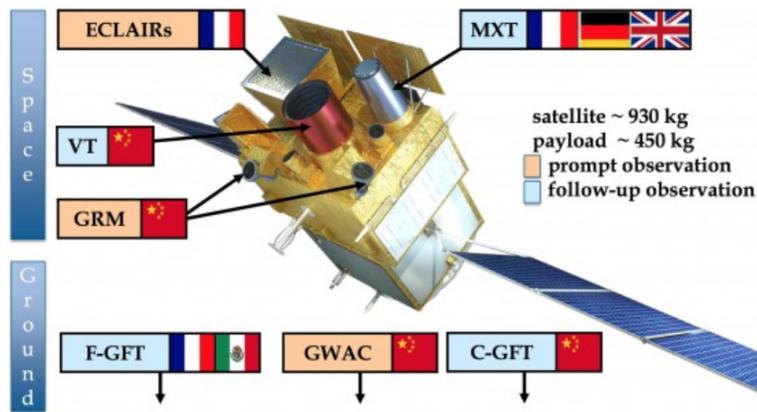


Figura 2.11: Instrumentos que integran a SVOM, nótese la participación mexicana en el segmento terrestre (ground). Imagen extraída de <https://www.svom.eu/en/the-svom-mission/>.

La misión SVOM tiene una sinergia entre observaciones espaciales y terrestres, las cuales se complementan mutuamente y permiten obtener resultados de mayor calidad. El satélite SVOM al detectar la emisión de GRBs la redistribuye entre la comunidad científica en tiempo real para refinar la localización del destello mediante observación terrestre. El equipo terrestre de la misión está compuesto por dos grandes segmentos: cámaras de campo amplio GWAC que estudian en el rango de la luz visible la emisión inmediata de

los destellos detectados, y los telescopios robotizados (GFT) que miden con gran exactitud las coordenadas de los GRBs. En este último punto, como se aprecia también en la misma Figura 2.11 en la sección Ground F-GFT, entra la labor de México con el telescopio COLIBRÍ.

2.5.2. COLIBRÍ

Como se mencionó previamente, hay una red de observación terrestre en estrecha colaboración con SVOM, que incluye el observatorio COLIBRÍ en el Observatorio Astronómico Nacional de México en San Pedro Mártir, Baja California. Este sitio es ideal para la observación en el hemisferio Norte, ya que la calidad del cielo es similar a la de Mauna Kea en Hawai.

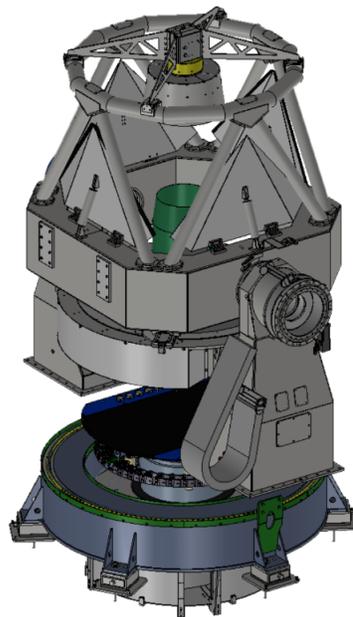


Figura 2.12: *El telescopio COLIBRÍ visto desde el archivo CAD empleado por el Instituto de Astronomía para su diseño. Imagen extraída de [17].*

En dicho observatorio se albergará un telescopio robótico con un espejo primario de 1.3 [m] equipado con un cámara pancromática la cual permite tener una mejor resolución espacial, dicho telescopio se puede apreciar en la Figura 2.12. COLIBRÍ tiene muchos objetivos en el entorno científico, entre los cuales destacan el seguimiento de alertas emitidas

para LSST, A-LIGO y Virgo, KM3Net, entre otros. Además, cumple su parte con la misión SVOM al seguir las alertas emitidas por GRBs, con la importante característica de COLIBRÍ de ser capaz de apuntar a cualquier fuente en el cielo en no más de 20 segundos con una alta precisión. Por sí mismo, COLIBRÍ no es capaz de obtener información alguna de la luz recibida, todo este proceso de análisis a detalle es realizado por el detector anexo al telescopio, el instrumento DDRAGO.

2.5.3. DDRAGO

DDRAGO es un instrumento que permita la observación del espectro de la luz en el intervalo óptico e infrarrojo cercano, compuesto de varios instrumentos, que observa el espectro de la luz visible en dos canales, uno rojo y otro azul mediante 4 CCD (del inglés Charge-Coupled Device) que es un dispositivo capaz de convertir una señal lumínica a una eléctrica. Es mediante dicho instrumento que COLIBRÍ es capaz de observar en el intervalo infrarrojo los GRB de alto desplazamiento al rojo, es decir, aquellos que ocurrieron durante los primeros mil millones de años del Universo y los resplandores de GRB oscuros que constituyen aproximadamente el 30 % de los eventos que se han detectado por razones que aún no están del todo claras. DDRAGO puede ser apreciado en la Figura 2.13. De esta forma al participar en la misión SVOM, COLIBRÍ junto con DDRAGO harán una gran contribución al país mejorando la comprensión de los destellos de rayos gamma y con ello, conocer mejor los primeros momentos del Universo.

2.6. Justificación de la tesis

Con base en lo expuesto anteriormente, se puede apreciar que la labor conjunta de SVOM, COLIBRÍ y DDRAGO tienen una gran sinergia y se requieren resultados de la más alta calidad al ser compartidos con la comunidad científica internacional. Por lo tanto, el objetivo de la presente tesis consiste en asegurar que los parámetros de diseño del instrumento DDRAGO sea la tarea de más alta relevancia. Dichos parámetros son de carácter cualitativo y cuantitativo, para el primer caso resulta en asegurar que las piezas manufacturadas para el instrumento cumplan con las características físicas necesarias para

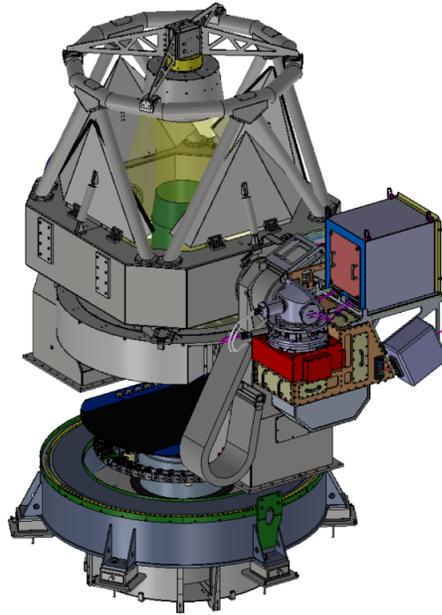


Figura 2.13: El telescopio COLIBRÍ junto al instrumento DDRAGO vistos desde el archivo CAD empleado por el Instituto de Astronomía para su diseño. Imagen extraída de [17].

poder funcionar de manera adecuada en conjunto; y en el segundo caso la labor consiste en asegurar con un análisis metrológico que las piezas manufacturadas estén dentro de las tolerancias estipuladas en el proceso de diseño, y que además, en un resultado conjunto al ser ensamblado el instrumento, éste esté dentro de los parámetros de deformaciones y desempeño que fueron definidos con base en los resultado del análisis de las deformaciones mediante el método de los elementos finitos en las etapas finales del diseño mecánico del mismo instrumento.

Cumpliendo con las especificaciones, parámetros y desempeño esperados para el instrumento mencionados anteriormente, se podrá dar una gran certeza de que el instrumento tendrá una operación y resultados de la más alta calidad y congruencia, ahorrando así tiempo y recursos de correcciones posteriores *in situ*. Además, con una operación exitosa del instrumento DDRAGO, como se mencionó anteriormente, nuestra nación se permitirá desempeñar en mayores ámbitos científicos al ahondar en zonas con un gran potencial de descubrimiento y explotación intelectual; lo que hará de México una nación aún más presente en materia científica y astronómica.

Capítulo 3

Marco Teórico

3.1. Propiedades mecánicas del aluminio y sus aleaciones

El aluminio es un metal no ferroso que posee diferentes propiedades¹ físicas y mecánicas por las cuales destaca sobre otros metales, entre las cuales se encuentran su relación existente entre su resistencia mecánica y peso, su resistencia a la corrosión, y su alta conductividad térmica y eléctrica. La densidad de este metal en su estado puro es de aproximadamente $2770 [kg/m^3]$ y una resistencia a la tensión de aproximadamente $90 [MPa]$; características que al ser comparadas con las del acero², una densidad de $7750 [kg/m^3]$ y una resistencia a la tensión de $350 [MPa]$, ubicando al aluminio con una rigidez con un valor de un tercio de la del acero, pero con igualmente una reducción en peso de alrededor de 3 veces. Cabe mencionar además que el aluminio puede obtener mejoras en sus propiedades al ser trabajado en frío y al alearse con otros materiales, presentando en un módulo de Young (módulo de elasticidad) de $71.7 [GPa]$.

Los elementos comúnmente utilizados para realizar aleaciones con aluminio son cobre, silicio, manganeso, magnesio y zinc. Para el caso de la estructura del instrumento DDRA-

¹Propiedades del aluminio y comparaciones extraídas de Shigley [3].

²Propiedades generales del acero extraídas de MatWeb, URL: <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?bassnum=MS0001&ckck=1>

GO, se eligió una aleación denominada Alumold F500, cuyos elementos aleantes son zinc, magnesio y cobre. La equivalencia de dicha aleación recae en las aleaciones de las serie AISI 7XXX y la serie IS 5000, específicamente con la denominación IS5615 cuyas propiedades³ físicas y mecánicas se resumen en una densidad de $2820 [kg/m^3]$, un módulo de Young de $73 [GPa]$ y una resistencia a la tensión en un rango de 435 a 540 $[MPa]$, dependiendo el espesor a emplear. Además de sus buenas propiedades mecánicas, al compararse con las elementales del aluminio y las del acero, esta aleación posee una buena maquinabilidad y pulido, por lo que su uso además de permitir mayores sollicitaciones, otorga la capacidad de un rápido y mejor maquinado.

3.1.1. Influencia de la temperatura en el comportamiento mecánico del aluminio

Es importante mencionar los efectos que producen los cambios de temperatura en un metal, en especial al someterse a un análisis dimensional de precisión. Los materiales en general reaccionan al cambio de temperatura y humedad, manifestado en una dilatación o contracción, dependiendo el caso. Este fenómeno está definido mediante la ecuación siguiente:

$$\Delta L = L \times \alpha \times \Delta T \quad (3.1)$$

En donde L es la longitud de interés, α es el coeficiente de expansión térmica del material y Δ es el cambio de temperatura. Para el caso particular del presente trabajo, el aluminio tiene un coeficiente de expansión térmica de $\alpha = 23.7[\mu m/m \text{ } ^\circ C]$ para 20 - 100 $[\text{ } ^\circ C]$, lo que significa que en una dimensión de 1 [m], con un incremento de 1 $[\text{ } ^\circ C]$, la dimensión tendrá un incremento de 23.7 $[\mu m]$.

³Propiedades de la aleación Alumold F500 extraídas de MatWeb, URL: <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=c1b3d09d78ce4b9bae4f3f2122042f60&ckck=1>

3.2. Fundamentos teóricos y prácticos sobre metrología

3.2.1. Principios y fundamentos básicos de la ingeniería de metrología

Inspección

La inspección es el procedimiento en el cual una característica física, como una dimensión, es examinada para evaluar si ésta satisface la especificación de diseño o estándar previamente seleccionado, tomando especial cautela con el término estándar, el cual es definido propiamente por Escamilla⁴, definición sugerida para eliminar dudas al respecto. Para que el cometido de la inspección sea alcanzado, las dimensiones de los componentes deben estar dentro de los límites permisibles para obtener los requerimientos estipulados previamente por el diseñador. La medición es una parte integral de la inspección. Muchos métodos de inspección se basan en técnicas de medición, es decir, medir la dimensión real de una parte, mientras que otros emplean el método de medición por galgas meramente comparativo. Si se encuentra que la pieza está dentro de los límites permisibles, se acepta; de lo contrario, se rechaza. A grandes rasgos, la labor de la inspección es determinar si la pieza en análisis es aceptada o no.

Exactitud y precisión

La exactitud y precisión son términos empleados frecuentemente al hablar de análisis dimensionales y metrología en general, pero además, es muy común que ambos términos sean coincebidos erróneamente o bien, se empleen como sinónimos, lo cual significa un error muy grave.

Exactitud

Para ello, ambos términos serán descritos con base en las definiciones otorgadas por el Vocabulario Internacional de Metrología (VIM). En primer lugar, la exactitud de la

⁴Definición y uso del término estándar consultado de la obra de Escamilla: Metrología y sus aplicaciones [7].

medición es el grado de concordancia de la dimensión medida con su verdadera magnitud, en otras palabras, la cantidad por la cual el resultado difiere del valor real o como la proximidad del valor medido a su valor real, a menudo expresado como un porcentaje de error. El valor verdadero puede definirse como la media del número infinito de valores medidos cuando la desviación promedio debida a los diversos factores contribuyentes tiende a cero. En la práctica, el conocimiento del valor verdadero no es posible debido a las incertidumbres del proceso de medición y, por lo tanto, no puede ser determinada experimentalmente. Además, existen dos términos relevantes relacionados con la exactitud al requerir mayores valores de ésta: sensibilidad y consistencia. La sensibilidad es la capacidad del equipo de medición para detectar pequeñas variaciones en la medición. El grado de sensibilidad determina la exactitud del instrumento. Adicionalmente, la consistencia se presenta cuando una serie de mediciones sucesivas obtenidas de un instrumento no presentan variación alguna. Un instrumento de medición de alta exactitud posee ambas cualidades, consistencia y sensibilidad. Un instrumento que es a la vez consistente y sensible no necesita ser exacto, porque puede haber sido calibrado erróneamente. Los errores de medición serán constantes en dichos instrumentos, que pueden ser abordados mediante una calibración.

Precisión

Por otra parte, la precisión es la capacidad de repetibilidad de un proceso de medición, a la capacidad de reproducir consistentemente una misma medición. Ahora bien, la habilidad de un instrumento de medición para repetir los mismos resultados al medir la misma cantidad se conoce como repetibilidad, la cual se abordará posteriormente. Esta característica tiene una naturaleza aleatoria y por sí misma no asegura la exactitud de una medición. Si un instrumento no es preciso, éste otorgará diferentes resultados para la misma dimensión para mediciones repetidas. En la mayoría de las mediciones, la precisión adquiere una mayor relevancia que la exactitud. Ejemplos de ambas características de una medición pueden ser identificadas claramente en la Figura 3.1.

Resulta de carácter esencial reconocer la diferencia entre precisión y exactitud, con el propósito de dar una mejor perspectiva entre ellas, existen dos términos que resultan

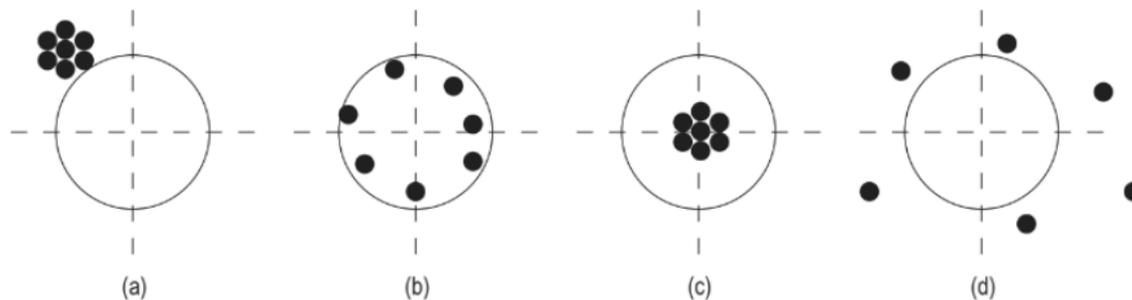


Figura 3.1: Ejemplificación de exactitud y precisión (a) Preciso pero inexacto, (b) Exacto pero impreciso, (c) Preciso y exacto, (d) Impreciso e inexacto. Imagen extraída de [15].

relevantes dentro de los principios básicos de la ingeniería de metrología. Estos términos son repetibilidad y reproducibilidad de los resultados de las mediciones, que junto al término exactitud, permiten describir de mejor manera la confiabilidad de una medición.

Repetibilidad

Éste concepto se auxilia de un término que será analizado más a detalle en la sección 3.2.3 Conceptos generales de medición, el cual es el mensurando. Este mensurando es básicamente la característica física que será sometida al proceso de medición. La repetibilidad es la proximidad de la concordancia entre los resultados de las mediciones sucesivas del mismo mensurando, mencionado anteriormente, con las mediciones realizadas con la aplicación de la totalidad de las condiciones de repetibilidad, las cuales se mencionan a continuación:

- Emplear el mismo procedimiento de medición y observador.
- Emplear las mismas muestras de análisis.
- Emplear el mismo instrumento de medición bajo las mismas condiciones de medición.
- Realizar las mediciones en el mismo lugar.
- Realizar la repetición de las mediciones dentro de periodos de tiempo cortos.

Reproducibilidad

Continuando, la reproducibilidad se define como la concordancia existente entre los resultados de las mediciones del mismo mensurando con las mediciones realizadas al provocar

un cambio en las condiciones del proceso de medición. Dichas condiciones del proceso de medición deben estar claramente especificadas para que la reproducibilidad de las mediciones sean válidas. Ejemplos de dichas condiciones se muestran a continuación:

- Principio de medición.
- Método de medición.
- Observador.
- Instrumento de medición.
- Patrón de referencia.
- Lugar.
- Condiciones de uso.
- Tiempo.

Ahora bien, retomando la Figura 3.1, es posible observar que la precisión es una característica dependiente de una serie de mediciones, no de una única medición. Comúnmente, las mediciones individuales se distribuyen alrededor de un valor promedio y la precisión es la concordancia existente entre los valores medidos, la diferencia existente entre el valor promedio de estas mediciones el valor real del componente analizado es denominado como error, expresado como la diferencia entre el valor indicado y el valor real de la cantidad medida, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$|\delta| = E = V_m - V_r \quad (3.2)$$

Donde E es el error, también conocido como error absoluto, V_m es el valor medido y V_r es el valor real. Adicionalmente, existe el concepto de error relativo, el cual se expresa como la relación entre el error absoluto con el valor verdadero de lo que se está midiendo. La precisión de un instrumento se puede expresar como un porcentaje de error, y esto se expresa de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\delta = \%error = \frac{V_m - V_r}{V_r} \times 100 \quad (3.3)$$

La exactitud de un instrumento siempre es evaluada en términos del error, siendo un instrumento más exacto aquél que disponga del menor error. Estos errores serán analizados a detalle en secciones posteriores. Para mantener la calidad de aquello que se fabrique, la precisión de la medición es una característica importante. Dado que la exactitud de la

medición siempre está asociada a algún error, es fundamental diseñar o elegir los equipos de medida y métodos utilizados para la medición de tal manera que se minimice el error de medición.

3.2.2. Objetivos de un análisis dimensional

El objetivo básico de cualquier sistema de medición resulta en ofrecer la exactitud y precisión requerida con un costo mínimo. Ahora bien, los objetivos de un análisis dimensional en conjunto con las mediciones son:

- Asegurar que los componentes desarrollados son evaluados exhaustivamente y son diseñados dentro del proceso, y que los recursos necesarios para poder realizar mediciones requeridas existan en el lugar de desarrollo y manufactura.
- Asegurar uniformidad en las mediciones.
- Realizar estudios de las capacidades de los procesos para poder alcanzar mejores tolerancias de los componentes.
- Evaluar que las capacidades de los instrumentos de medición disponibles son los adecuados para las mediciones requeridas.
- Asegurar inspecciones dimensionales con una relación costo efectividad óptima en conjunto con los instrumentos y recursos disponibles.
- Adoptar técnicas de control de calidad para minimizar desperdicios y rediseños.
- Establecer procedimientos de inspección desde la etapa de diseño, para así estandarizar los métodos de medición.
- Calibrar los instrumentos de medición de manera regular para poder mantener su exactitud al medir.
- Resolver problemas de medición que puedan aparecer cuando el producto o componente sea utilizado o adquirido.
- Diseñar calibres, galgas u objetos especiales requeridos para realizar inspecciones.

- Investigar, evaluar y eliminar fuentes de errores e incertidumbre en las mediciones.

3.2.3. Conceptos generales de medición

El objetivo principal de una medición es determinar la calidad del objeto manufacturado. Para ello, se deben considerar diferentes requerimientos para evaluar la conformidad del componente con las especificaciones de calidad, que para ello, se deberán adquirir datos cuantitativos del objeto físico y compararse con una referencia determinada. Los tres elementos básicos significativos de una medición, los cuales pueden ser apreciados en la Figura 3.2, son:

- Mensurando, una cantidad física como una longitud, peso o ángulo a medir.
- Comparador, para comparar al mensurando con un estándar conocido para la evaluación.
- Referencia, la cantidad física o propiedad para la cual se harán las comparaciones cuantitativas, comparaciones aceptadas internacionalmente.

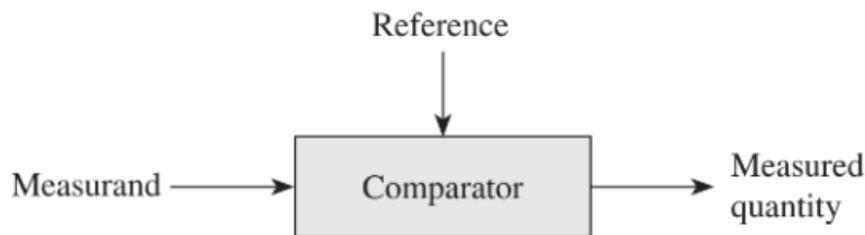


Figura 3.2: Elementos de una medición. Imagen extraída de [15].

Estos tres elementos descritos anteriormente serán considerados para explicar la medición efectuada usando una referencia fija calibrada, siendo esta última característica de vital importancia. Resulta en un carácter esencial que el equipamiento o instrumento empleado para realizar la medición esté adecuadamente validado. El proceso de validación de las mediciones para determinar si la cantidad física dada se ajusta al estándar de medición empleado, referencia o patrón nacional o internacional determinado, se conoce como trazabilidad del estándar. Es importante que la trazabilidad sea compartida con el beneficiario

del análisis dimensional. La calibración es el medio para conseguir la trazabilidad.

Uno de los aspectos esenciales de la metrología es que los resultados obtenidos de la medición sean significativos, y para conseguirlo, la calibración de los instrumentos empleados es absolutamente necesaria. El objetivo principal de todo proceso de calibración es asegurar que el instrumento de medición funcionará adecuadamente para alcanzar sus objetivos de exactitud, como se mencionó anteriormente.

El factor limitante del proceso de calibración es la repetibilidad, esto debido a que es el único error característico que no se puede calibrar fuera del sistema de medición y, por lo tanto, se reduce la precisión general de la medición. De este modo, la repetibilidad puede además ser conocida como la mínima incertidumbre que existe entre el mensurando y el estándar. Es importante mencionar que las condiciones en las que se efectúa la calibración del instrumento deberán ser las mismas en las que se operaría el instrumento de manera cotidiana. Cuando se pretende lograr una mayor precisión, se vuelve imperativo conocer todas las fuentes de error para que puedan ser evaluadas y controladas.

3.2.4. Normas y lineamientos asociados a un análisis metrológico

En el ámbito nacional existen tres tipos de normas, las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), las Normas Mexicanas (NMX) y las Normas de Referencia (NRF). La metrología se encuentra normalizada para satisfacer los acuerdos y requerimientos internacionales para considerar correctas las labores asociadas a ella. Existen cuatro normas mexicanas de extrema relevancia en este ámbito, las cuales se enlistan a continuación:

- NMX-Z-055: 1996. IMNC. Metrología. Vocabulario de términos fundamentales y federales (Vocabulario Internacional de Metrología, VIM).
- NOM-008-SCFI-2002. Sistema General de Unidades de Medida.
- NMX-EC-17025-IMNC. 2006. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración.

- NMX-CH-140-IMNC-2002. Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones.

Con base en la sugerencia realizada por Escamilla⁵ en su obra, estas son las normativas y elementos legales que cualquier metrólogo o no metrólogo, sin importar su grado de involucramiento en el análisis, debe de seguir al realizar mediciones para estar en sintonía con los acuerdos internacionales en materia y actuar como una base competente para consulta y apoyo al realizar sus labores.

3.2.5. Errores en medición

Al realizar mediciones de magnitudes físicas, es importante tomar en cuenta que los valores obtenidos no son completamente exactos, debido a que están permanentemente asociados con un cierto grado de incertidumbre. Así, para poder analizar los datos de la medición, se debe entender la naturaleza de los errores asociados con la medición. Por lo tanto, investigar dichos errores para conocer sus orígenes es una tarea importante, debido a que teniendo conocimiento de ellos se pueden controlar y posiblemente, eliminar. Existen dos categorías de errores en las mediciones: los errores sistemáticos y los aleatorios.

Error sistemático o controlable

Un error de sistemático es aquél en el que se desvía una cantidad fija el valor real de la medición, por lo cual, afecta directamente a la exactitud de la medición. Este tipo de error son controlables tanto en su magnitud como en su dirección y puede ser evaluado y minimizado si es analizado adecuadamente. Para ello, es importante conocer el origen u orígenes de dicho error, así como si su suma algebraica con el valor real resulta significativa respecto a las tolerancias de la manufactura previamente estipuladas.

Dentro de este tipo de error se encuentran adicionalmente las desviaciones consecuentes de la histéresis del instrumento de medición y las condiciones ambientales del lugar de

⁵Recomendación extraída de la obra de Escamilla [7]

análisis. La primera es definida como la diferencia entre el valor mostrado por el instrumento de medición cuando el valor de la magnitud física se mide en orden ascendente y descendente, y para minimizar sus efectos se puede hacer uso de las curvas de calibración. Un ejemplo de la histeresis se puede apreciar en la Figura 3.3⁶.

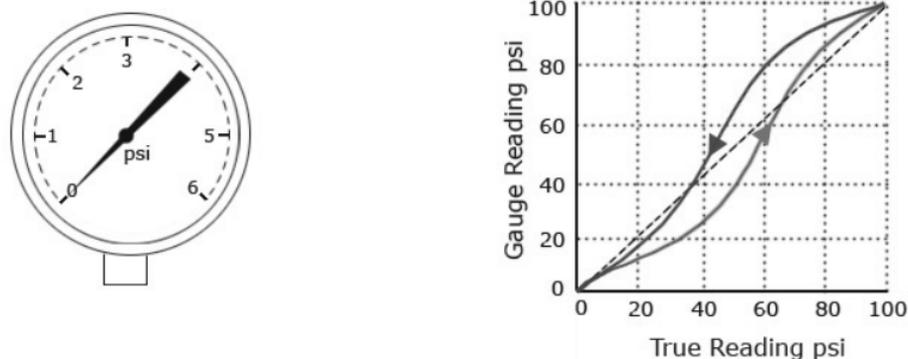


Figura 3.3: Efectos de la histeresis de un manómetro, notando cómo las lecturas otorgan diferentes mediciones al realizar la medición en un modo ascendente y descendente, mostrado en un gráfico que relaciona las mediciones de presión como una función del valor real de la medición. Imagen extraída de *Instrumentation Today*

Como se mencionó anteriormente, un parámetro adicional de importancia son las condiciones del ambiente de trabajo. Dichas condiciones se recomienda mantener, en la medida de lo posible, a los valores aceptados internacionalmente de una temperatura y presión estándar de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $760\text{ }[mmHg]$ ($101325\text{ }[Pa]$ o $1\text{ }[atm]$), respectivamente. Además, es conocido que las condiciones de humedad del ambiente de trabajo, la humedad relativa, tienen un efecto en las propiedades de los materiales, instrumentos y partes que se vayan a estudiar.

Una diferencia en $10\text{ }[mmHg]$ puede causar errores en la dimensión medida de la pieza, pero aquel factor que tiene la mayor importancia en el grado de afectación a la medición es la temperatura. Un pequeño incremento de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ resulta en un incremento de $0.3\text{ }[\mu m]$, lo que resulta substancial en casos de mediciones de precisión y exactitud, que para los efectos del presente trabajo resultan relevantes. Estos cambios de temperatura afectan tanto al instrumento de medición, como a la pieza a medir. Para contrarrestar esto, los

⁶Imagen extraída de *Instrumentation Today*, URL: <http://www.instrumentationtoday.com/instrument-parameters/2011/07/>

instrumentos de medición están calibrados a la ya mencionada temperatura estándar de 20 [°C] y utilizan un factor de corrección con base en una temperatura de trabajo y la ecuación que describe la dilatación térmica de un material, la cual se mostró en secciones anteriores. Estos incrementos de temperatura tienen su origen en la radiación emitida por las fuentes de luz empleadas en la zona de trabajo, luz solar y la energía emitida por el cuerpo humano de los operadores y la maquinaria existente en la misma zona.

Error aleatorio

Cuando se realiza una serie de mediciones repetidas en una pieza en condiciones similares, los valores o resultados de las mediciones varían. Las causas específicas de estas variaciones no pueden determinarse, ya que estas variaciones son impredecibles e incontrolables por el experimentador y son de naturaleza aleatoria, son de magnitud variable y pueden ser positivos o negativos, afectando directamente a la precisión de las mediciones. Cuando éstas son graficadas, se puede observar una distribución normal de los datos, también conocida como distribución Gaussiana, la cual se puede apreciar en la Figura 3.4.

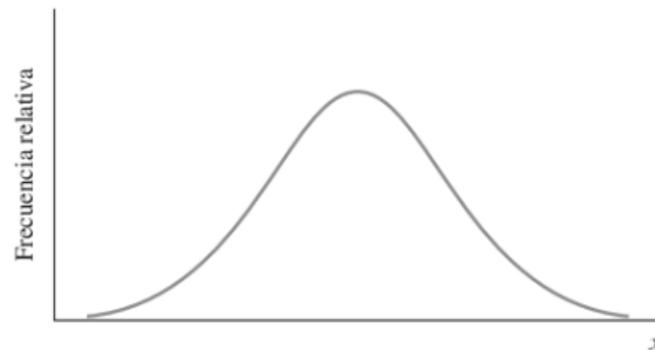


Figura 3.4: Ejemplo didáctico de una distribución normal o Gaussiana, en ocasiones también conocida como distribución en forma de montículo. Dicha gráfica relaciona la frecuencia de aparición de un cierto valor x dentro de un conjunto de datos analizados, y dicho conjunto está caracterizado por su media aritmética μ y su desviación estándar σ . Imagen extraída de [13].

Los errores aleatorios pueden ser evaluados con estudios estadísticos, y para obtener resultados más enriquecedores se deberán realizar un gran número de series de mediciones, obteniendo de dichas mediciones el valor promedio y su desviación estándar. El valor promedio es importante debido a que los errores presentados estarán dispersos alrededor de dicho valor, se conoce con la letra griega mu μ o bien con una variable testada que indica

el valor promedio, por ejemplo \bar{x} . La desviación estándar es una medida de la dispersión de las mediciones realizadas respecto a la media aritmética. Ésta se conoce con la letra griega sigma σ . Este análisis estadístico será analizado a mayor detalle en la sección subsecuente.

3.2.6. Análisis del error

Como se detalló en secciones anteriores, el fin último de un análisis metrológico es proveer un resultado el cual sea el más cercano posible al valor verdadero de la magnitud física que se esté midiendo. Para lograr esta cercanía de valores, se deberán realizar análisis para poder reducir los errores presentados en la medición tanto como sea posible. Como fue mencionado anteriormente, los errores sistemáticos son analizados mediante implicaciones en la calibración o bien fenómenos ambientales no tomados en cuenta previamente, aplicando correcciones respectivas y apropiadas, mientras que los errores aleatorios son analizados de manera puramente estadística, estos errores son los más relevantes para el análisis de error. De acuerdo con la obra de Grous⁷, los errores más comunes identificados en laboratorios de metrología son:

- Repetibilidad.
- Resolución.
- Reproducibilidad.
- Confiabilidad.
- Linealidad.
- Veracidad.
- Sensibilidad.
- Exactitud.
- Precisión.

De todos los elementos sugeridos por Grous para análisis de error, se seleccionaron la repetibilidad, precisión, resolución, confiabilidad, veracidad y exactitud. A continuación, se presentan las definiciones de aquellos elementos seleccionados con base en el Vocabulario Internacional de Metrología VIM (en inglés, International Vocabulary of Metrology, también abreviado VIM) y una breve descripción de su análisis con base nuevamente en la obra de Grous.

⁷Errores comunes identificados extraídos de [9]

Repetibilidad

También conocida como el valor mínimo de la precisión⁸, la repetibilidad es la dispersión presentada por mediciones independientes obtenidas bajo las condiciones de repetibilidad mencionadas anteriormente en la sección 3.2.1. Es importante mencionar que la repetibilidad debe de ser una de las primeras características en ser evaluada debido a su gran influencia en la significancia de otros elementos a analizar.

La repetibilidad es evaluada al analizar el dominio de estudio con k número de muestras, al repetir un número n de mediciones para cada uno de ellos. De acuerdo con Grous, la desviación estándar de la repetibilidad, parámetro empleado para evaluarla, se obtiene siguiendo la ecuación:

$$S_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (3.4)$$

Análisis de la precisión

Como fue mencionado en la sección 3.2, la precisión describe la cercanía entre las mediciones realizadas sobre una cantidad física específica. Es importante mencionar que la precisión está relacionada con dos aspectos o características adicionales: la exactitud y la confiabilidad, siendo la segunda con la que comparte una relación más estrecha que será abordada posteriormente. Un instrumento de medición, así como sus mediciones, se considera válido solamente si cumple con estas dos condiciones.

Ahora bien, retomando la precisión y su análisis en un entorno práctico, ésta establece el error máximo general de las mediciones. Para visualizarlo e interpretarlo, se deberá analizar la altura de la distribución normal que presentan las mediciones, como se puede apreciar en la Figura 3.5.

Es importante mencionar que este análisis no es un parámetro meramente cualitati-

⁸Definición extraída de la obra de Grous [9] con base en la norma ISO 3534-1 e ISO 5725-1.

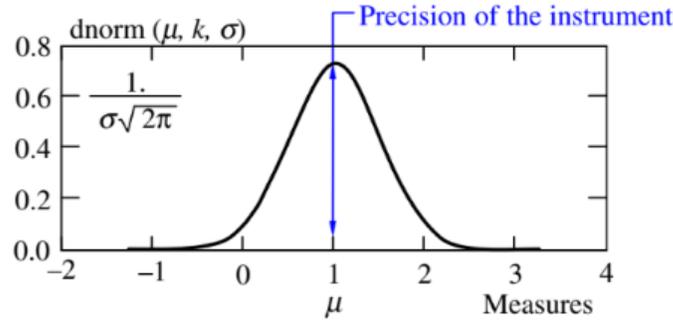


Figura 3.5: Ejemplo de la curva de precisión de una serie de mediciones, demostrando en azul la altura de la distribución normal como la precisión del instrumento. Imagen extraída de [9].

vo, definir la precisión de esta forma no tendría caso alguno en un análisis metrológico. Haciendo referencia a la Figura 3.6, se pueden apreciar dos ejemplos de distribuciones normales, denotando que ambas son diferentes debido a su diferencia de alturas. Una forma de caracterizar dicha diferencia es empleando la desviación estándar, dando un valor numérico para poder definir cuantitativamente la dispersión de los gráficos respecto a la media poblacional, lo que a su vez al definir la separación de los puntos, permite obtener una medida indirecta de la altura de la distribución, ya que al estar los valores menos dispersos respecto a la media, se agruparán en mayor cantidad al centro provocando un incremento en la frecuencia de aparición y, por ende, en la altura de la distribución.

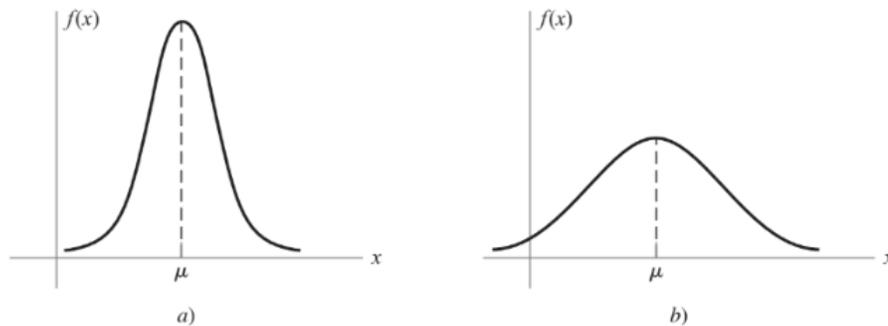


Figura 3.6: Ejemplo de una distribución normal con mayor y menor altura, para (a) la altura es mayor, implicando que la desviación estándar de la muestra es menor; para (b) la altura es menor, implicando en este caso una desviación estándar mayor. Imagen extraída de [3].

Análisis de la confiabilidad

La confiabilidad es un parámetro que está muy asociado a la repetibilidad y a la precisión, pero no debe confundirse con ninguno de ellos. El VIM define la confiabilidad⁹ como la capacidad del instrumento de medición para otorgar mediciones muy cercanas entre sí durante repetidos procesos de medición bajo las mismas condiciones de análisis. Es por ello que se puede llegar a confundir tanto con la repetibilidad en primer lugar, y en segundo con la precisión debido a su significancia cuantitativa al analizarla en primer lugar, representada como se muestra a continuación en la Figura 3.7, en la que se aprecia que nuevamente la altura de la distribución normal (en este caso, aunque es común que se presente) es el parámetro cualitativo que permite darle la característica de confiable a la serie de mediciones realizadas.

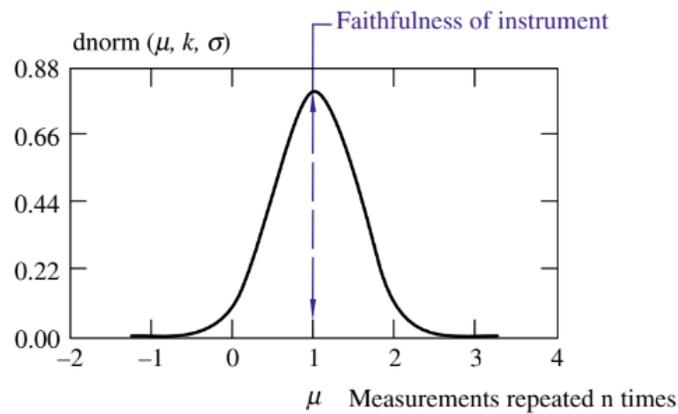


Figura 3.7: Confiabilidad de una serie de mediciones representadas en una distribución normal, nótese que la línea que denota la altura de la distribución no es continua, lo que denota que el instrumento de medición es confiable. Imagen extraída de [9].

La confiabilidad define la dispersión de los resultados, pero no se analiza como la repetibilidad o la precisión mediante la desviación estándar de la distribución poblacional. En este caso, para otorgarle la característica cuantitativa a la confiabilidad, de las mediciones realizadas se obtiene el valor máximo y mínimo de ellas, y los errores limitantes de la confiabilidad se expresan de acuerdo con la ecuación siguiente:

⁹Definición de confiabilidad extraída de la obra de Grous [9] con base en el Vocabulario Internacional de Metrología (VIM).

$$E_{max} = \pm \left[\frac{V_{max} - V_{min}}{2} \right] \quad (3.5)$$

Donde $V_{max/min}$ es el valor máximo y mínimo, respectivamente, de la serie de mediciones.

Análisis de la resolución

La resolución es una representación cuantitativa de la menor diferencia significativa perceptible por el instrumento de medición empleado entre dos elementos y que sean diferenciables por el proceso de medición elegido. El análisis estadístico de la resolución permite estimar el valor más probable de la cantidad física medida, es decir, el mensurando, y permite además identificar los límites de la incertidumbre.

Para ello, se analiza una misma cantidad física X un número n de veces, otorgando resultados x_1, x_2, \dots, x_n , con una media definida por la letra griega mu μ (cabe mencionar que como se analizó anteriormente, puede ser representada por la variable de interés testada, \bar{x} por ejemplo) y una dispersión indicada por la desviación estándar σ y la varianza σ^2 . Lo que resulta pertinente de analizar la resolución es, y a sugerencia de Grous en su obra, la incertidumbre (denominada en este caso por la letra griega delta δ seguida de la variable a la que se le asocia la incertidumbre, x) se extrae de este mismo gráfico mediante la consideración de ser tres veces la desviación estándar de la distribución, es decir:

$$\delta x = 3\sigma \quad (3.6)$$

Análisis de la exactitud

Como fue mencionado en la sección 3.2, la exactitud refleja la cercanía existente entre el valor de la medición, o mediciones, recién realizada y el valor real. Un ejemplo de un gráfico que ejemplifica la exactitud de una serie de mediciones se aprecia en la Figura 3.8

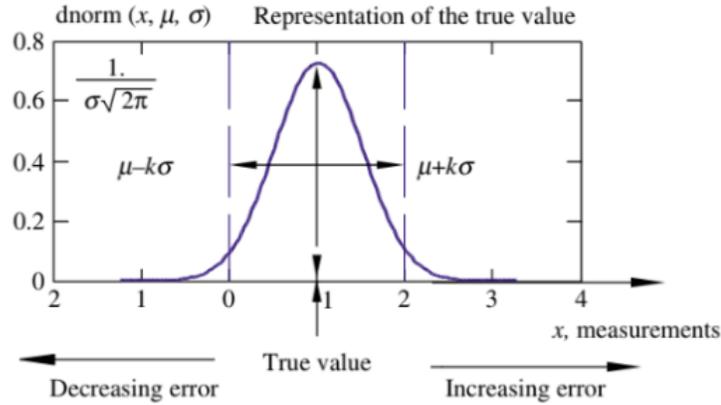


Figura 3.8: Representación estadística de la exactitud de una serie de mediciones caracterizada por la media y el valor real de la cantidad física sometida a medición. Imagen extraída de [9].

3.2.7. Análisis de la incertidumbre

Al realizar una medición de una cantidad física se extraen dos aspectos en realidad, el primero es la mejor estimación del valor del mensurando, y en segundo una estimación de la incertidumbre de esa medición. De acuerdo con el VIM¹⁰, la incertidumbre es un parámetro que caracteriza la dispersión de los valores que pueden ser atribuidos razonablemente al mensurando, pero esto no se debe confundir con el término precisión analizado previamente. El concepto de incertidumbre es mucho más amplio que el de precisión, añadiendo los elementos sistemáticos del error y diversas contribuciones adicionales naturales del mensurando y del principio, método y procedimiento de medición, siendo estos tres últimos los aspectos determinantes en el valor de la incertidumbre de la medición. Por lo tanto, estos últimos deberán ser correctamente identificados previamente al llevar a cabo un análisis de la incertidumbre. Adicionalmente, existen fenómenos no cuantificables que influyen en la incertidumbre, siendo lo más recomendable mitigarlos apenas sean identificados.

Para realizar el análisis de la incertidumbre asociada al proceso de medición, se consultará la *Guía para estimar la incertidumbre de la medición* publicada por el Centro Nacional de Metrología (CENAM), guía que propone el procedimiento mostrado en la Figura 3.9,

¹⁰Definición de incertidumbre extraída de la obra del CENAM [4], con base en el Vocabulario Internacional de Metrología (VIM).

así como en mayor medida lo expuesto en la obra de Grous *Applied Metrology for Manufacturing Engineering* en la cual se dispone de un modelo robusto el cual será empleado para obtener la incertidumbre asociada al proceso de medición del análisis dimensional de la estructura del instrumento DDRAGO, siguiendo la recomendación de la obra del CENAM para emplear otras fuentes de consulta en caso de mayor profundidad en alguna parte del análisis metrológico.

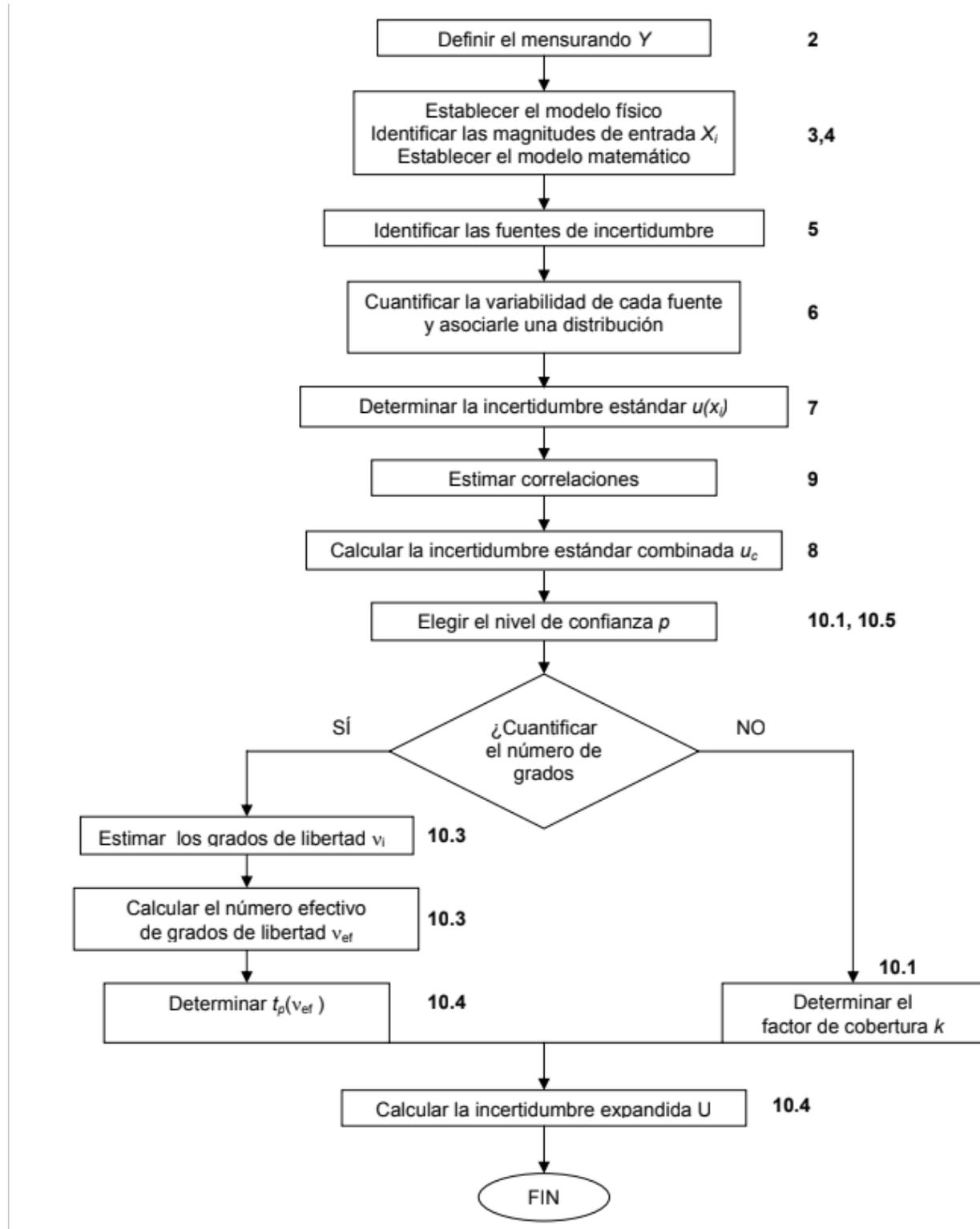


Figura 3.9: Método general empleado por el CENAM (Centro Nacional de Metrología) para calcular la incertidumbre asociada a la medición. Imagen extraída de [4].

3.2.8. Fundamentos de tolerancias dimensionales y geométricas

Una tolerancia es intervalo de variación dentro de un límite establecido de una o varias características de una pieza y seguir siendo útil, definiendo dicha utilidad solamente si la medición cae dentro de los límites establecidos para la tolerancia. El acotado de tolerancias geométricas y dimensionales es el factor que une al diseño de ingeniería, la manufactura y la inspección es decir, un análisis metrológico. Para ello, el presente trabajo está basado fundamentalmente en las definiciones y lineamientos incluidos en la obra de la ASME Geometric Dimensioning and Tolerancing Handbook: Applications, Analysis & Measurement, la cual está al tanto y opera bajo lineamientos y normas aceptadas internacionalmente. Un ejemplo de una tolerancia dimensional se muestra en la Figura 3.10.

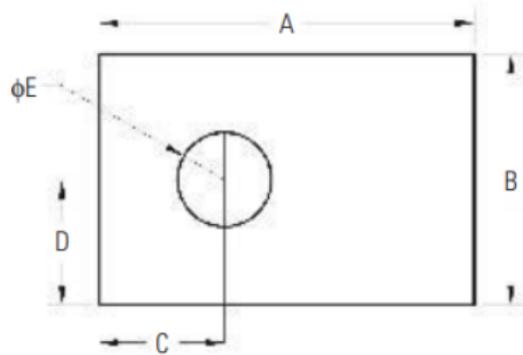


Figura 3.10: Una tolerancia dimensional es la anchura del intervalo de medidas permitidas para una dimensión, estas tolerancias se aplican a dimensiones de forma (A , B y E) y dimensiones de posición (C y D). Imagen extraída de [7].

3.3. Diseño mecánico del instrumento DDRAGO

DDRAGO se encuentra al final de la etapa de diseño crítico, el cual ya fue revisado por paneles de expertos internacionales que otorgaron el visto bueno sobre su diseño y, posteriormente, fue aprobado para ser manufacturado. A continuación, se hablará del diseño del instrumento, mencionando brevemente el análisis por elementos finitos del mismo, junto a sus resultados y por último el presupuesto de error determinado para DDRAGO. Todos los componentes que conforman a DDRAGO pueden ser apreciados en la Figura 3.11. El instrumento pesará en su totalidad 322 [kg], repartidos en 68.3 [kg] para DDRAGO, 38.9

[kg] para WOB, 86.9 [kg] para la estructura de soporte y 122.9 [kg] para CAGIRE.

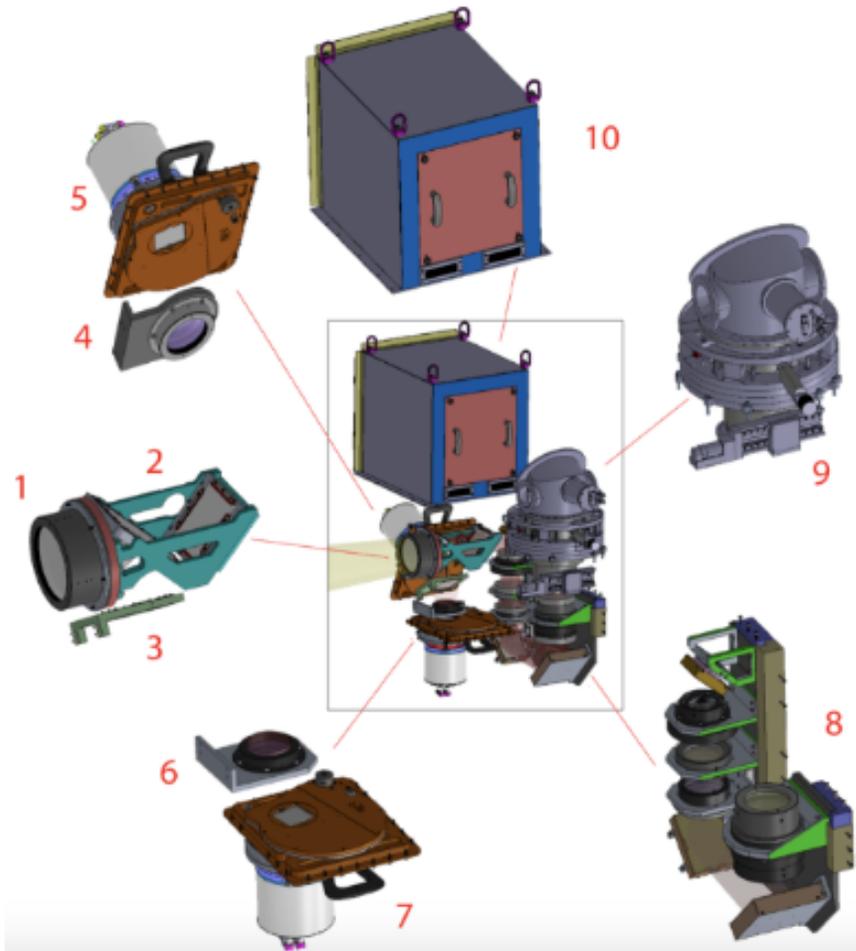


Figura 3.11: Componentes soportados por la estructura de soporte de DDRAGO: (1) Barril L1L2, (2) D1 y módulo CP, (3) Soporte D2, (4) Soporte L3, (5) Detector de azul con mecanismo de punta/inclinación, (6) Soporte L4, (7) Detector de rojo con mecanismo de punta/inclinación, (8) WOB (Warm Optical Bench), (9) Criostato CAGIRE y (10) electrónica de CAGIRE. Imagen extraída de [17].

3.3.1. Componentes de DDRAGO

Los subsistemas que conforman al instrumento son cuatro: DDRAGO, CAGIRE, WOB y la estructura de soporte. A continuación, se hablará brevemente de los primeros tres y la estructura de soporte, por ser el caso de estudio del presente trabajo, se tratará como una sección aparte para abordarla con mayor profundidad y detalle. Si se requiere mayor referencia al contenido de esta sección, se deberá consultar el artículo *DDRAGO and WOB*

Mechanical Design publicado por el Instituto de Astronomía de la UNAM.

DDRAGO, CAGIRE y WOB

DDRAGO y CAGIRE son dos subsistemas separados pero que trabajan en conjunto, por lo que describir uno sin el otro resulta poco productivo. DDRAGO es un observador óptico con un campo de visión amplio y dos canales. El primero es un canal azul observando en *gri* y el segundo un canal rojo en *zy*. Como se mencionó, DDRAGO trabaja con CAGIRE, el cual está compuesto por un observador de infrarrojos de un canal en *JH*; este canal está centrado en el campo de visión de DDRAGO. Éste último le proporciona imagen a CAGIRE mediante ópticas a temperatura ambiente montadas en la WOB. Además, DDRAGO soporta el criostato de CAGIRE, el mecanismo de filtros ópticos y la electrónica. El instrumento completo se monta sobre el telescopio COLIBRÍ en uno de sus puertos *Nasmyth*, junto a un derotador que compensará la rotación del campo de visión y permitirá el alineamiento con el Norte.

Funcionamiento del instrumento DDRAGO

El funcionamiento aquí descrito se puede seguir gráficamente en la Figura 3.12. COLIBRÍ recibe la luz del cielo nocturno, la redirige por sus espejos hasta el puerto *Nasmyth* y es aquí por donde el haz de luz entra al instrumento por el conjunto de lentes L1L2. Posteriormente se encuentra con el dicroico D1 que refleja la luz *grizy* hacia los canales azul y rojo de DDRAGO, y transmite la luz *JH* al canal infrarrojo de CAGIRE.

La luz *grizy* reflejada se encuentra ahora con el dicroico D2 inclinado $45 [^\circ]$ respecto a D1, el cual refleja la luz *gri* al canal azul y transmite la *zy* al canal rojo. En ambos canales se encuentra una lente de campo (L3 y L4, respectivamente), una rueda de filtros y un detector. Naturalmente, se produce una distorsión en la luz transmitida por los dicroicos conocida como astigmatismo, dicho problema se corrige introduciendo un pequeño ángulo en el dicroico D2 y una ligera inclinación en la lente L4.

Ahora bien, la luz *JH* transmitida por el dicroico D1 encuentra un plato corrector, el

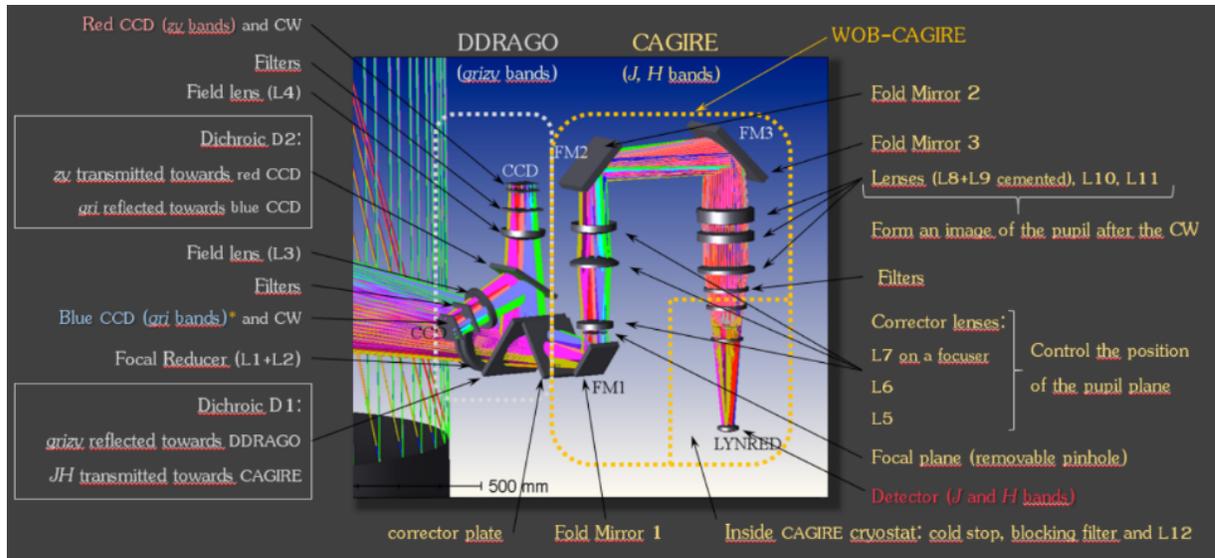


Figura 3.12: Representación esquemática de las ópticas de DDRAGO. Imagen extraída de [17].

cual corrige la aberración esférica producida por el espejo primario del telescopio. Nuevamente, el astigmatismo producido por el dicroico D1 se corrige con el ángulo introducido en este mismo dicroico y la placa correctora. El haz es ahora reflejado por los espejos FM1, FM2 y FM3 hacia la WOB, que dispone de tres lentes individuales L5, L6 y L7 (el cual corrige la aberración cromática), y un cuadruplete L8L9L10L11, y después de pasar por la última lente se dirige a un filtro y posteriormente al criostato, donde se encuentra con una lente de campo L12.

3.3.2. Estructura de soporte de DDRAGO

El diseño mecánico de la estructura de soporte de DDRAGO está basada en el instrumento DDRAGUITO, cuyas pautas de diseño fueron:

- Las placas estructurales están hechas de AluMold F500, un aluminio de alta calidad que permite obtener un instrumento compacto y rígido.
- Las placas estructurales se pueden perforar o desbastar para conseguir reducciones de masa o para dar rigidez.
- Las placas se ensamblarán haciendo uso de tornillos M8 con una tolerancia de 0.5 [mm], lo que garantiza que se pueda ensamblar la estructura y los subsistemas.

- Las superficies planas de las placas estructurales se pueden utilizar para atornillar los componentes optomecánicos mediante insertos entre la estructura y los soportes optomecánicos.
- La estructura de soporte requiere de protectores removibles para permitir la instalación y calibración de los componentes electrónicos y optomecánicos, resaltando que dichos protectores no son considerados estructurales.

La estructura de soporte de DDRAGO posee dimensiones aproximadas de 90 x 68 x 60 [cm]. Las placas que conforman a la estructura de soporte están clasificadas en 4 grupos: placas fijas con nomenclatura de parte DD-ME-SST-Pn, placas del criostato DD-ME-SST-CYS-Pn, electrónica DD-ME-SST-CEn y soportes para sujetar cables DD-ME-SST-CWS-n, donde n hace mención al número de placa. En la Figura 3.13 se pueden apreciar las placas fijas y los soportes para sujetar los cables.

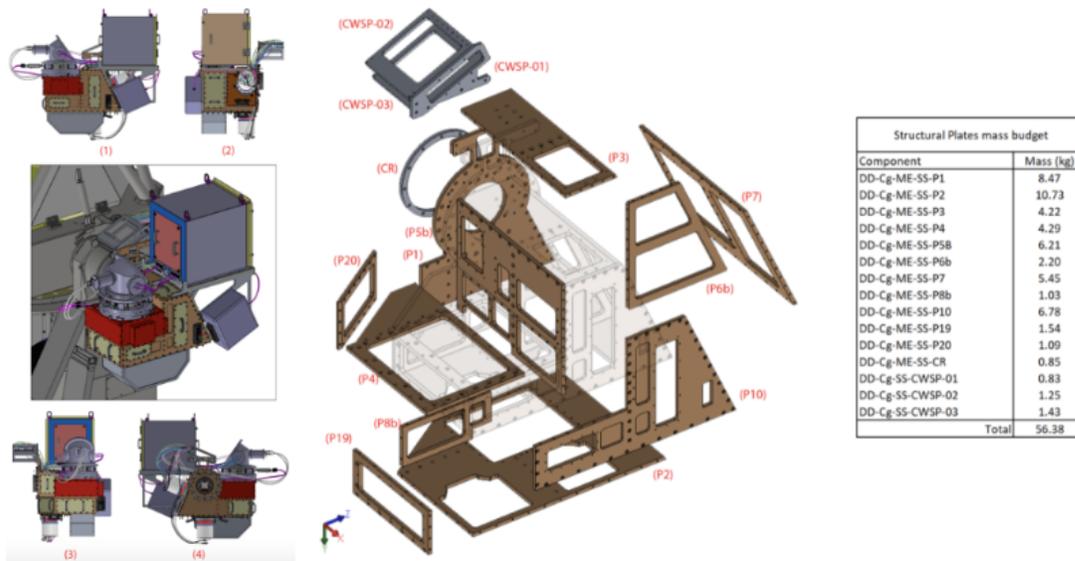


Figura 3.13: (Izquierda) Estructura de soporte de DDRAGO. (1) Vista frontal de los detectores, (2) vista desde los detectores de DDRAGO, (3) vista desde el lado del criostato, (4) vista desde el desrotador del telescopio. (Derecha) Vista en explosivo de la estructura de soporte. Imagen extraída de [17].

Es importante mencionar que la interfaz de unión entre el telescopio y el instrumento es la placa DD-ME-SST-P1, la cual también soporta el barril optomecánico para el doblete

L1+L2, la optomecánica para L3, L4 D1, CP y el soporte D2, y DD-ME-SST-CWSP. Ambos, telescopio e instrumento, se alinean gracias al anillo de centrado DD-ME-SST-CTR, el cual está infradimensionado por $50 [\mu m]$ con una tolerancia h5, que con la tolerancia H6 en el derotador del telescopio se obtiene un margen final entre 60 y $103 [\mu m]$. Para garantizar el alineamiento del instrumento con el eje del derotador, todas las superficies de referencias serán calibradas respecto al anillo de centrado. El uso de calzas no está contemplado dentro del proceso de ensamble de DDRAGO.

Soporte de la electrónica de CAGIRE

La electrónica de CAGIRE está posicionada de tal forma que permite balancear al instrumento en el derotador del telescopio; su peso es de aproximadamente $63 [kg]$ y tiene una tolerancia posicional de $1 [cm]$. La estructura de soporte para la electrónica se aprecia en la Figura 3.14. Para evitar la entrada de luz parásita en el instrumento, las placas de cubierta tienen ranuras, siempre que sea posible. Donde no, se emplea aislante de vidrio resistente a rayos UV y silicona.

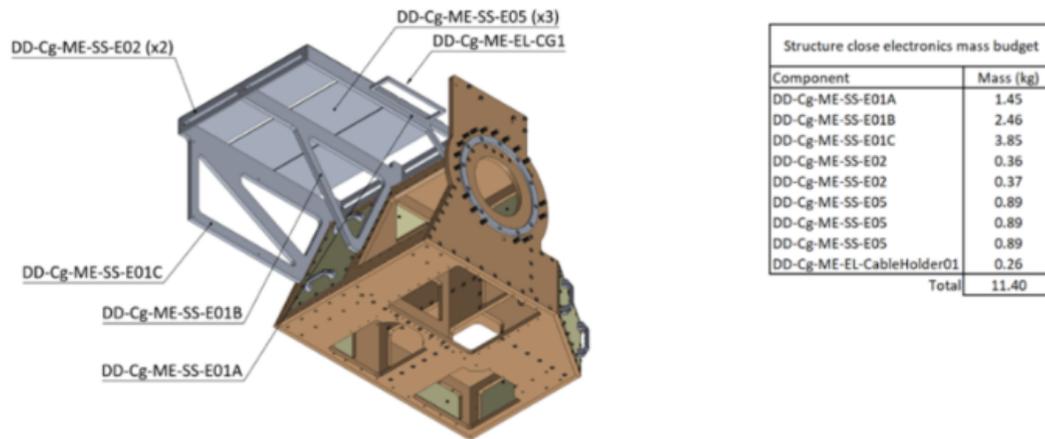


Figura 3.14: Soporte para la electrónica de CAGIRE. Imagen extraída de [17].

Soporte del criostato

La estructura de soporte considera una nueva e independiente superficie de referencia para sujetar el criostato, sin comprometer los requerimientos de rigidez de toda la estructura. Los movimientos, rotaciones y traslaciones de los filtros están libres de interferencias

mecánicas. En la Figura 3.15 se aprecia la estructura de soporte para el criostato.

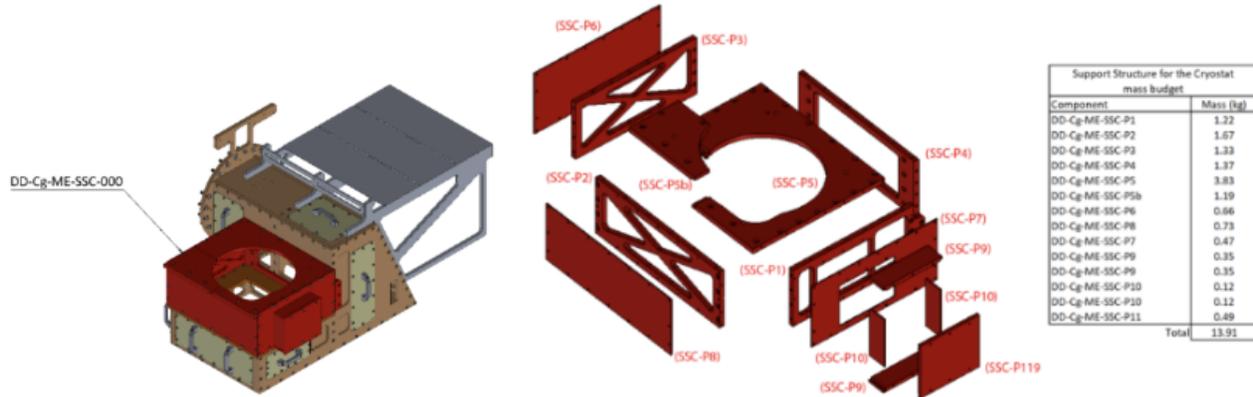


Figura 3.15: Estructura de soporte del criostato junto a la vista en explosivo del mismo. Imagen extraída de [17].

Cobertura de WOB

Esta cobertura no tiene funciones estructurales y sirve como protección a WOB y los subsistemas FM2 y FM3, haciendo el mejor uso del material y la geometría para reducir su peso. Es totalmente removible de la estructura de soporte sin la necesidad de desensamblar. En la Figura 3.16 se aprecia la estructura de la cobertura. Su diseño incluye una espuma ubicada entre la placa fija DD-Cg-ME-SS-P2 y la cobertura de WOB para actuar como una trampa de luz.

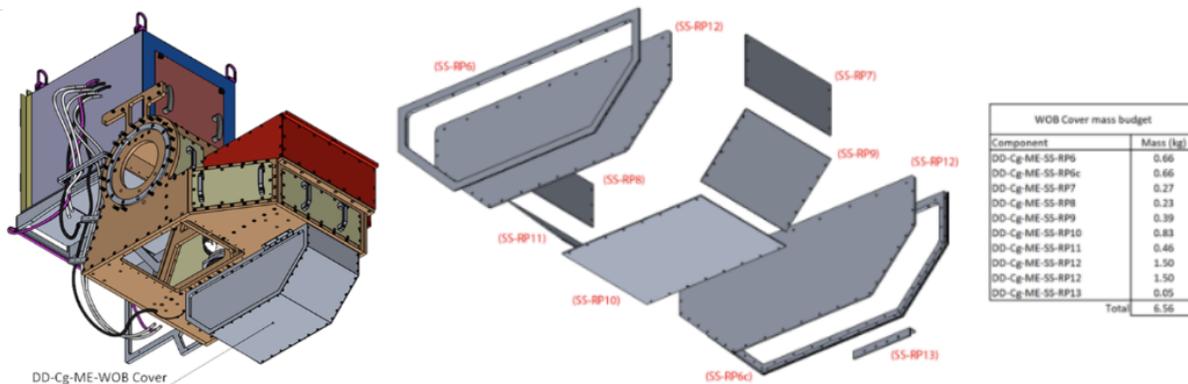


Figura 3.16: Cobertura de WOB junto a una vista en explosivo del mismo. Imagen extraída de [17].

3.3.3. Análisis por elementos finitos y presupuesto de error

El análisis por elementos finitos de los componentes mencionados a continuación fueron realizados haciendo uso de la herramienta de simulación de Solidworks 2020, con la cual se analizaron los desplazamientos, esfuerzos y frecuencias naturales, bajo el dominio elástico para todos los materiales.

Estructura de soporte

La estructura de soporte se analizó haciendo uso de una versión simplificada del modelo CAD desarrollado, es decir, omitiendo elementos no estructurales y omitiendo además lentes que tienen un barril optomecánico común. Las condiciones de frontera empleadas son de tipo restricción sobre los barrenos de 8 de los 18 tornillos empleados para fijar el instrumento al derotador del telescopio, adicionando además tres fuerzas que simulan la masa de la electrónica y el criostato. Además, se realizaron estudios para diferentes inclinaciones del instrumento. Los elementos empleados en este análisis se aprecian en la Figura 3.17.

La malla fue obtenida después de un análisis de convergencia de los resultados, con aquella configuración geométrica donde los resultados ya no varían. Ahora bien, derivado de la omisión estructural del dominio de análisis, se supone un añadido a los resultados de un 10% adicional como compensación, los cuales a pesar de este incremento son pequeños en comparación con las tolerancias ópticas permitidas, lo que deja un margen de error amplio para la manufactura e integración.

DDRAGO y WOB

Relevante a los análisis por elementos finitos de DDRAGO y WOB, se tienen a los soportes en L para diversas lentes y los resultados sobre los diafrámas D1 y D2, así como para el plato corrector, observando las deformaciones presentes en ellos debido al efecto de su propio peso.

Los resultados para los soportes demostraron deformaciones máximas de un orden

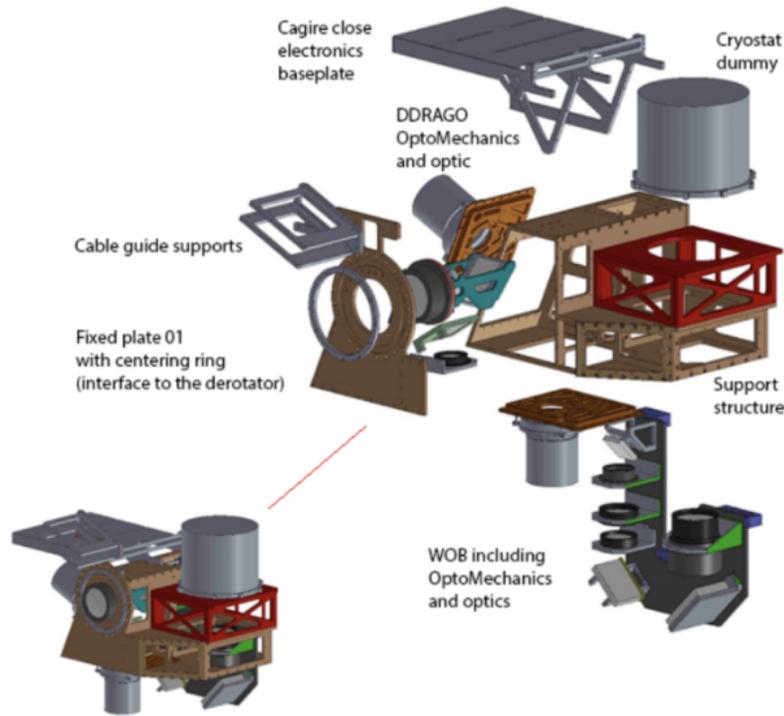


Figura 3.17: Componentes estructurales incluidos en el análisis por elementos finitos para la estructura de soporte. Imagen extraída de [17].

de magnitud inferior a las tolerancias ópticas, por lo que sus efectos están controlados y no tendrán una influencia negativa en el desempeño del instrumento. Ahora bien, los resultados para las superficies ópticas demostraron no tener un efecto nocivo incorregible, por lo que mediante un ajuste de enfoque en los detectores se logra corregir el problema sin alterar la calidad de la imagen.

Presupuesto de error del instrumento

Con base en los resultados proporcionados por los análisis de flexión y deformaciones por acción de la gravedad, las tolerancias de manufactura de ópticas y monturas, y las tolerancias de integración generadas por las ópticas y sus respectivas monturas junto a las tolerancias de posicionamiento de los ensamblajes con la WOB; se creó un presupuesto de error para el instrumento. Dicha tabla será la base con la cual se hará una comparación con los resultados obtenidos del análisis dimensional del ensamblaje completo de la estructura de soporte de DDRAGO, verificando que el comportamiento mecánico real de la estructura sea congruente con los análisis por elementos finitos realizados, y que se encuentren dentro

del presupuesto de error designado, garantizando así que su funcionamiento sea óptimo y de acuerdo con las especificaciones de diseño de DDRAGO.

3.4. Integración y aceptación

3.4.1. Integración

Dentro del proceso de manufactura del instrumento, ubicada como última fase, se encuentra la integración, ésta comprende la acción de reunir todos los elementos, componentes o subsistemas involucrados y juntarlos en un solo sistema, realizando pruebas para tener completa certeza de que al actuar de manera conjunta, así como en forma individual, funcionen de la manera intencionada.

El proceso de integrar el sistema generalmente es algo complejo, debido a que involucra muchas áreas de conocimiento, convirtiéndose en un proceso multidisciplinario con muchas opiniones conforme al estado final del sistema. Por ello, es común que dentro de este proceso de integración se realicen modificaciones adicionales al diseño, tanto en componentes, hardware o software si es el caso, para lograr el cometido del proceso.

3.4.2. Aceptación

Posterior al proceso de integración, se prueba el sistema completo y sus respectivos subsistemas para comprobar que su funcionamiento sea aceptable al estar dentro de las especificaciones previamente establecidas en el diseño del mismo.

Resulta pertinente realizar este proceso de aceptación fuera del lugar de entrega y recepción del sistema, debido a que es preferible realizar todas las pruebas pertinentes en un laboratorio o centro de análisis especializado para evitar pruebas in situ que retrasen al cliente y lo hagan malgastar dinero y recursos.

Capítulo 4

Desarrollo experimental y resultados

4.1. Procesos previos al análisis dimensional

Rectificado de las placas

La estructura de soporte del instrumento DDRAGO fue manufacturada a partir de placas de Alumold F500 las cuales se encontraban dispuestas en el Taller Mecánico de Precisión en Ciudad Universitaria (TMP-CU) del Instituto de Astronomía. Dichas placas, por elección de los diseñadores, se sometieron a un análisis de rectificado individual mediante la empresa Jacuar para garantizar las condiciones de paralelismo estipuladas en las tolerancias geométricas de las piezas. En la Figura 4.1 se aprecia el análisis de paralelismo de una placa recibida de Jacuar.

De dicho proceso de rectificación, todas las placas perdieron sus defectos menos aquella de la cual se manufacturaba la pieza P1 (ver Figura 4.2), aquella que actúa como referencia para toda la estructura de soporte al actuar como interfaz entre el telescopio y el instrumento. Dicho esto, la placa P1 fue maquinada mediante una fresadora CNC perteneciente al Instituto de Física con un bancada lo suficientemente grande como para albergar las dimensiones de la pieza con una placa del mismo material que se tenía en el TMP-CU, realizando procesos de careado para garantizar las tolerancias geométricas del diseño.

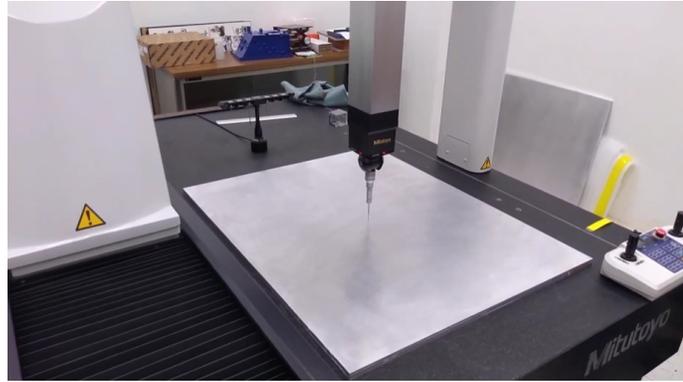


Figura 4.1: *Análisis del rectificado de una de las placas base de la estructura de soporte de DDRAGO. Imagen de elaboración propia.*

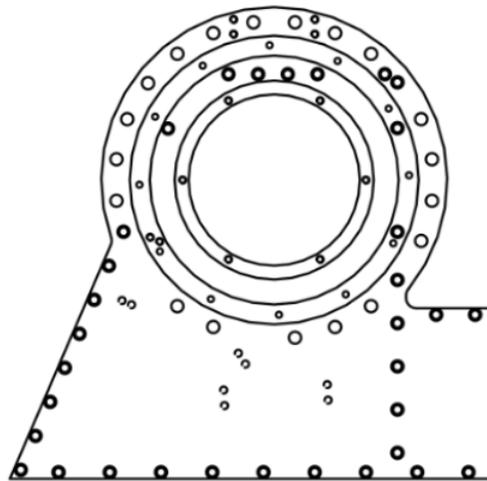


Figura 4.2: *Vista frontal de la pieza P1 del instrumento DDRAGO. Imágenes extraídas de Solidworks mediante elaboración propia.*

Posterior al proceso de rectificado las placas rectificadas fueron sometidas a un breve análisis metrológico individual en la mesa de medición por coordenadas M7106 ubicada en el taller de metrología en el Instituto de Astronomía para confirmar que los resultados son los esperados, concluyendo que las placas poseen el espesor requerido y además que las condiciones de paralelismo entre caras son adecuadas para la etapa de manufactura.

Manufactura de la estructura de soporte

La manufactura de las piezas de la estructura de soporte de DDRAGO fue llevada a cabo en dos etapas: manufactura externa y manufactura de acabados interna. La primera involucra el maquinado de las piezas haciendo uso de un router CNC, con el cual se

llevaron las piezas a sus longitudes finales y se realizaron los barrenos y cajas de cada una de ellas. Para este paso de manufactura no fueron requeridos planos de detalle, en su lugar se enviaron a la empresa Job Shop¹ trayectorias vectorizadas de los modelos CAD de las piezas, es decir, mediante archivos en formato dxf, formato de lectura universal para archivos de dibujos vectorizados. Un ejemplo de los archivos empleados para esta etapa se muestra en la Figura 4.3.

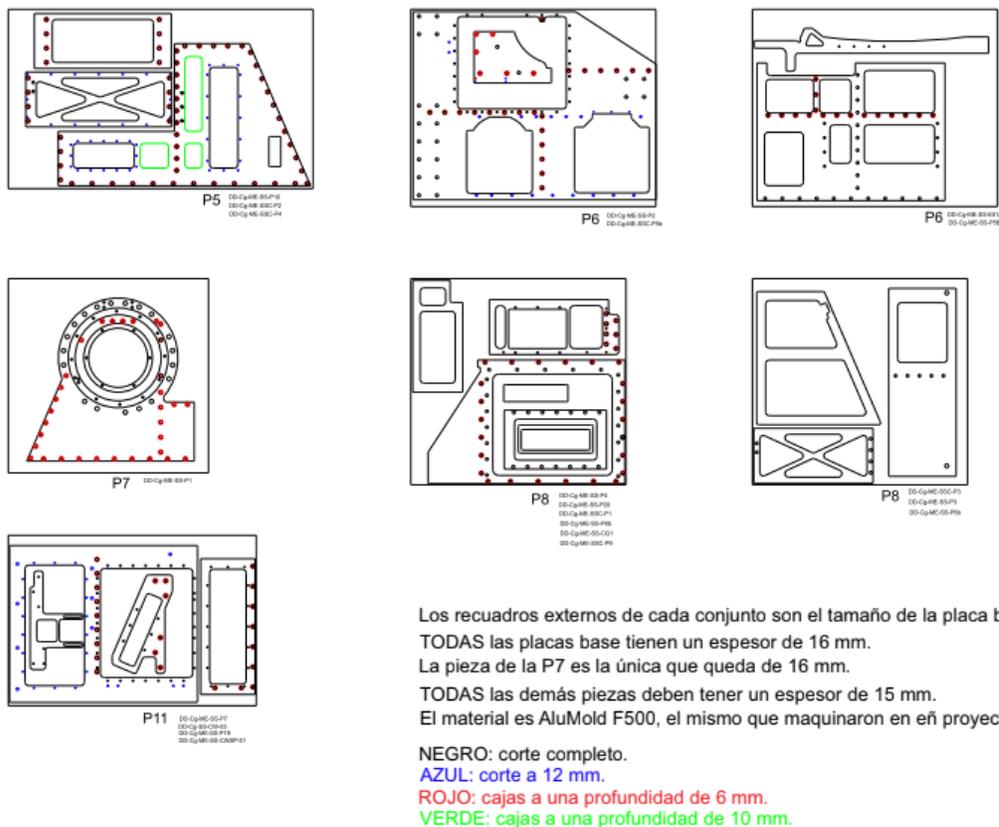


Figura 4.3: Archivo en formato dxf enviado para la manufactura de las piezas. Nótese las instrucciones para el maquinado con referencia a colores que indican profundidades de corte. Imagen de elaboración propia del Instituto de Astronomía.

Posterior al corte de las piezas en el router CNC, se enviaron al TMP-CU donde fueron eliminadas las rebabas restantes del proceso previo, así como la limpieza general de cada una de ellas para eliminar impurezas que pudieran provocar defectos en las etapas posteriores de manufactura, esto involucrando un proceso de rebabado y eliminación de viruta

¹Página de Job Shop para mayor referencia, URL: <https://www.jobshop.mx/>

almacenada en los barrenos y cajas de las piezas. El estado en el que las piezas fueron recibidas se juzgó como aceptable con base en inspecciones visuales y comparativas con barras paralelas y herramientas de medición convencionales como el calibrador Vernier. El primer juego de piezas recibido puede ser apreciado en la Figura 4.4.



Figura 4.4: *Placas de la estructura de soporte de DDRAGO, el criostato y la electrónica de CAGIRE después de ser sometidas a limpieza e inspección preliminar. Imagen obtenida por elaboración propia.*

La segunda etapa de la manufactura se llevó a cabo en el TMP-CU y comprende los acabados específicos de cada pieza, los barrenos laterales y el roscado de los barrenos frontales y laterales, según sea el caso, haciendo uso de máquinas herramientas diferentes para cada operación necesaria. Para la realización de barrenos y cajas se empleó una fresadora convencional manual con opción de movimiento automático y para el roscado se empleó un taladro de banco con tres machuelos para cada rosca necesaria. Dentro de los acabados específicos para algunas de las piezas de la estructura de soporte de DDRAGO, debido a la naturaleza de operación del router CNC contratado, no fue posible realizar una o varias operaciones de maquinado entre las que se encuentran cajas de barrenos de la cara posterior al corte en router CNC y un maquinado específico en una o varias de las caras laterales con un ángulo respecto a su cara frontal, es decir, un maquinado oblicuo (véase la Figura 4.5). Las placas que requirieron el procedimiento adicional para lograr el plano oblicuo mencionado anteriormente fueron:

- DD-Cg-ME-SS-RP9.
- DD-Cg-ME-SS-RP11.
- DD-Cg-ME-SS-P2.
- DD-Cg-ME-SS-P3.
- DD-Cg-ME-SS-P7.
- DD-Cg-ME-SS-P20.

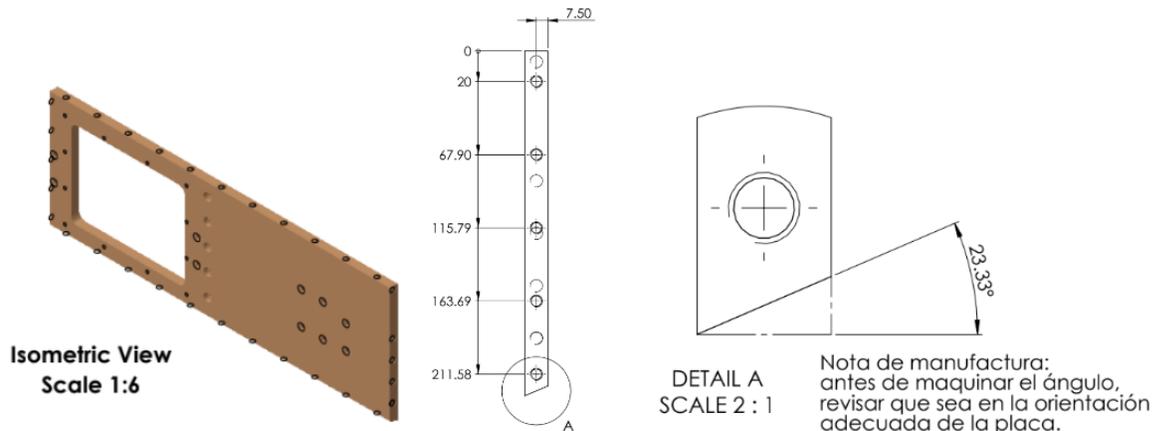


Figura 4.5: Extracto del plano de detalle de la pieza DD-Cg-ME-SST-P3, en donde se muestra una vista isométrica de la misma y una vista lateral, en la cual se detalla la vista AN remarcando la existencia de un plano inclinado respecto a la cara frontal así como el arreglo de barrenos existente en la cara lateral. Imagen obtenida por elaboración propia de Solidworks.

Para esta segunda etapa de manufactura, debido a su realización en el TMP-CU, fueron realizados planos para acabados requeridos por los especialistas del taller encargados de su elaboración, de los cuales se extrae la Figura 4.5. Estos planos pueden ser consultados en el Anexo 1 al final del presente trabajo y únicamente incluyen dimensiones generales de las piezas, posición y dimensión de barrenos y roscas así como la localización de los barrenos laterales que no pueden ser manufacturados en el router CNC. Adicionalmente, con base en dichos planos de acabados, se realizaron un arreglo de regletas de MDF o guías de los barrenos laterales para cada una de las piezas de la estructura de soporte de DDRAGO mediante corte láser. Dichas regletas no tienen la función de servir como un acelerador de manufactura, sino, servir como un indicador de la calidad y exactitud de los procesos productivos de esta etapa de acabados mediante una comparación rápida visual al sobreponer la regleta sobre el arreglo de barrenos recién manufacturado o en proceso. Para facilitar el uso de las mismas, las regletas fueron grabadas con un código único que comprende la letra “P” de “Plate” seguida del número que le corresponde junto a un guión y

4.1. PROCESOS PREVIOS AL ANÁLISIS DIMENSIONAL

un número que indica el número de la regleta; junto a esto, se marcaron las caras laterales de las placas con el código único de la regleta que identifica el arreglo de dicha cara, así como el sentido en el que debe ser sobrepuesta y, por último, la placa con la que esa cara ensambla. Con todo esto se facilita y acelera el proceso de evaluación para el maquinado del TMP y el router en sí. Adicionalmente, estas regletas fueron adicionadas a los planos de acabados del mismo Anexo 1 ya mencionado para facilitar la comparación al indicar en qué cara y el sentido en el que se debe sobreponer sobre ella, así como un control de las regletas existentes. Las regletas y su uso se muestran con un ejemplo de uso en la Figura 4.6.



Figura 4.6: *Uso de las regletas de MDF para la evaluación de un arreglo de barrenos sobre una de las caras de la placa DD-ME-SST-PX. Nótese el código de la misma así como la notación marcada sobre la cara de la placa. El sentido de uso de la regleta es marcado con una flecha que coincide con una marcada en la cara frontal de la placa. Imagen de autoría propia.*

A continuación, se muestran imágenes recabadas durante la etapa de manufactura de acabados del TMP para algunas piezas de la estructura de soporte de DDRAGO en las cuales se muestran los procesos empleados, en la Figura 4.7 se muestra el proceso de barrenado lateral así como el roscado de los mismos, mientras que en la Figura 4.8 se muestra el preparado y maquinado oblicuo para lograr los planos inclinados de las piezas antes mencionadas que lo requerían.

Por último, se muestra la Figura 4.9, en la cual se muestra un maquinado importante sobre la placa DD-ME-SST-P7 en la que se realizó un maquinado y barrenado oblicuo para

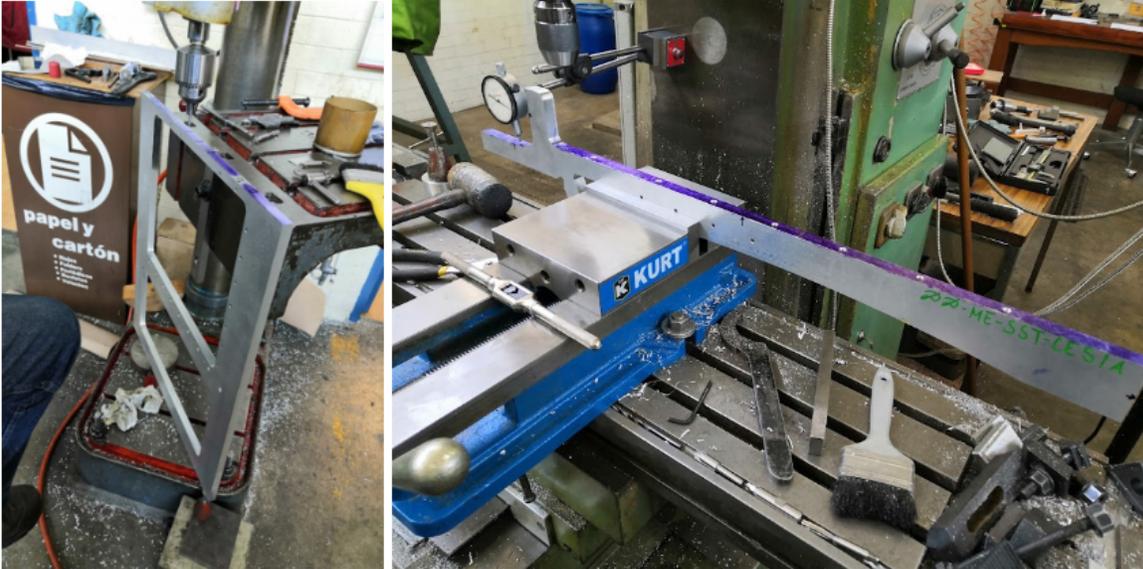


Figura 4.7: Roscado de barrenos laterales para la placa DD-ME-SST-P7 con un taladro de columna (Izquierda) y maquinado de barrenos laterales para la placa DD-ME-SST-CES1A con una fresadora convencional manual (Derecha) en el TMP. Imagen de autoría propia.

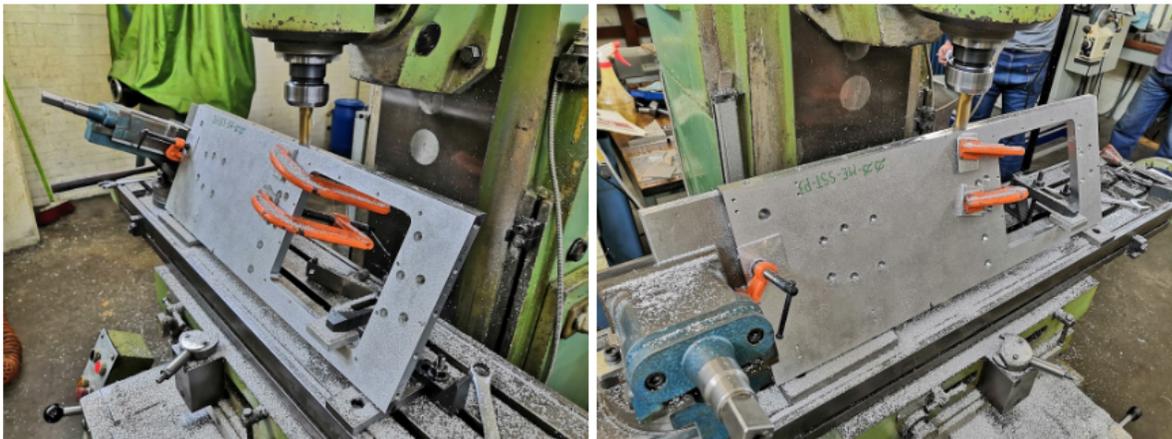


Figura 4.8: Maquinado oblicuo para la placa DD-ME-SST-P3 con una fresadora convencional manual en el TMP. Imagen de autoría propia.

generar la geometría particular de la pieza.



Figura 4.9: *Maquinado y barrenado oblicuo para la placa DD-ME-SST-P7 con una fresadora convencional manual para generar los planos oblicuos en las caras superior e inferior de la pieza y el arreglo de barrenos con caja oblicuos paralelos a dichas caras. Imagen de autoría propia.*

La manufactura de las placas se ha terminado al momento de redacción del presente trabajo, involucrando la estructura de soporte de DDRAGO y de la electrónica de CAGIRE, las cuales se muestran a continuación:

- DD-ME-SST-P2.
- DD-ME-SST-P3.
- DD-ME-SST-P4.
- DD-ME-SST-P5B.
- DD-ME-SST-P6
- DD-ME-SST-P7.
- DD-ME-SST-P8B.
- DD-ME-SST-P10.
- DD-ME-SST-P19.
- DD-ME-SST-P20.
- DD-ME-SST-CES1A.

Sin embargo, se han presentado pormenores al momento de aceptación de acabados los cuales necesitan ser remanufacturados, pero al considerar que todos los pormenores de los detalles tanto de los planos como las eventualidades al realizar detalles en las piezas se pueden abordar con mayor facilidad y sin retraso por la práctica y el descubrimiento de técnicas que ayudan a los especialistas del TMP, así como con un proceso iterativo de desarrollo de planos en el que intervienen revisiones del jefe del TMP y observaciones de los mismos especialistas, diseñando los planos para que ellos tengan la mejor experiencia al interpretarlos y usarlos como referencia para sus tareas, obteniendo así resultados sa-

tisfactorios. Con ello, se logra dejar un camino con mayor facilidad y más eficiente para proceder con cualquier defecto que se presente en las placas de la estructura de soporte de DDRAGO. Algunas de las placas completamente finalizadas en tanto a acabados se refiere se muestran a continuación en la Figura 4.10 y 4.11.

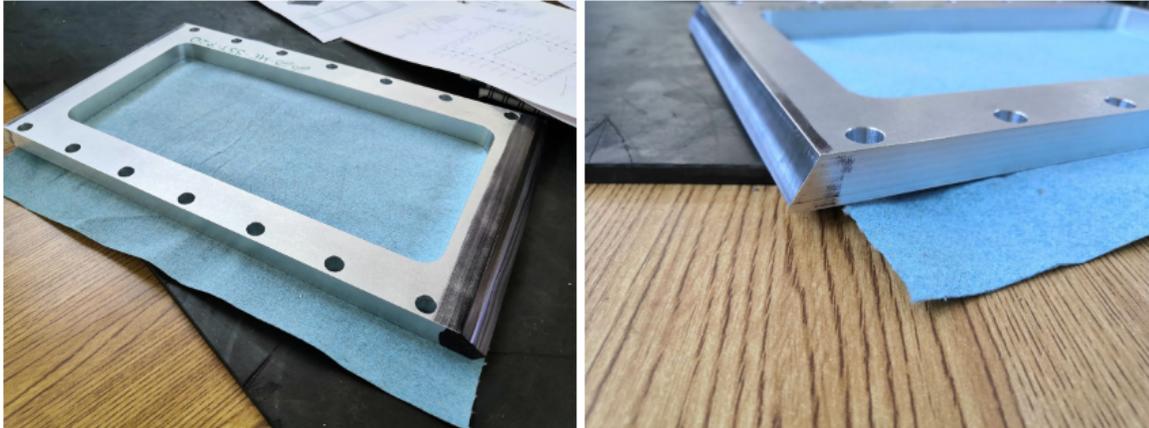


Figura 4.10: Placa DD-ME-SST-P20 completamente terminada con un acercamiento al maquinado oblicuo relizado (Derecha). Imagen de autoría propia.



Figura 4.11: Placas DD-ME-SST-P2 (Izquierda), DD-ME-SST-P8B y DD-ME-SST-P19 (Derecha) completamente terminadas. Nótese que en la DD-ME-SST-P2 se aprecian las regletas empleadas en ella. Imagen de autoría propia.

Placa estructural	Análisis metrológico en la que se incluye
DD-ME-SST-P2	Precisión
DD-ME-SST-P3	Taller
DD-ME-SST-P4	Precisión
DD-ME-SST-P5B	Taller
DD-ME-SST-P6B	Taller
DD-ME-SST-P7	Precisión
DD-ME-SST-P8B	Taller
DD-ME-SST-P10	Precisión
DD-ME-SST-P19	Taller
DD-ME-SST-P20	Taller
DD-ME-SST-CYSP1	Taller
DD-ME-SST-CYSP2	Taller
DD-ME-SST-CYSP3	Taller
DD-ME-SST-CYSP4	Taller
DD-ME-SST-CYSP5B	Taller

Tabla 4.1: *División de las placas estructurales disponibles en los análisis metrológicos.*

4.2. Análisis metrológico

El análisis metrológico realizado para la estructura de soporte de DDRAGO se dividió en dos etapas: metrología de taller y de precisión, realizadas en el laboratorio de ensamble y de metrología del IA, respectivamente. Estos análisis no se hicieron para todas las partes que componen la estructura de soporte, unas piezas fueron analizadas con la metrología de taller y otras con la metrología de precisión con base en ciertos aspectos detallados en las secciones subsecuentes, esta división de piezas entre ambos análisis se detalla en la Tabla 4.1. Además, algunas placas fueron omitidas debido a la función que cumplen en la estructura en sí, dejando de lado todas aquellas que su función no sea estructural y no aporte rigidez a la estructura, dejando así únicamente a las placas de la estructura de DDRAGO, sin las que soportan a la electrónica de CAGIRE, y las placas disponibles de la estructura de soporte del criostato debido a que esta estructura se diseñó como un subensamble de la de DDRAGO pero con la consideración de que al quedar unidas se considera un cuerpo rígido, por lo tanto el comportamiento final de la estructura compete la acción conjunta de ambas estructuras de soporte. Por último, se excluye también a la cobertura de la WOB debido a que tampoco aporta rigidez a la estructura en sí.

4.2.1. Análisis metrológico de taller

El objetivo ideal de un análisis de taller es la evaluación inmediata de los procesos productivos para así poder decidir si los procesos cumplen o no con ciertos estándares o tolerancias ya sean internacionales o bien aquellos seleccionados por los diseñadores. En este caso, la única opción disponible para los fines de calidad/precio que estaban disponibles al momento del diseño era justamente el router CNC de la empresa Job Shop, empresa que anteriormente se conocía como We Make It, estuvo encargada de la manufactura de las placas de la estructura de soporte de DDRAGUITO. Para su selección se les fue enviada en su momento material muestra para la verificación de las tolerancias que podían cumplir con las máquinas disponibles, que con un análisis posterior a la entrega se determinó que sí eran el candidato para cumplir con sus especificaciones.

Ahora bien, como se explicó anteriormente, a Job Shop se le envió un archivo DXF que incluía prácticamente la totalidad de la estructura de soporte de DDRAGO/CAGIRE y la del criostato, entre otras no relevantes para el análisis en cuestión, por lo tanto, no fue posible analizar una pieza inicial y poder enviar retroalimentación sobre los procesos productivos para poder continuar con un proceso de mayor calidad, de ser necesario. Para este primer análisis metrológico las piezas seleccionadas son aquellas que dispongan de las dimensiones más pequeñas y menor complejidad, o bien, se permitan incluir en el rango de medición disponible el cual está delimitado por el rango del instrumento de medición a emplear, un calibrador Vernier de 600 [mm].

Objetivos del análisis metrológico de taller

El objetivo primordial del análisis de taller radica en obtener mediciones rápidas de las dimensiones generales de las piezas antes mencionadas y así, poder evaluar los procesos productivos de primera mano y con ello decidir si se aceptan o no las piezas en general. Como objetivos puntuales se tienen:

- Asegurar la exhaustividad de evaluación de las piezas así como la uniformidad en las mediciones.

- Asegurar la repetibilidad del análisis metrológico.
- Estudiar de manera preliminar las capacidades de los procesos productivos.
- Plantear soluciones a los problemas de medición encontrados para la etapa posterior.
- Investigar, evaluar y eliminar fuentes de error en las mediciones.

Protocolo de medición

Como se mostró en la Tabla 4.1, serán analizadas un conjunto de placas con un calibrador Vernier Mitutoyo de 600 [mm] de rango como el que se muestra en la Figura 4.12.

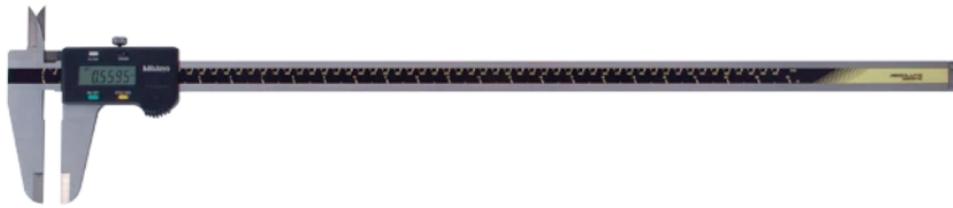


Figura 4.12: Calibrador Vernier Mitutoyo empleado para la metrología de taller. Imagen obtenida de Mitutoyo, URL: <https://www.mitutoyo.com/products/small-tool-instruments-and-data-management/calipers/digimatic-calipers/absolute-digimatic-caliper/>

En primer lugar, se verificó que el instrumento de medición empleado se encontraba en las condiciones adecuadas, para ello se siguieron las recomendaciones brindadas por Mitutoyo² en sus cursos sobre metrología encontrados en la plataforma YouTube. Las recomendaciones son las siguientes:

- Limpiar el calibrador con un papel sin pelusa.
- Tomar una hoja de papel e introducirla entre las mordazas, apretar el calibrador y sin desapretar sacar la hoja. con ello se garantiza la limpieza de ambas mordazas.
- Apretar el calibrador y apuntarlo a una fuente de luz, ahora con las superficies de medición de exteriores paralelas y en línea con los ojos del operador y la fuente de luz revisar que no sea visible luz entre las mordazas, de ser así, volver a realizar la limpieza con la hoja. Si persiste este comportamiento el calibrador es defectuoso.

²Recomendaciones extraídas de Mitutoyo en YouTube, URL: <https://youtu.be/LOSyp2-crUY>

- Apretar el calibrador y repetir el paso anterior con las mordazas de interiores, se deberá ver una pequeña filtración de luz entre ellas.
- Revisar que la mordaza móvil tenga un movimiento suave sobre el calibrador.

Al realizar este procedimiento sobre el calibrador Vernier empleado se encontró que se encuentra dentro de los estándares de calidad de Mitutoyo y se puede emplear para mediciones.

Se recibió una indicación por parte del equipo de diseño en la cual se decidió que se evaluaran las dimensiones generales de la pieza, las cuales son el largo y el ancho, sin evaluar en este proceso el espesor de la pieza debido al instrumento empleado, el cual no sería capaz de dar valores importantes en diferentes posiciones de la placa con los cuales se pudieran obtener conclusiones relevantes para el análisis metrológico. Para la inspección de estas piezas se midió la distancia entre las caras que definen el largo y el ancho de las mismas, desplazando el calibrador Vernier a lo largo de las superficies para así obtener una relación entre las mediciones y el paralelismo de las superficies. El número de mediciones a realizar fue de 30, esto con base en la teoría del límite central en el cual se establece que si se relaciona una muestra aleatoria de tamaño n donde n es grande ($n \geq 30$), entonces las observaciones de la variable aleatoria con media μ y varianza poblacional σ^2 conocida o desconocida, tendrá una distribución aproximadamente normal. La elección de obtener tal cantidad de mediciones es para así garantizar que las mediciones realizadas con el calibrador Vernier se pudieran caracterizar adecuadamente con valores numéricos para la precisión y repetibilidad de las mismas, asegurando así la confiabilidad y exhaustividad del análisis de taller. Ahora bien, el procedimiento de medición de las placas con el calibrador Vernier se realizó como se muestra a continuación en la Figura 4.13. Se eligieron dos puntos de referencia para cada mordaza y se corroboró el contacto entre la cara de la mordaza y la cara de la pieza, así teniendo un mayor control en la uniformidad de las mediciones a la par de obtener una dimensión lo más cercana a la real. Cabe mencionar que no se empleó la superficie en la que se estaba midiendo como una referencia debido a que no está diseñada para permitir actuar como una, debido a presentar pandeos y no ser uniforme.

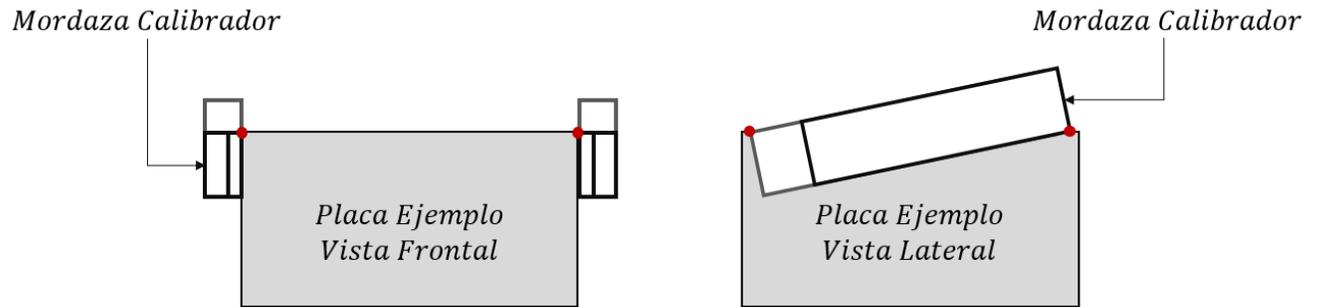


Figura 4.13: *Puntos de referencia del calibrador Vernier empleados para la metrología de taller. Imagen elaborada en Powerpoint.*

Es importante mencionar que estas piezas fueron analizadas a temperatura ambiente en el laboratorio de ensamble, que habitualmente es alrededor de los 25 [°C] y fue la temperatura a la que se diseñó la estructura de DDRAGO, por lo que se encontraba dentro de especificaciones de diseño.

Por último, se siguieron las condiciones de repetibilidad en el análisis metrológico de taller mostradas en el Marco Teórico para así poder tener un mayor éxito en la repetibilidad de las mediciones posteriormente, de ser así requeridas.

Resultados análisis metrológico de taller

Las 30 mediciones efectuadas para las dimensiones generales de las placas fueron analizadas posteriormente con el uso de la estadística, determinando de cada una de las dimensiones el valor de la desviación estándar y el promedio. Los resultados se muestran en las tablas a continuación, las cuales se auxilian en los planos de manufactura de detalles incluidos en el Anexo 1. Los resultados generales se pueden apreciar en la Tabla 4.13.

Placa DD-ME-SST-P3					
Mediciones A [mm]			Mediciones B [mm]		
Valor Nominal [mm] 629			Valor Nominal [mm] 225.71		
Iteración	Medición	Diferencia	Iteración	Medición	Diferencia
1	628.76	0.24	1	225.59	0.12
2	628.74	0.26	2	225.52	0.19
3	628.73	0.27	3	225.52	0.19
4	628.77	0.23	4	225.5	0.21
5	628.75	0.25	5	225.51	0.2
6	628.81	0.19	6	225.51	0.2
7	628.74	0.26	7	225.53	0.18
8	628.77	0.23	8	225.53	0.18
9	628.76	0.24	9	225.53	0.18
10	628.74	0.26	10	225.46	0.25
11	628.76	0.24	11	225.54	0.17
12	628.74	0.26	12	225.53	0.18
13	628.74	0.26	13	225.52	0.19
14	628.74	0.26	14	225.54	0.17
15	628.78	0.22	15	225.54	0.17
16	628.76	0.24	16	225.53	0.18
17	628.78	0.22	17	225.54	0.17
18	628.78	0.22	18	225.54	0.17
19	628.79	0.21	19	225.54	0.17
20	628.75	0.25	20	225.51	0.2
21	628.78	0.22	21	225.55	0.16
22	628.77	0.23	22	225.53	0.18
23	628.78	0.22	23	225.54	0.17
24	628.71	0.29	24	225.54	0.17
25	628.77	0.23	25	225.55	0.16
26	628.76	0.24	26	225.52	0.19
27	628.72	0.28	27	225.54	0.17
28	628.72	0.28	28	225.53	0.18
29	628.75	0.25	29	225.45	0.26
30	628.76	0.24	30	225.43	0.28
Des. Est.	0.023		Des. Est.	0.031	
Promedio	628.76	0.24	Promedio	225.52	0.19

Tabla 4.2: Resultados del análisis metrológico de taller para la placa DD-ME-SST-P3. Extraído de Microsoft Excel por elaboración propia.

Placa DD-ME-SST-P5B					
Mediciones A [mm]			Mediciones B [mm]		
Valor Nominal [mm]		629	Valor Nominal [mm]		460.6
<i>Iteración</i>	<i>Medición</i>	<i>Diferencia</i>	<i>Iteración</i>	<i>Medición</i>	<i>Diferencia</i>
1	628.75	0.25	1	460.41	0.19
2	628.73	0.27	2	460.41	0.19
3	628.72	0.28	3	460.48	0.12
4	628.77	0.23	4	460.49	0.11
5	628.75	0.25	5	460.49	0.11
6	628.76	0.24	6	460.48	0.12
7	628.75	0.25	7	460.49	0.11
8	628.73	0.27	8	460.49	0.11
9	628.71	0.29	9	460.5	0.10
10	628.76	0.24	10	460.5	0.10
11	628.75	0.25	11	460.4	0.20
12	628.72	0.28	12	460.43	0.17
13	628.73	0.27	13	460.53	0.07
14	628.74	0.26	14	460.49	0.11
15	628.74	0.26	15	460.48	0.12
16	628.72	0.28	16	460.47	0.13
17	628.73	0.27	17	460.47	0.13
18	628.75	0.25	18	460.46	0.14
19	628.73	0.27	19	460.46	0.14
20	628.75	0.25	20	460.45	0.15
21	628.73	0.27	21	460.4	0.20
22	628.72	0.28	22	460.4	0.20
23	628.72	0.28	23	460.48	0.12
24	628.73	0.27	24	460.46	0.14
25	628.73	0.27	25	460.45	0.15
26	628.74	0.26	26	460.45	0.15
27	628.73	0.27	27	460.46	0.14
28	628.72	0.28	28	460.47	0.13
29	628.71	0.29	29	460.47	0.13
30	628.71	0.29	30	460.48	0.12
Des. Est.	0.016		Des. Est.	0.033	
Promedio	628.73	0.27	Promedio	460.46	0.14

Tabla 4.3: Resultados del análisis metrológico de taller para la placa DD-ME-SST-P5B. Extraído de Microsoft Excel por elaboración propia.

Placa DD-ME-SST-P6B					
Mediciones A [mm]			Mediciones B [mm]		
Valor Nominal [mm]	445.6		Valor Nominal [mm]	N/A	
<i>Iteración</i>	<i>Medición</i>	<i>Diferencia</i>	<i>Iteración</i>	<i>Medición</i>	<i>Diferencia</i>
1	445.36	0.24	1	N/A	N/A
2	445.36	0.24	2	N/A	N/A
3	445.36	0.24	3	N/A	N/A
4	445.34	0.26	4	N/A	N/A
5	445.33	0.27	5	N/A	N/A
6	445.34	0.26	6	N/A	N/A
7	445.34	0.26	7	N/A	N/A
8	445.34	0.26	8	N/A	N/A
9	445.34	0.26	9	N/A	N/A
10	445.35	0.25	10	N/A	N/A
11	445.37	0.23	11	N/A	N/A
12	445.37	0.23	12	N/A	N/A
13	445.34	0.26	13	N/A	N/A
14	445.33	0.27	14	N/A	N/A
15	445.35	0.25	15	N/A	N/A
16	445.38	0.22	16	N/A	N/A
17	445.36	0.24	17	N/A	N/A
18	445.35	0.25	18	N/A	N/A
19	445.35	0.25	19	N/A	N/A
20	445.34	0.26	20	N/A	N/A
21	445.35	0.25	21	N/A	N/A
22	445.44	0.16	22	N/A	N/A
23	445.34	0.26	23	N/A	N/A
24	445.35	0.25	24	N/A	N/A
25	445.36	0.24	25	N/A	N/A
26	445.35	0.25	26	N/A	N/A
27	445.36	0.24	27	N/A	N/A
28	445.34	0.26	28	N/A	N/A
29	445.36	0.24	29	N/A	N/A
30	445.35	0.25	30	N/A	N/A
Des. Est.	0.020				
Promedio	445.35	0.25			

Tabla 4.4: Resultados del análisis metrológico de taller para la placa DD-ME-SST-P6B. Extraído de Microsoft Excel por elaboración propia.

4.2. ANÁLISIS METROLÓGICO

Placa DD-ME-SST-P8B					
Mediciones A [mm]			Mediciones B [mm]		
Valor Nominal [mm]		373.9	Valor Nominal [mm]		167.23
<i>Iteración</i>	<i>Medición</i>	<i>Diferencia</i>	<i>Iteración</i>	<i>Medición</i>	<i>Diferencia</i>
1	373.73	0.17	1	167.01	0.22
2	373.72	0.18	2	167.08	0.15
3	373.72	0.18	3	167.07	0.16
4	373.73	0.17	4	167.04	0.19
5	373.7	0.20	5	167.03	0.20
6	373.69	0.21	6	167.07	0.16
7	373.7	0.20	7	167.02	0.21
8	373.67	0.23	8	167.04	0.19
9	373.63	0.27	9	167.02	0.21
10	373.64	0.26	10	167.05	0.18
11	373.7	0.20	11	167.08	0.15
12	373.71	0.19	12	167.08	0.15
13	373.68	0.22	13	167.08	0.15
14	373.66	0.24	14	167.02	0.21
15	373.64	0.26	15	167.07	0.16
16	373.64	0.26	16	167.02	0.21
17	373.64	0.26	17	167.01	0.22
18	373.62	0.28	18	167.04	0.19
19	373.62	0.28	19	167.04	0.19
20	373.61	0.29	20	167.03	0.20
21	373.7	0.20	21	167.02	0.21
22	373.64	0.26	22	167.03	0.20
23	373.66	0.24	23	167.06	0.17
24	373.72	0.18	24	167.02	0.21
25	373.68	0.22	25	167.07	0.16
26	373.61	0.29	26	167.03	0.20
27	373.62	0.28	27	167.02	0.21
28	373.61	0.29	28	167.02	0.21
29	373.61	0.29	29	167.01	0.22
30	373.6	0.30	30	167.06	0.17
Des. Est.	0.042		Des. Est.	0.024	
Promedio	373.66	0.24	Promedio	167.04	0.19

Tabla 4.5: Resultados del análisis metrológico de taller para la placa DD-ME-SST-P8B. Extraído de Microsoft Excel por elaboración propia.

Placa DD-ME-SST-P19					
Mediciones A [mm]			Mediciones B [mm]		
Valor Nominal [mm]		454.17	Valor Nominal [mm]		182.23
<i>Iteración</i>	<i>Medición</i>	<i>Diferencia</i>	<i>Iteración</i>	<i>Medición</i>	<i>Diferencia</i>
1	453.87	0.30	1	182.04	0.19
2	453.88	0.29	2	182.03	0.20
3	453.88	0.29	3	182.02	0.21
4	453.89	0.28	4	182.01	0.22
5	453.89	0.28	5	182.02	0.21
6	453.89	0.28	6	182.03	0.20
7	453.90	0.27	7	182.03	0.20
8	453.90	0.27	8	182.04	0.19
9	453.92	0.25	9	182.08	0.15
10	453.92	0.25	10	182.05	0.18
11	453.89	0.28	11	182.02	0.21
12	453.88	0.29	12	182.02	0.21
13	453.88	0.29	13	182.03	0.20
14	453.89	0.28	14	182.03	0.20
15	453.90	0.27	15	182.03	0.20
16	453.90	0.27	16	182.02	0.21
17	453.91	0.26	17	182.03	0.20
18	453.91	0.26	18	182.40	-0.17
19	453.91	0.26	19	182.08	0.15
20	453.93	0.24	20	182.04	0.19
21	453.88	0.29	21	182.03	0.20
22	453.88	0.29	22	182.03	0.20
23	453.89	0.28	23	182.02	0.21
24	453.89	0.28	24	182.02	0.21
25	453.90	0.27	25	182.02	0.21
26	453.91	0.26	26	182.02	0.21
27	453.92	0.25	27	182.02	0.21
28	453.91	0.26	28	182.03	0.20
29	453.92	0.25	29	182.04	0.19
30	453.93	0.24	30	182.04	0.19
Des. Est.	0.016		Des. Est.	0.069	
Promedio	453.90	0.27	Promedio	182.04	0.19

Tabla 4.6: Resultados del análisis metrológico de taller para la placa DD-ME-SST-P19. Extraído de Microsoft Excel por elaboración propia.

4.2. ANÁLISIS METROLÓGICO

Placa DD-ME-SST-P20					
Mediciones A [mm]			Mediciones B [mm]		
Valor Nominal [mm]		342.29	Valor Nominal [mm]		197.23
<i>Iteración</i>	<i>Medición</i>	<i>Diferencia</i>	<i>Iteración</i>	<i>Medición</i>	<i>Diferencia</i>
1	342.05	0.24	1	197.09	0.14
2	342.05	0.24	2	197.1	0.13
3	342.06	0.23	3	197.11	0.12
4	342.06	0.23	4	197.12	0.11
5	342.05	0.24	5	197.15	0.08
6	342.05	0.24	6	197.11	0.12
7	342.06	0.23	7	197.11	0.12
8	342.05	0.24	8	197.12	0.11
9	342.06	0.23	9	197.12	0.11
10	342.06	0.23	10	197.14	0.09
11	342.05	0.24	11	197.09	0.14
12	342.05	0.24	12	197.09	0.14
13	342.05	0.24	13	197.11	0.12
14	342.06	0.23	14	197.12	0.11
15	342.06	0.23	15	197.15	0.08
16	342.06	0.23	16	197.15	0.08
17	342.05	0.24	17	197.13	0.10
18	342.06	0.23	18	197.14	0.09
19	342.05	0.24	19	197.12	0.11
20	342.05	0.24	20	197.14	0.09
21	342.05	0.24	21	197.1	0.13
22	342.06	0.23	22	197.1	0.13
23	342.06	0.23	23	197.13	0.10
24	342.05	0.24	24	197.18	0.05
25	342.05	0.24	25	197.11	0.12
26	342.05	0.24	26	197.11	0.12
27	342.06	0.23	27	197.12	0.11
28	342.06	0.23	28	197.14	0.09
29	342.02	0.27	29	197.12	0.11
30	342.05	0.24	30	197.13	0.10
Des. Est.	0.008		Des. Est.	0.021	
Promedio	342.05	0.24	Promedio	197.12	0.11

Tabla 4.7: Resultados del análisis metrológico de taller para la placa DD-ME-SST-P20. Extraído de Microsoft Excel por elaboración propia.

Placa DD-ME-SST-CYSP1					
Mediciones A [mm]			Mediciones B [mm]		
Valor Nominal [mm]	433.9		Valor Nominal [mm]	183.56	
<i>Iteración</i>	<i>Medición</i>	<i>Diferencia</i>	<i>Iteración</i>	<i>Medición</i>	<i>Diferencia</i>
1	433.79	0.11	1	183.48	0.08
2	433.78	0.12	2	183.47	0.09
3	433.76	0.14	3	183.46	0.10
4	433.79	0.11	4	183.43	0.13
5	433.73	0.17	5	183.42	0.14
6	433.64	0.26	6	183.44	0.12
7	433.64	0.26	7	183.44	0.12
8	433.62	0.28	8	183.41	0.15
9	433.67	0.23	9	183.39	0.17
10	433.66	0.24	10	183.38	0.18
11	433.76	0.14	11	183.5	0.06
12	433.68	0.22	12	183.47	0.09
13	433.71	0.19	13	183.43	0.13
14	433.68	0.22	14	183.49	0.07
15	433.78	0.12	15	183.41	0.15
16	433.74	0.16	16	183.43	0.13
17	433.73	0.17	17	183.41	0.15
18	433.65	0.25	18	183.4	0.16
19	433.64	0.26	19	183.39	0.17
20	433.64	0.26	20	183.37	0.19
21	433.76	0.14	21	183.5	0.06
22	433.77	0.13	22	183.45	0.11
23	433.77	0.13	23	183.44	0.12
24	433.78	0.12	24	183.44	0.12
25	433.71	0.19	25	183.44	0.12
26	433.66	0.24	26	183.43	0.13
27	433.65	0.25	27	183.44	0.12
28	433.63	0.27	28	183.42	0.14
29	433.65	0.25	29	183.39	0.17
30	433.61	0.29	30	183.36	0.20
Des. Est.	0.060		Des. Est.	0.037	
Promedio	433.70	0.20	Promedio	183.43	0.13

Tabla 4.8: Resultados del análisis metrológico de taller para la placa DD-ME-SST-CYSP1. Extraído de Microsoft Excel por elaboración propia.

Placa DD-ME-SST-CYSP2					
Mediciones A [mm]			Mediciones B [mm]		
Valor Nominal [mm]		488.17	Valor Nominal [mm]		183.56
<i>Iteración</i>	<i>Medición</i>	<i>Diferencia</i>	<i>Iteración</i>	<i>Medición</i>	<i>Diferencia</i>
1	488.04	0.13	1	183.33	0.23
2	488.05	0.12	2	183.36	0.20
3	488.06	0.11	3	183.32	0.24
4	488.04	0.13	4	183.39	0.17
5	488.06	0.11	5	183.39	0.17
6	487.99	0.18	6	183.4	0.16
7	487.92	0.25	7	183.39	0.17
8	487.93	0.24	8	183.4	0.16
9	487.93	0.24	9	183.4	0.16
10	487.96	0.21	10	183.29	0.27
11	487.97	0.20	11	183.3	0.26
12	488.04	0.13	12	183.38	0.18
13	488.05	0.12	13	183.37	0.19
14	488.05	0.12	14	183.37	0.19
15	488.06	0.11	15	183.33	0.23
16	487.93	0.24	16	183.33	0.23
17	487.96	0.21	17	183.43	0.13
18	487.9	0.27	18	183.35	0.21
19	487.91	0.26	19	183.4	0.16
20	487.93	0.24	20	183.3	0.26
21	488.06	0.11	21	183.3	0.26
22	488.06	0.11	22	183.39	0.17
23	488.08	0.09	23	183.38	0.18
24	488.05	0.12	24	183.38	0.18
25	488.05	0.12	25	183.4	0.16
26	487.95	0.22	26	183.4	0.16
27	487.91	0.26	27	183.33	0.23
28	487.96	0.21	28	183.32	0.24
29	487.9	0.27	29	183.39	0.17
30	487.93	0.24	30	183.31	0.25
Des. Est.	0.063		Des. Est.	0.040	
Promedio	487.99	0.18	Promedio	183.36	0.20

Tabla 4.9: Resultados del análisis metrológico de taller para la placa DD-ME-SST-CYSP2. Extraído de Microsoft Excel por elaboración propia.

Placa DD-ME-SST-CYSP3					
Mediciones A [mm]			Mediciones B [mm]		
Valor Nominal [mm]		398.9	Valor Nominal [mm]		183.56
Iteración	Medición	Diferencia	Iteración	Medición	Diferencia
1	398.7	0.20	1	183.47	0.09
2	398.74	0.16	2	183.53	0.03
3	398.75	0.15	3	183.52	0.04
4	398.75	0.15	4	183.52	0.04
5	398.74	0.16	5	183.54	0.02
6	398.76	0.14	6	183.54	0.02
7	398.77	0.13	7	183.55	0.01
8	398.75	0.15	8	183.54	0.02
9	398.74	0.16	9	183.53	0.03
10	398.74	0.16	10	183.55	0.01
11	398.7	0.20	11	183.52	0.04
12	398.75	0.15	12	183.53	0.03
13	398.75	0.15	13	183.54	0.02
14	398.75	0.15	14	183.54	0.02
15	398.75	0.15	15	183.53	0.03
16	398.76	0.14	16	183.54	0.02
17	398.76	0.14	17	183.53	0.03
18	398.75	0.15	18	183.55	0.01
19	398.74	0.16	19	183.53	0.03
20	398.75	0.15	20	183.55	0.01
21	398.74	0.16	21	183.51	0.05
22	398.75	0.15	22	183.53	0.03
23	398.74	0.16	23	183.54	0.02
24	398.76	0.14	24	183.52	0.04
25	398.76	0.14	25	183.52	0.04
26	398.76	0.14	26	183.52	0.04
27	398.76	0.14	27	183.53	0.03
28	398.74	0.16	28	183.54	0.02
29	398.75	0.15	29	183.56	0.00
30	398.76	0.14	30	183.55	0.01
Des. Est.	0.015		Des. Est.	0.017	
Promedio	398.75	0.15	Promedio	183.53	0.03

Tabla 4.10: Resultados del análisis metrológico de taller para la placa DD-ME-SST-CYSP3. Extraído de Microsoft Excel por elaboración propia.

Placa DD-ME-SST-CYSP4					
Mediciones A [mm]			Mediciones B [mm]		
Valor Nominal [mm]	458.17		Valor Nominal [mm]	183.56	
<i>Iteración</i>	<i>Medición</i>	<i>Diferencia</i>	<i>Iteración</i>	<i>Medición</i>	<i>Diferencia</i>
1	457.92	0.25	1	183.44	0.12
2	458.01	0.16	2	183.42	0.14
3	458.07	0.10	3	183.46	0.10
4	458.06	0.11	4	183.41	0.15
5	458.08	0.09	5	183.47	0.09
6	458.06	0.11	6	183.42	0.14
7	458.1	0.07	7	183.46	0.10
8	458.09	0.08	8	183.43	0.13
9	457.9	0.27	9	183.42	0.14
10	457.91	0.26	10	183.5	0.06
11	458.06	0.11	11	183.41	0.15
12	458.09	0.08	12	183.48	0.08
13	458.1	0.07	13	183.43	0.13
14	458.06	0.11	14	183.42	0.14
15	458.03	0.14	15	183.44	0.12
16	457.93	0.24	16	183.46	0.10
17	458.09	0.08	17	183.42	0.14
18	457.9	0.27	18	183.45	0.11
19	457.91	0.26	19	183.44	0.12
20	457.93	0.24	20	183.42	0.14
21	458.07	0.10	21	183.46	0.10
22	458.06	0.11	22	183.42	0.14
23	458.01	0.16	23	183.41	0.15
24	458.02	0.15	24	183.42	0.14
25	458.02	0.15	25	183.44	0.12
26	458.07	0.10	26	183.48	0.08
27	457.99	0.18	27	183.43	0.13
28	457.93	0.24	28	183.5	0.06
29	457.91	0.26	29	183.47	0.09
30	457.9	0.27	30	183.48	0.08
Des. Est.	0.074		Des. Est.	0.027	
Promedio	458.01	0.16	Promedio	183.44	0.12

Tabla 4.11: Resultados del análisis metrológico de taller para la placa DD-ME-SST-CYSP4. Extraído de Microsoft Excel por elaboración propia.

Placa DD-ME-SST-CYSP5B					
Mediciones A [mm]			Mediciones B [mm]		
Valor Nominal [mm]		259.04	Valor Nominal [mm]		172.00
Iteración	Medición	Diferencia	Iteración	Medición	Diferencia
1	258.73	0.31	1	171.73	0.27
2	258.74	0.30	2	171.73	0.27
3	258.74	0.30	3	171.73	0.27
4	258.74	0.30	4	171.73	0.27
5	258.75	0.29	5	171.74	0.26
6	258.76	0.28	6	171.78	0.22
7	258.75	0.29	7	171.78	0.22
8	258.73	0.31	8	171.78	0.22
9	258.75	0.29	9	171.78	0.22
10	258.75	0.29	10	171.79	0.21
11	258.73	0.31	11	171.73	0.27
12	258.73	0.31	12	171.74	0.26
13	258.74	0.30	13	171.74	0.26
14	258.74	0.30	14	171.73	0.27
15	258.74	0.30	15	171.74	0.26
16	258.76	0.28	16	171.8	0.20
17	258.75	0.29	17	171.78	0.22
18	258.76	0.28	18	171.79	0.21
19	258.75	0.29	19	171.79	0.21
20	258.75	0.29	20	171.79	0.21
21	258.72	0.32	21	171.73	0.27
22	258.73	0.31	22	171.73	0.27
23	258.73	0.31	23	171.73	0.27
24	258.74	0.30	24	171.75	0.25
25	258.75	0.29	25	171.77	0.23
26	258.76	0.28	26	171.82	0.18
27	258.76	0.28	27	171.76	0.24
28	258.77	0.27	28	171.77	0.23
29	258.74	0.30	29	171.78	0.22
30	258.75	0.29	30	171.79	0.21
Des. Est.	0.012		Des. Est.	0.028	
Promedio	258.74	0.30	Promedio	171.76	0.24

Tabla 4.12: Resultados del análisis metrológico de taller para la placa DD-ME-SST-CYSP5B. Extraído de Microsoft Excel por elaboración propia.

4.2. ANÁLISIS METROLÓGICO

<i>Placa</i>	<i>Dim.</i>	<i>Nominal</i>	<i>Tol.</i>	<i>Actual Prom.</i>	<i>Dif. Prom.</i>	<i>Des. Est.</i>
DD-ME-SST-P3	A	629.00	0.500	628.76	0.24	0.023
	B	225.71	0.500	225.52	0.19	0.031
DD-ME-SST-P5B	A	629.00	0.500	628.73	0.27	0.016
	B	460.60	0.500	460.46	0.14	0.033
DD-ME-SST-P6B	A	445.35	0.500	445.35	0.25	0.020
	B	N/A	0.500	N/A	N/A	N/A
DD-ME-SST-P8B	A	373.90	0.500	373.66	0.24	0.042
	B	167.23	0.500	167.04	0.19	0.024
DD-ME-SST-P19	A	454.17	0.500	453.90	0.27	0.016
	B	182.23	0.500	182.04	0.19	0.069
DD-ME-SST-P20	A	342.29	0.500	342.05	0.24	0.008
	B	197.23	0.500	197.12	0.11	0.021
DD-ME-SST-CYSP1	A	433.90	0.500	433.70	0.20	0.060
	B	183.56	0.500	183.43	0.13	0.037
DD-ME-SST-CYSP2	A	488.17	0.500	487.99	0.18	0.063
	B	183.56	0.500	183.36	0.20	0.040
DD-ME-SST-CYSP3	A	389.90	0.500	398.75	0.15	0.015
	B	183.56	0.500	183.53	0.03	0.017
DD-ME-SST-CYSP4	A	458.17	0.500	458.01	0.16	0.074
	B	183.56	0.500	183.44	0.12	0.027
DD-ME-SST-CYSP5B	A	259.04	0.500	258.74	0.30	0.012
	B	172.00	0.500	171.76	0.24	0.028

Tabla 4.13: *Tabla de resultados resumida. Todos los valores en [mm].*

Como es posible apreciar en la Tabla 4.13, las dimensiones analizadas de las placas en cuestión resultaron estar dentro de los valores de tolerancia asignados con una desviación estándar en promedio de 0.032 [mm], es decir 32 [μm], que con base en lo expuesto por Grous e incluido en el Marco Teórico del presente trabajo, se puede definir como la exactitud del proceso de medición. Para tener una mayor certeza de que el análisis es confiable, este valor se comparó con el proporcionado por Mitutoyo para la exactitud, el cual es de ± 0.05 [mm]. Al comparar ambos valores nos encontramos que la exactitud del proceso de medición se encuentra dentro del rango de exactitud de fábrica, por lo tanto, el análisis es confiable. Esto respaldando las definiciones de precisión y confiabilidad propuestas por Grous, definidas como la altura de la distribución normal de las mediciones, las cuales al ser menores a un valor de 0.3 la distribución normal tiende a ser más alta de lo comúnmente observado, es decir, es menor la altura a un valor de 1, en este caso es una proporción de

aproximadamente 10 veces menor, por lo tanto, es más alta la distribución obtenida. Un ejemplo de ello se muestra en las Figuras 4.14 y 4.15; cabe mencionar que el área bajo la curva de la distribución normal sigue siendo 1, como se muestra en la distribución normal acumulada de la Figura 4.16 y 4.17.

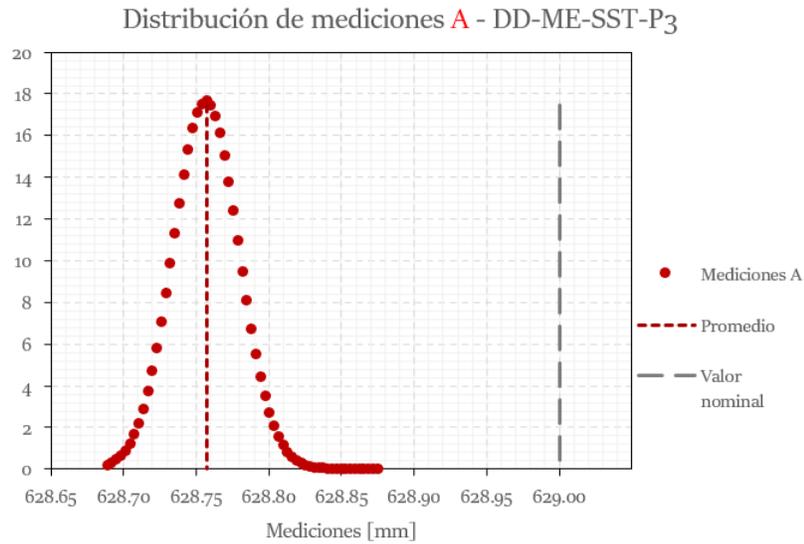


Figura 4.14: *Distribución normal de las mediciones de la dimensión A de la placa DD-ME-SST-P₃ con des. est. 0.023 y promedio 628.76 [mm]. Nótese el valor de la altura de la distribución. Imagen de elaboración propia en Microsoft Excel.*

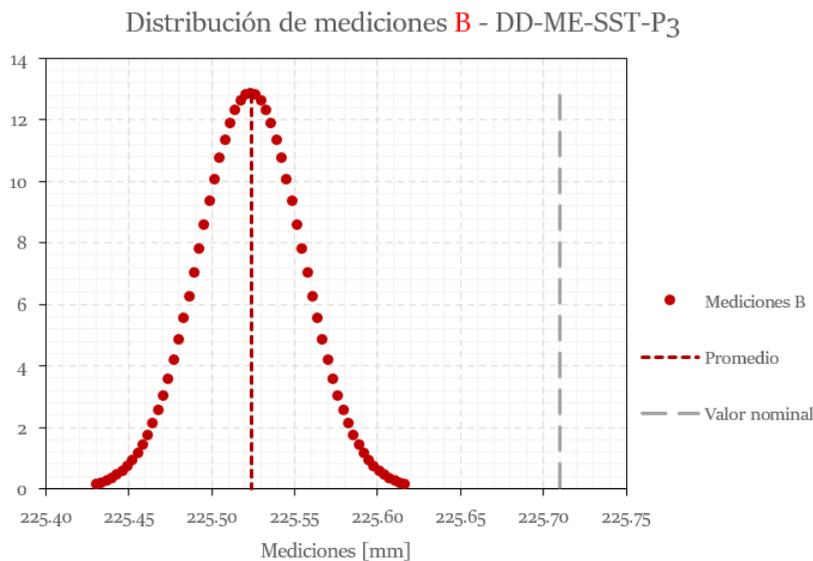


Figura 4.15: *Distribución normal de las mediciones de la dimensión B de la placa DD-ME-SST-P₃ con des. est. 0.031 y promedio 225.52 [mm]. Nótese el valor de la altura de la distribución. Imagen de elaboración propia en Microsoft Excel.*

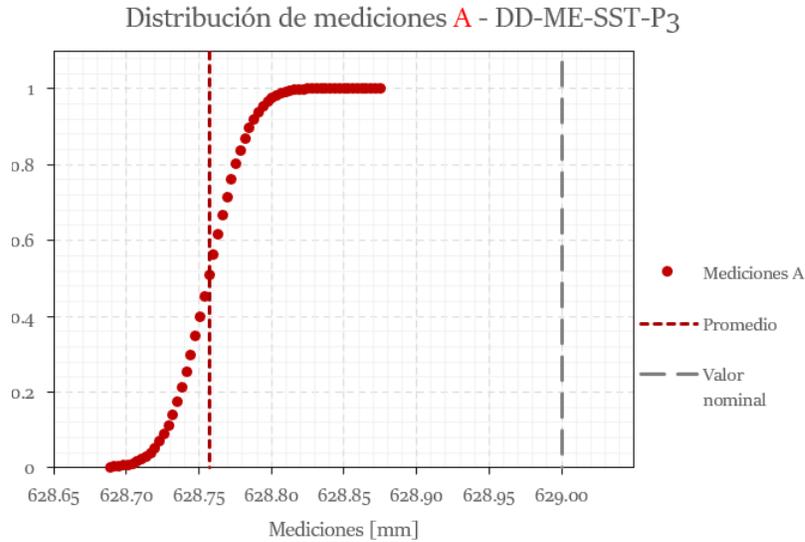


Figura 4.16: *Distribución normal acumulada de las mediciones de la dimensión A de la placa DD-ME-SST-P3 con des. est. 0.023 y promedio 628.76 [mm]. Nótese que la curva tiende al valor de 1. Imagen de elaboración propia en Microsoft Excel.*

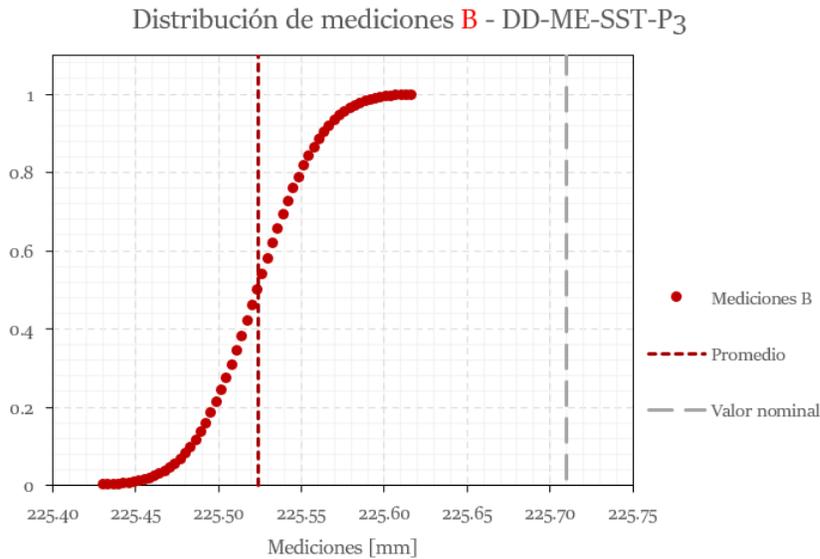


Figura 4.17: *Distribución normal acumulada de las mediciones de la dimensión A de la placa DD-ME-SST-P3 con des. est. 0.031 y promedio 225.52 [mm]. Nótese que la curva tiende al valor de 1. Imagen de elaboración propia en Microsoft Excel.*

Ahora bien, es importante mencionar el significado de la desviación estándar de las mediciones lineales, la cual como fue mencionado en el Marco Teórico se interpreta como la dispersión de las mediciones respecto al valor promedio pero adicionando en este caso una regla extraída de la estadística bastante común conocida como la regla empírica, la

cual permite auxiliar la interpretación de los resultados obtenidos por las razones explicadas a continuación. La regla empírica es utilizada para describir la variabilidad de un conjunto de datos, en particular para datos que se distribuyen de manera normal, es decir, se describen con una distribución gaussiana o normal y mientras más cerca se encuentre la distribución a la normal, más precisa será la regla. Brevemente la regla se resume en representar un porcentaje de la totalidad de los datos de la distribución respecto a n veces la desviación estándar, es decir, $n \times \sigma$, siendo los resultados más observados los tres porcentajes mostrados en la Figura 4.18.

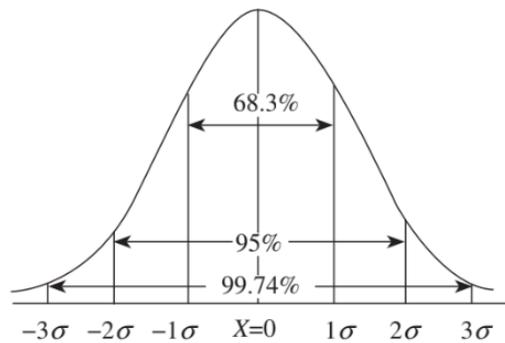


Figura 4.18: La regla empírica ejemplificada con intervalos de porcentaje de descripción para una distribución normal. Imagen extraída de [15].

Como es posible apreciar en la misma figura, el porcentaje que mejor describe la distribución es 99.74% con $n = 3$, es decir, tres veces la desviación estándar 3σ . Para el caso del análisis metrológico de taller esto resulta relevante ya que permite adicionalmente dar un resultado aproximado del paralelismo entre las caras laterales que definen a las dimensiones A y B, tomando el valor promedio de las mediciones como el plano promedio a partir del cual se otorga un intervalo de variación simétrico de 3σ , como se aprecia en la Figura 4.19. Permitiendo dar un valor a la diferencia entre los punto más alejados entre sí, y observar la calidad de las caras laterales de la pieza.

Cabe mencionar que en este caso no es adecuado emplear el símbolo σ debido a que se trata de una muestra poblacional, lo que es correcto es emplear s pero se ejemplifica de esa forma para mayor facilidad de entendimiento. En la Tabla 4.14 se incluyen los resultados

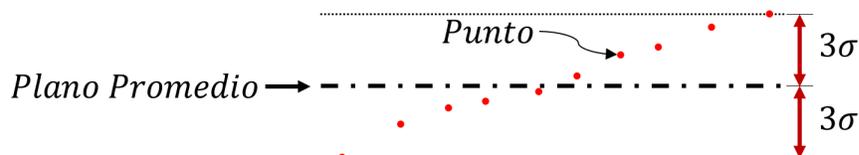


Figura 4.19: Paralelismo aproximado interpretado con base en la desviación estándar de las mediciones. Imagen extraída de Powerpoint por elaboración propia.

obtenidos para cada placa analizada, mencionando además que no existe como tal una especificación de diseño que regule esta condición de paralelismo entre caras, por lo tanto, únicamente se reporta y analiza.

<i>Placa</i>	<i>Dimensión</i>	3σ
DD-ME-SST-P3	A	0.069
	B	0.093
DD-ME-SST-P5B	A	0.048
	B	0.099
DD-ME-SST-P6B	A	0.060
	B	N/A
DD-ME-SST-P8B	A	0.126
	B	0.072
DD-ME-SST-P19	A	0.048
	B	0.207
DD-ME-SST-P20	A	0.024
	B	0.063
DD-ME-SST-CYSP1	A	0.180
	B	0.111
DD-ME-SST-CYSP2	A	0.189
	B	0.120
DD-ME-SST-CYSP3	A	0.045
	B	0.051
DD-ME-SST-CYSP4	A	0.222
	B	0.081
DD-ME-SST-CYSP5B	A	0.036
	B	0.084

Tabla 4.14: Resultados obtenidos para el paralelismo aproximado entre caras laterales interpretado para el análisis metrológico de taller. Todos los valores en [mm].

Los resultados presentados permiten observar grandes variaciones en cada caso de análisis por placas en un rango de valores de 0.024 a 0.222 [mm], permitiendo así además de notar que las placas en prácticamente la mitad rebasa valores de 0.040 [mm], valor em-

pleado posteriormente para el análisis metrológico de precisión que permite concluir que el maquinado general no dió resultados consistentes entre sí, es decir, de manera preliminar la manufactura no fue precisa pero sí se encuentra dentro de tolerancias lineales, como se mencionó previamente.

Por último, en tanto a posibles fuentes de error e incertidumbre se pensó que el medir la dimensión A de las placas DD-ME-SST-P3 y DD-ME-SST-P5B que es de 629 [mm], la cual sobrepasa el rango de medición del calibrador Vernier por 9 [mm]. Sin embargo, la exactitud del proceso de medición documentada en las Tablas 4.2 y 4.3 mediante la desviación estándar siendo de 0.023 y 0.016 [mm], respectivamente, las cuales están contenidas dentro de la exactitud mencionada anteriormente por Mitutoyo concluyendo así que incluso fuera de su rango recomendado la exactitud del calibrador Vernier se mantiene. De cualquier forma, este problema fue eliminado para las placas analizadas posteriormente al analizarlas con la CMM que dispone de un mayor rango de medición.

4.2.2. Análisis metrológico de precisión

A diferencia del análisis metrológico de taller, el análisis de precisión tiene como objetivo la evaluación más detallada y exhaustiva de los procesos productivos, así como el poder analizar dimensiones que con el calibrador Vernier no son posibles de obtener (como ángulos y tolerancias geométricas) y también la evaluación de geometrías más complejas. Para esto se empleó una mesa de medición por coordenadas (CMM por sus siglas en inglés de “Coordinate Measuring Machine”) con la cual es sencillo cumplir con la exhaustividad del análisis y además la medición de geometrías más complejas. La CMM empleada en el laboratorio de metrología del Instituto de Astronomía fue una Mitutoyo Crysta-Plus M7106 la cual se puede apreciar en la Figura 4.20.

A diferencia del análisis metrológico de taller, el análisis de precisión depende de las condiciones ambientales de análisis debido a tener una mayor exactitud y menor error en sus mediciones. Para ello, se siguieron las recomendaciones proporcionadas por Mitutoyo en sus cursos sobre metrología encontrados en la plataforma YouTube. Las recomendaciones



Figura 4.20: Mesa de medición por coordenadas (CMM) disponible en el Instituto de Astronomía en Ciudad Universitaria. Imagen obtenida por elaboración propia y extraída del boletín No.1957 de Mitutoyo.

son las siguientes:

- El lugar de análisis se recomienda mantener a una temperatura controlada de 20 [° C] con una variación permitida de ± 0.5 [° C].
- Las piezas de análisis deberán dejarse reposar alrededor de 8 horas o una noche entera junto a la referencia empleada para que se encuentren a la misma temperatura de análisis, en el caso de una CMM las piezas se deberán dejar reposar junto a la mesa de granito.
- Mantener un ambiente térmicamente estable mediante un control en las puertas de acceso y garantizar un correcto flujo de aire fuera de la zona de medición para mezclar el aire fuera del proceso de medición y que gradualmente se alcance un estado estable. Adicionalmente, se deberán controlar las fuentes de energía como lo son luces, sistemas computacionales y tener la menor cantidad de personas en el lugar de medición y que el número de ellas sea constante.

Objetivos de análisis metrológico de precisión

El objetivo primordial del análisis de precisión fue obtener mediciones de las dimensiones particulares de las piezas mencionadas en la Tabla 4.1 y así, poder evaluar los procesos

productivos exhaustivamente para las piezas más importantes de la estructura así como aquellas que no fue posible analizar con el análisis de taller para así decidir si se aceptan o no las piezas con mayores requerimientos y de referencia. Como objetivos puntuales se tienen:

- Asegurar la exhaustividad de evaluación de las piezas así como la uniformidad en las mediciones.
- Estudiar exhaustivamente las capacidades de los procesos productivos.
- Realizar planos de metrología de precisión para tener un protocolo más en sintonía con los procesos de diseño.
- Evaluar geometrías más complejas así como tolerancias geométricas, ángulos y pandeos.
- Identificar los procesos evaluativos y de cálculo de la CMM a mayor detalle, así como la documentación entregada como post-procesamiento, obtener el error de la CMM.
- Investigar, evaluar y eliminar fuentes de error en las mediciones.

Metodología del análisis metrológico de precisión

De acuerdo con la tabla 4.1, serán analizadas cuatro placas con el uso de la mesa de medición por coordenadas Mitutoyo Crysta-Plus M7106, la cual dispone de las siguientes características importantes:

- Rango de medición: en el eje X 700 [mm], en el eje Y 1000 [mm] y en el eje Z 600 [mm].
- Temperatura de trabajo: $20 [^{\circ}C] \pm 1 [^{\circ} C]$.
- Resolución: $0.5 [\mu m]$.
- Material mesa de referencia: Granito.

En este caso la instrucción por parte del equipo de diseño fue evaluar dimensiones generales, espesores, ángulos relevantes característicos de las piezas, pandeos y paralelismo

entre las caras de referencia. Para identificar puntualmente para cada placa, se elaboraron planos de metrología de precisión con los cuales se basaron los análisis metrológicos; dichos planos pueden ser analizados a mayor detalle en el Anexo II al final del documento. Cabe mencionar que se analizaron propiedades adicionales de las placas para tener mayor información de las mismas, como lo son paralelismo y perpendicularidad entre caras laterales y ángulos entre caras, estos últimos no serán reportados en los resultados pero se encuentran disponibles y analizados en la hoja de cálculo de Excel en la cual fue desarrollado el análisis metrológico completo, dicha hoja de cálculo se encuentra disponible para su consulta en las referencias empleadas para el documento como un enlace a Google Drive³, así facilitando su lectura y análisis a profundidad. Se recomienda abrirlo desde Microsoft Excel para su mejor apreciación.

Previo al análisis sobre las placas en cuestión, se marcaron con tinta para metal todas las indicaciones de puntos, líneas y planos a generar en el software de análisis de Mitutoyo MCOSMOS, como se muestra en las Figuras 4.21 a 4.24. Posteriormente se llevaron al laboratorio de metrología para dejar que las placas estuvieran a la misma temperatura que la referencia de la CMM y el ambiente de medición.

Antes de iniciar la programación del análisis, se tomó nota de las condiciones ambientales del laboratorio y corroborando que se encuentran dentro de las especificaciones de operación de la CMM se puede continuar. La programación del análisis se realiza desde el mando de la CMM indicando punto de inicio, traslado del palpador y medición de un punto, haciendo especial énfasis en que la CMM recopila puntos con tres dimensiones. Para ello, se tomaron seis puntos sobre la cara frontal y seis sobre la superficie de granito, posteriormente se tomaron seis puntos en cada cara lateral con la condición de tomar tres en una misma coordenada z y tres en otra.

Con los datos recopilados se realiza el post-procesamiento generando líneas y planos para tener referencias de medición, posteriormente se programan las operaciones de medi-

³Hoja de cálculo desarrollada disponible para su consulta en [12].



Figura 4.21: Placa DD-ME-SST-P2 rotulada en tinta verde indicando puntos, líneas y planos a generar con la CMM y MCOSMOS. Imagen de elaboración propia.

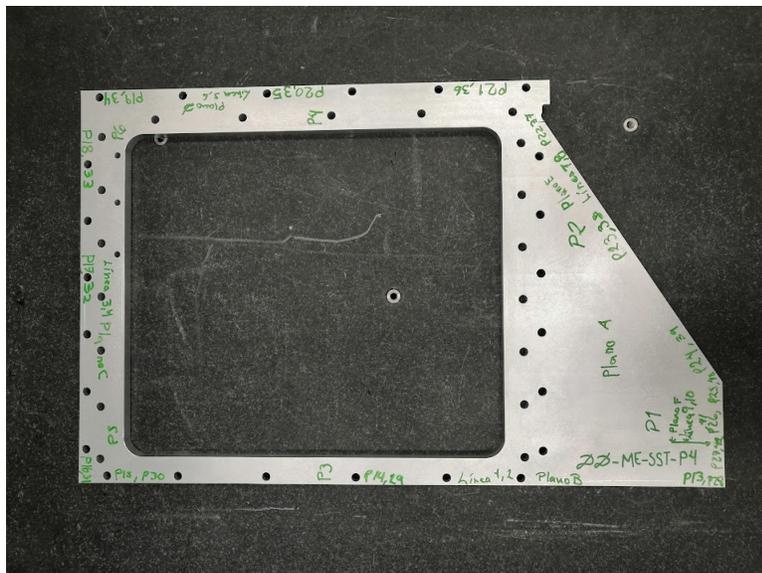


Figura 4.22: Placa DD-ME-SST-P4 rotulada en tinta verde indicando puntos, líneas y planos a generar con la CMM y MCOSMOS. Imagen de elaboración propia.

ción de distancias normales entre puntos y líneas para medir las dimensiones generales de las piezas, realizando seis mediciones entre los seis puntos y las líneas de la cara opuesta, obteniendo así distancias normales entre un punto y una línea; para medir el espesor de la pieza se mide entre puntos y el plano de referencia de granito. Por último se miden ángulos entre planos, paralelismos y perpendicularidades.

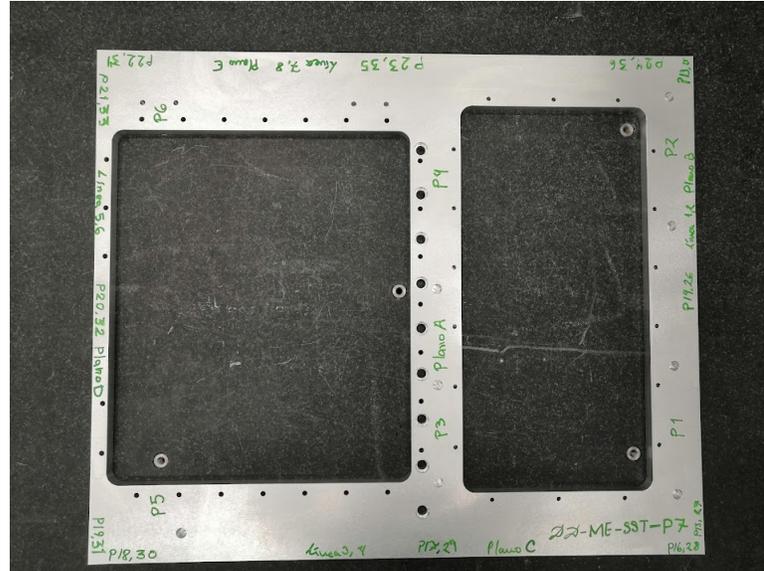


Figura 4.23: Placa DD-ME-SST-P10 rotulada en tinta verde indicando puntos, líneas y planos a generar con la CMM y MCOSMOS. Imagen de elaboración propia.

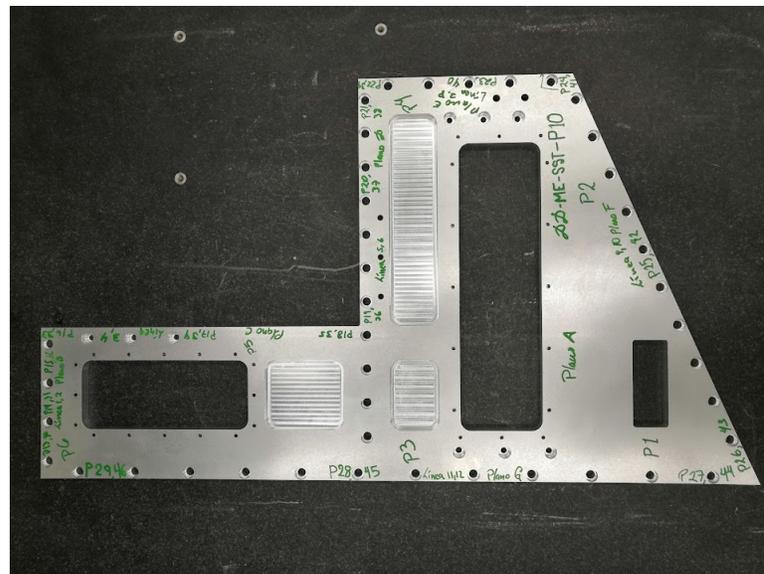


Figura 4.24: Placa DD-ME-SST-P10 rotulada en tinta verde indicando puntos, líneas y planos a generar con la CMM y MCOSMOS. Imagen de elaboración propia.

Resultados del análisis metrológico de precisión

El software MCOSMOS ha sido diseñado para realizar análisis metrológicos de precisión, lo que permite ejecutar varias veces la misma rutina. Esto ofrece la capacidad de obtener una gran cantidad de datos, lo que a su vez permite analizar con mayor detalle las placas en cuestión, asegurando la exhaustividad de la evaluación de las piezas. En este

Espesor - Plano Mármol (PM) a Puntos 1 a 6 (Pi)						Plano de Análisis		Método de Análisis				
Nominal	15.000	[mm]	Tolerancia \pm		0.050	[mm]	YZ	Punto a Plano				
Medición	Iteración											
	0	Dif.	1	Dif.	2	Dif.	3	Dif.	4	Dif.	5	Dif.
PM-P1	15.061	0.061	15.060	0.060	15.060	0.060	15.060	0.060	15.059	0.059	15.060	0.060
PM-P2	15.074	0.074	15.073	0.073	15.073	0.073	15.073	0.073	15.073	0.073	15.073	0.073
PM-P3	15.155	0.155	15.154	0.154	15.154	0.154	15.154	0.154	15.154	0.154	15.154	0.154
PM-P4	15.211	0.211	15.209	0.209	15.209	0.209	15.209	0.209	15.208	0.208	15.209	0.209
PM-P5	15.102	0.102	15.099	0.099	15.100	0.100	15.100	0.100	15.099	0.099	15.100	0.100
PM-P6	15.082	0.082	15.080	0.080	15.080	0.080	15.080	0.080	15.080	0.080	15.080	0.080
Des. Est.	0.058		0.058		0.058		0.058		0.057		0.058	
Promedio	15.114	0.114	15.113	0.113	15.113	0.113	15.113	0.113	15.112	0.112	15.113	0.113

Tabla 4.15: Resultados del análisis metrológico de precisión de la dimensión del espesor para la placa DD-ME-SST-P2. Extraído de Microsoft Excel por elaboración propia

Dimensión A [mm]						Plano de Análisis		Método de Análisis				
Nominal	813.250	[mm]	Tolerancia \pm		0.500	[mm]	XY	Punto a Línea				
Medición	Iteración											
	0	Dif.	1	Dif.	2	Dif.	3	Dif.	4	Dif.	5	Dif.
L1-P19	812.869	-0.381	812.865	-0.385	812.865	-0.385	812.865	-0.385	812.864	-0.386	812.864	-0.386
L1-P20	812.867	-0.383	812.863	-0.387	812.863	-0.387	812.862	-0.388	812.862	-0.388	812.862	-0.388
L1-P21	812.897	-0.353	812.893	-0.357	812.893	-0.357	812.892	-0.358	812.892	-0.358	812.892	-0.358
L2-P34	812.815	-0.435	812.811	-0.439	812.811	-0.439	812.811	-0.439	812.810	-0.440	812.810	-0.440
L2-P35	812.804	-0.446	812.801	-0.449	812.801	-0.449	812.800	-0.450	812.800	-0.450	812.800	-0.450
L2-P36	812.891	-0.359	812.887	-0.363	812.887	-0.363	812.886	-0.364	812.886	-0.364	812.886	-0.364
L5-P13	812.879	-0.371	812.875	-0.375	812.874	-0.376	812.874	-0.376	812.873	-0.377	812.873	-0.377
L5-P14	812.881	-0.369	812.877	-0.373	812.877	-0.373	812.876	-0.374	812.876	-0.374	812.876	-0.374
L5-P15	812.872	-0.378	812.867	-0.383	812.867	-0.383	812.867	-0.383	812.867	-0.383	812.867	-0.383
L6-P28	812.839	-0.411	812.836	-0.414	812.836	-0.414	812.835	-0.415	812.835	-0.415	812.835	-0.415
L6-P29	812.848	-0.402	812.844	-0.406	812.844	-0.406	812.844	-0.406	812.844	-0.406	812.843	-0.407
L6-P30	812.808	-0.442	812.804	-0.446	812.804	-0.446	812.804	-0.446	812.803	-0.447	812.803	-0.447
Des. Est.	0.033		0.032		0.032		0.032		0.032		0.032	
Promedio	812.856	-0.394	812.852	-0.398	812.852	-0.398	812.851	-0.399	812.851	-0.399	812.851	-0.399

Tabla 4.16: Resultados del análisis metrológico de precisión de la dimensión A para la placa DD-ME-SST-P2. Extraído de Microsoft Excel por elaboración propia

análisis en particular, se realizaron 6 iteraciones para cada análisis individual. Posteriormente, los datos obtenidos de MCOSMOS se extrajeron e interpretaron haciendo uso de la estadística, obteniendo para cada serie de mediciones desviación estándar y el promedio. A continuación se presentan los resultados obtenidos para las placas DD-ME-SST-P2, DD-ME-SST-P4 y DD-ME-SST-P7.

4.2. ANÁLISIS METROLÓGICO

Dimensión B [mm]			Plano de Análisis				Método de Análisis					
Nominal	629.000	[mm]	Tolerancia ±	0.500	[mm]	XY	Punto a Línea					
Medición	Iteración											
	0	Dif.	1	Dif.	2	Dif.	3	Dif.	4	Dif.	5	Dif.
L3-P22	628.748	-0.252	628.744	-0.256	628.743	-0.257	628.743	-0.257	628.743	-0.257	628.744	-0.256
L3-P23	628.717	-0.283	628.713	-0.287	628.713	-0.287	628.712	-0.288	628.712	-0.288	628.713	-0.287
L3-P24	628.728	-0.272	628.725	-0.275	628.724	-0.276	628.724	-0.276	628.724	-0.276	628.725	-0.275
L4-P37	628.718	-0.282	628.714	-0.286	628.714	-0.286	628.714	-0.286	628.714	-0.286	628.714	-0.286
L4-P38	628.692	-0.308	628.688	-0.312	628.687	-0.313	628.687	-0.313	628.687	-0.313	628.687	-0.313
L4-P39	628.679	-0.321	628.675	-0.325	628.675	-0.325	628.675	-0.325	628.675	-0.325	628.676	-0.324
L7-P16	628.680	-0.320	628.677	-0.323	628.676	-0.324	628.677	-0.323	628.677	-0.323	628.677	-0.323
L7-P17	628.707	-0.293	628.704	-0.296	628.704	-0.296	628.704	-0.296	628.704	-0.296	628.705	-0.295
L7-P18	628.730	-0.270	628.726	-0.274	628.725	-0.275	628.725	-0.275	628.724	-0.276	628.725	-0.275
L8-P31	628.657	-0.343	628.654	-0.346	628.654	-0.346	628.653	-0.347	628.653	-0.347	628.654	-0.346
L8-P32	628.685	-0.315	628.681	-0.319	628.681	-0.319	628.681	-0.319	628.681	-0.319	628.682	-0.318
L8-P33	628.702	-0.298	628.698	-0.302	628.697	-0.303	628.697	-0.303	628.697	-0.303	628.697	-0.303
Des. Est.	0.026		0.026		0.026		0.026		0.026		0.026	
Promedio	628.704	-0.296	628.700	-0.300	628.699	-0.301	628.699	-0.301	628.699	-0.301	628.700	-0.300

Tabla 4.17: Resultados del análisis metrológico de precisión de la dimensión B para la placa DD-ME-SST-P2. Extraído de Microsoft Excel por elaboración propia.

Angulo entre Planos E y F [°]			Plano de Análisis				Método de Análisis					
Nominal	33.00	[°]	Tolerancia ±	0.10	[°]	-	Angulo entre planos					
Elemento	Iteración											
	0	1		2		3		4		5		
Valor CMM	32:59:25		32:59:25		32:59:25		32:59:25		32:59:25	32:59:24		
Separación	32	59	25	32	59	25	32	59	25	32	59	24
Decimal	32.99	Dif.	-0.01	32.99	Dif.	-0.01	32.99	Dif.	-0.01	32.99	Dif.	-0.01
s	0.000											
Promedio	32.990	-0.010										

Tabla 4.18: Resultados del análisis metrológico de precisión del ángulo E-F para la placa DD-ME-SST-P2. Extraído de Microsoft Excel por elaboración propia.

Paralelismo entre Planos A y Mármol [mm]			Plano de Análisis				Método de Análisis					
Nominal	0.04	[mm]	Tolerancia ±	-	[mm]		Angulo entre planos					
Elemento	Iteración											
	0	Dif.	1	Dif.	2	Dif.	3	Dif.	4	Dif.	5	Dif.
Valor	0.190	-0.150	0.191	-0.151	0.191	-0.151	0.191	-0.151	0.191	-0.151	0.191	-0.151
R	0.00025											
s	0.0004082											
s2	1.667E-07											
Promedio	0.191	-0.151										

Tabla 4.19: Resultados del análisis metrológico de precisión del paralelismo Plano A y Plano de Granito para la placa DD-ME-SST-P2. Extraído de Microsoft Excel por elaboración propia.

Espesor - Plano Mármol (PM) a Puntos 1 a 6 (Pi)						Plano de Análisis		Método de Análisis				
Nominal	15.000	[mm]	Tolerancia \pm	0.050	[mm]	YZ	Punto a Plano					
Medición	Iteración											
	0	Dif.	1	Dif.	2	Dif.	3	Dif.	4	Dif.	5	Dif.
PM-P1	14.935	-0.065	14.936	-0.064	14.935	-0.065	14.936	-0.064	14.938	-0.062	14.937	-0.063
PM-P2	14.952	-0.048	14.950	-0.050	14.950	-0.050	14.952	-0.048	14.953	-0.047	14.953	-0.047
PM-P3	14.972	-0.028	14.972	-0.028	14.972	-0.028	14.973	-0.027	14.974	-0.026	14.974	-0.026
PM-P4	14.961	-0.039	14.959	-0.041	14.960	-0.040	14.962	-0.038	14.963	-0.037	14.964	-0.036
PM-P5	14.996	-0.004	14.994	-0.006	14.994	-0.006	14.995	-0.005	14.995	-0.005	14.996	-0.004
PM-P6	15.005	0.005	15.004	0.004	15.005	0.005	15.006	0.006	15.007	0.007	15.008	0.008
Des. Est.	0.027		0.026		0.027		0.026		0.026		0.027	
Promedio	14.970	-0.030	14.969	-0.031	14.969	-0.031	14.971	-0.029	14.972	-0.028	14.972	-0.028

Tabla 4.20: Resultados del análisis metrológico de precisión del espesor para la placa DD-ME-SST-P4. Extraído de Microsoft Excel por elaboración propia.

Dimensión A [mm]						Plano de Análisis		Método de Análisis				
Nominal	659.000	[mm]	Tolerancia \pm	0.500	[mm]	XY	Punto a Línea					
Medición	Iteración											
	0	Dif.	1	Dif.	2	Dif.	3	Dif.	4	Dif.	5	Dif.
L3-P25	658.598	-0.402	658.586	-0.414	658.589	-0.411	658.589	-0.411	658.593	-0.407	658.593	-0.407
L3-P26	658.599	-0.401	658.588	-0.412	658.591	-0.409	658.591	-0.409	658.595	-0.405	658.595	-0.405
L3-P27	658.596	-0.404	658.585	-0.415	658.587	-0.413	658.588	-0.412	658.591	-0.409	658.591	-0.409
L4-P40	658.616	-0.384	658.607	-0.393	658.609	-0.391	658.610	-0.390	658.613	-0.387	658.613	-0.387
L4-P41	658.628	-0.372	658.618	-0.382	658.620	-0.380	658.621	-0.379	658.624	-0.376	658.624	-0.376
L4-P42	658.604	-0.396	658.595	-0.405	658.597	-0.403	658.598	-0.402	658.601	-0.399	658.601	-0.399
L9-P16	658.590	-0.410	658.580	-0.420	658.582	-0.418	658.583	-0.417	658.586	-0.414	658.586	-0.414
L9-P17	658.617	-0.383	658.605	-0.395	658.608	-0.392	658.607	-0.393	658.612	-0.388	658.612	-0.388
L9-P18	658.608	-0.392	658.595	-0.405	658.598	-0.402	658.597	-0.403	658.603	-0.397	658.604	-0.396
L10-P31	658.594	-0.406	658.585	-0.415	658.587	-0.413	658.588	-0.412	658.591	-0.409	658.591	-0.409
L10-P32	658.648	-0.352	658.639	-0.361	658.641	-0.359	658.642	-0.358	658.645	-0.355	658.647	-0.353
L10-P33	658.619	-0.381	658.611	-0.389	658.612	-0.388	658.614	-0.386	658.615	-0.385	658.620	-0.380
Des. Est.	0.017		0.017		0.017		0.017		0.017		0.018	
Promedio	658.610	-0.390	658.600	-0.401	658.602	-0.398	658.602	-0.398	658.606	-0.394	658.606	-0.394

Tabla 4.21: Resultados del análisis metrológico de precisión de la dimensión A para la placa DD-ME-SST-P4. Extraído de Microsoft Excel por elaboración propia.

Dimensión B [mm]						Plano de Análisis		Método de Análisis				
Nominal	413.901	[mm]	Tolerancia \pm	0.500	[mm]	XY	Punto a Línea					
Medición	Iteración											
	0	Dif.	1	Dif.	2	Dif.	3	Dif.	4	Dif.	5	Dif.
L1-P19	413.591	-0.310	413.585	-0.316	413.587	-0.314	413.587	-0.314	413.589	-0.312	413.589	-0.312
L1-P20	413.580	-0.321	413.575	-0.326	413.576	-0.325	413.577	-0.324	413.579	-0.322	413.579	-0.322
L1-P21	413.615	-0.286	413.610	-0.291	413.611	-0.290	413.613	-0.288	413.614	-0.287	413.614	-0.287
L2-P34	413.621	-0.280	413.616	-0.285	413.617	-0.284	413.617	-0.284	413.619	-0.282	413.620	-0.281
L2-P35	413.594	-0.307	413.590	-0.311	413.591	-0.310	413.592	-0.309	413.594	-0.307	413.594	-0.307
L2-P36	413.612	-0.289	413.608	-0.293	413.609	-0.292	413.610	-0.291	413.612	-0.289	413.613	-0.288
L5-P13	413.646	-0.255	413.641	-0.260	413.642	-0.259	413.645	-0.256	413.646	-0.255	413.646	-0.255
L5-P14	413.604	-0.297	413.598	-0.303	413.600	-0.301	413.601	-0.300	413.603	-0.298	413.603	-0.298
L5-P15	413.591	-0.310	413.585	-0.316	413.586	-0.315	413.587	-0.314	413.589	-0.312	413.589	-0.312
L6-P28	413.611	-0.290	413.608	-0.293	413.610	-0.291	413.611	-0.290	413.613	-0.288	413.613	-0.288
L6-P29	413.635	-0.266	413.631	-0.270	413.632	-0.269	413.633	-0.268	413.635	-0.266	413.636	-0.265
L6-P30	413.614	-0.287	413.609	-0.292	413.610	-0.291	413.610	-0.291	413.612	-0.289	413.613	-0.288
Des. Est.	0.019		0.019		0.019		0.020		0.019		0.020	
Promedio	413.610	-0.291	413.605	-0.296	413.606	-0.295	413.607	-0.294	413.609	-0.292	413.609	-0.292

Tabla 4.22: Resultados del análisis metrológico de precisión de la dimensión B para la placa DD-ME-SST-P4. Extraído de Microsoft Excel por elaboración propia.

4.2. ANÁLISIS METROLÓGICO

Dimensión C [mm]				Plano de Análisis				Método de Análisis				
Nominal	492.174	[mm]	Tolerancia ±	0.500	[mm]	XY	Punto a Línea					
Medición	Iteración											
	0	Dif.	1	Dif.	2	Dif.	3	Dif.	4	Dif.	5	Dif.
L4-P43	491.909	-0.265	491.901	-0.273	491.903	-0.271	491.903	-0.271	491.905	-0.269	491.906	-0.268
L4-P44	491.911	-0.263	491.903	-0.271	491.905	-0.269	491.905	-0.269	491.908	-0.266	491.908	-0.266
L4-P45	491.910	-0.264	491.902	-0.272	491.904	-0.270	491.904	-0.270	491.906	-0.268	491.907	-0.267
L11-P31	491.882	-0.292	491.885	-0.289	491.880	-0.294	491.878	-0.296	491.879	-0.295	491.878	-0.296
L11-P32	491.949	-0.225	491.946	-0.228	491.945	-0.229	491.944	-0.230	491.946	-0.228	491.946	-0.228
L11-P33	491.929	-0.245	491.922	-0.252	491.923	-0.251	491.923	-0.251	491.924	-0.250	491.925	-0.249
Des. Est.	0.022		0.021		0.022		0.022		0.022		0.023	
Promedio	491.915	-0.259	491.910	-0.264	491.910	-0.264	491.910	-0.264	491.911	-0.263	491.912	-0.262

Tabla 4.23: Resultados del análisis metrológico de precisión de la dimensión C para la placa DD-ME-SST-P4. Extraído de Microsoft Excel por elaboración propia.

Angulo entre Planos E y F [°]				Plano de Análisis				Método de Análisis							
Nominal	33.00	[°]	Tolerancia ±	0.10	[°]	-	Angulo entre planos								
Elemento	Iteración														
	0	1		2		3		4		5					
Valor CMM	32:58:39		32:58:40		32:58:39		32:58:39		32:58:39		32:58:41				
Separación	32	58	39	32	58	40	32	58	39	32	58	39	32	58	41
Decimal	32.98	Dif.	-0.02	32.98	Dif.	-0.02	32.98	Dif.	-0.02	32.98	Dif.	-0.02	32.98	Dif.	-0.02
Des. Est.	0.0002														
Promedio	32.978	-0.022													

Tabla 4.24: Resultados del análisis metrológico de precisión del ángulo E-F para la placa DD-ME-SST-P4. Extraído de Microsoft Excel por elaboración propia.

Paralelismo entre Planos A y Mármol [mm]												
Nominal	0.04	[mm]	Tolerancia ±	-	[mm]							
Elemento	Iteración											
	0	1		2		3		4		5		
Valor	0.090	-0.050	0.088	-0.048	0.090	-0.050	0.089	-0.049	0.088	-0.048	0.090	-0.050
Des. Est.	0.0010											
Promedio	0.089	-0.049										

Tabla 4.25: Resultados del análisis metrológico de precisión del paralelismo Plano A y Plano de Granito para la placa DD-ME-SST-P4. Extraído de Microsoft Excel por elaboración propia.

Espesor - Plano Mármol (PM) a Puntos 1 a 6 (Pi)						Plano de Análisis		Método de Análisis				
Nominal	15.000	[mm]	Tolerancia ±	0.050	[mm]	YZ	Punto a Línea					
Medición	Iteración											
	0	Dif.	1	Dif.	2	Dif.	3	Dif.	4	Dif.	5	Dif.
PM-P1	15.272	0.272	15.272	0.272	15.271	0.271	15.271	0.271	15.271	0.271	15.271	0.271
PM-P2	15.200	0.200	15.199	0.199	15.199	0.199	15.199	0.199	15.199	0.199	15.199	0.199
PM-P3	15.159	0.159	15.157	0.157	15.157	0.157	15.157	0.157	15.156	0.156	15.156	0.156
PM-P4	15.134	0.134	15.132	0.132	15.132	0.132	15.132	0.132	15.132	0.132	15.132	0.132
PM-P5	15.143	0.143	15.141	0.141	15.141	0.141	15.141	0.141	15.141	0.141	15.141	0.141
PM-P6	15.080	0.080	15.078	0.078	15.078	0.078	15.078	0.078	15.078	0.078	15.078	0.078
Des. Est.	0.065		0.066		0.066		0.066		0.066		0.066	
Promedio	15.165	0.165	15.163	0.163	15.163	0.163	15.163	0.163	15.163	0.163	15.163	0.163

Tabla 4.26: Resultados del análisis metrológico de precisión del espesor para la placa DD-ME-SST-P7. Extraído de Microsoft Excel por elaboración propia.

Dimensión A [mm]			Plano de Análisis					Método de Análisis				
Nominal	629.000	[mm]	Tolerancia ±	0.500	[mm]	XY	Punto a Línea					
Medición	Iteración											
	0	Dif.	1	Dif.	2	Dif.	3	Dif.	4	Dif.	5	Dif.
L1-P19	628.625	-0.375	628.625	-0.375	628.625	-0.375	628.624	-0.376	628.625	-0.375	628.625	-0.375
L1-P20	628.679	-0.321	628.680	-0.320	628.679	-0.321	628.679	-0.321	628.678	-0.322	628.679	-0.321
L1-P21	628.650	-0.350	628.651	-0.349	628.651	-0.349	628.650	-0.350	628.650	-0.350	628.651	-0.349
L2-P31	628.609	-0.391	628.608	-0.392	628.608	-0.392	628.608	-0.392	628.608	-0.392	628.608	-0.392
L2-P32	628.658	-0.342	628.657	-0.343	628.657	-0.343	628.657	-0.343	628.656	-0.344	628.656	-0.344
L2-P33	628.632	-0.368	628.632	-0.368	628.631	-0.369	628.631	-0.369	628.631	-0.369	628.631	-0.369
L5-P13	628.678	-0.322	628.679	-0.321	628.679	-0.321	628.678	-0.322	628.678	-0.322	628.679	-0.321
L5-P14	628.637	-0.363	628.637	-0.363	628.637	-0.363	628.636	-0.364	628.637	-0.363	628.637	-0.363
L5-P15	628.671	-0.329	628.671	-0.329	628.671	-0.329	628.670	-0.330	628.670	-0.330	628.671	-0.329
L6-P25	628.659	-0.341	628.659	-0.341	628.658	-0.342	628.658	-0.342	628.658	-0.342	628.658	-0.342
L6-P26	628.617	-0.383	628.617	-0.383	628.617	-0.383	628.616	-0.384	628.617	-0.383	628.617	-0.383
L6-P27	628.633	-0.367	628.632	-0.368	628.632	-0.368	628.632	-0.368	628.632	-0.368	628.632	-0.368
Des. Est.	0.024		0.024		0.024		0.024		0.024		0.024	
Promedio	628.646	-0.354	628.646	-0.354	628.645	-0.355	628.645	-0.355	628.645	-0.355	628.645	-0.355

Tabla 4.27: Resultados del análisis metrológico de precisión de la dimensión A la placa DD-ME-SST-P7. Extraído de Microsoft Excel por elaboración propia.

Dimensión B [mm]			Plano de Análisis					Método de Análisis				
Nominal	524.410	[mm]	Tolerancia ±	0.500	[mm]	XY	Punto a Línea					
Medición	Iteración											
	0	Dif.	1	Dif.	2	Dif.	3	Dif.	4	Dif.	5	Dif.
L3-P22	524.149	-0.261	524.148	-0.262	524.148	-0.262	524.148	-0.262	524.148	-0.262	524.148	-0.262
L3-P23	524.163	-0.247	524.162	-0.248	524.162	-0.248	524.162	-0.248	524.162	-0.248	524.162	-0.248
L3-P24	524.177	-0.233	524.177	-0.233	524.177	-0.233	524.177	-0.233	524.176	-0.234	524.177	-0.233
L4-P34	524.151	-0.259	524.150	-0.260	524.150	-0.260	524.150	-0.260	524.150	-0.260	524.150	-0.260
L4-P35	524.158	-0.252	524.156	-0.254	524.156	-0.254	524.156	-0.254	524.156	-0.254	524.156	-0.254
L4-P36	524.185	-0.225	524.184	-0.226	524.183	-0.227	524.183	-0.227	524.183	-0.227	524.183	-0.227
L7-P16	524.165	-0.245	524.164	-0.246	524.165	-0.245	524.164	-0.246	524.164	-0.246	524.165	-0.245
L7-P17	524.155	-0.255	524.154	-0.256	524.155	-0.255	524.155	-0.255	524.154	-0.256	524.154	-0.256
L7-P18	524.150	-0.260	524.149	-0.261	524.148	-0.262	524.149	-0.261	524.149	-0.261	524.148	-0.262
L8-P28	524.164	-0.246	524.162	-0.248	524.162	-0.248	524.161	-0.249	524.161	-0.249	524.162	-0.248
L8-P29	524.143	-0.267	524.142	-0.268	524.142	-0.268	524.142	-0.268	524.142	-0.268	524.142	-0.268
L8-P30	524.134	-0.276	524.133	-0.277	524.132	-0.278	524.133	-0.277	524.133	-0.277	524.133	-0.277
Des. Est.	0.014		0.014		0.014		0.014		0.014		0.014	
Promedio	524.158	-0.252	524.157	-0.253	524.157	-0.253	524.157	-0.253	524.157	-0.254	524.157	-0.253

Tabla 4.28: Resultados del análisis metrológico de precisión de la dimensión B la placa DD-ME-SST-P7. Extraído de Microsoft Excel por elaboración propia.

Paralelismo entre Planos A y Mármol [mm]												
Nominal	0.04	[mm]	Tolerancia ±	-	[mm]							
Elemento	Iteración											
	0	1	2	3	4	5						
Valor	0.231	-0.191	0.233	-0.193	0.233	-0.193	0.233	-0.193	0.233	-0.193	0.233	-0.193
Des. Est.	0.0008											
Promedio	0.233	-0.193										

Tabla 4.29: Resultados del análisis metrológico de precisión del paralelismo Plano A y Plano de Granito para la placa DD-ME-SST-P7. Extraído de Microsoft Excel por elaboración propia.

4.2. ANÁLISIS METROLÓGICO

Para el caso particular de la placa DD-ME-SST-P10 se hizo un procesamiento adicional fuera del software MCOSMOS debido a errores de interpretación para obtener la dimensión A, obteniendo dimensiones que no son las adecuadas conforme a los resultados obtenidos previamente como se muestra en la Tabla 4.31 en su primer apartado. Para obtener los resultados del segundo apartado los cuales representan de forma adecuada la dimensión A se explica a continuación.

Espesor - Plano Mármol (PM) a Puntos 1 a 6 (Pi)					Plano de Análisis				Método de Análisis				
Nominal	15.000	[mm]	Tolerancia \pm	0.050	[mm]	XY	Punto a Línea						
Medición	Iteración												
	0	Dif.	1	Dif.	2	Dif.	3	Dif.	4	Dif.	5	Dif.	
PM-P1	15.137	0.137	15.136	0.136	15.137	0.137	15.137	0.137	15.136	0.136	15.136	0.136	
PM-P2	15.191	0.191	15.189	0.189	15.193	0.193	15.192	0.192	15.191	0.191	15.191	0.191	
PM-P3	15.170	0.170	15.163	0.163	15.164	0.164	15.163	0.163	15.162	0.162	15.162	0.162	
PM-P4	15.204	0.204	15.201	0.201	15.207	0.207	15.206	0.206	15.204	0.204	15.203	0.203	
PM-P5	15.166	0.166	15.164	0.164	15.166	0.166	15.166	0.166	15.165	0.165	15.164	0.164	
PM-P6	15.130	0.130	15.126	0.126	15.127	0.127	15.127	0.127	15.126	0.126	15.126	0.126	
Des. Est.	0.029		0.029		0.031		0.030		0.030		0.030		
Promedio	15.166	0.166	15.163	0.163	15.166	0.166	15.165	0.165	15.164	0.164	15.164	0.164	

Tabla 4.30: Resultados del análisis metroológico de precisión del espesor para la placa DD-ME-SST-P10. Extraído de Microsoft Excel por elaboración propia.

Dimensión A [mm]					Plano de Análisis				Método de Análisis				
Nominal	844.590	[mm]	Tolerancia \pm	0.500	[mm]	YZ/XY	Punto a Línea						
Medición	Iteración												
	0	Dif.	1	Dif.	2	Dif.	3	Dif.	4	Dif.	5	Dif.	
L13-P13	843.981	-0.609	843.975	-0.615	843.984	-0.606	843.985	-0.605	843.983	-0.607	843.980	-0.610	
L13-P14	843.622	-0.968	843.615	-0.975	843.624	-0.966	843.625	-0.965	843.624	-0.966	843.620	-0.970	
L13-P15	843.236	-1.354	843.230	-1.360	843.239	-1.351	843.240	-1.350	843.238	-1.352	843.235	-1.355	
L13-P30	844.014	-0.576	844.007	-0.583	844.016	-0.574	844.016	-0.574	844.015	-0.575	844.011	-0.579	
L13-P31	843.690	-0.900	843.683	-0.907	843.692	-0.898	843.693	-0.897	843.692	-0.898	843.688	-0.902	
L13-P32	843.308	-1.282	843.301	-1.289	843.310	-1.280	843.310	-1.280	843.309	-1.281	843.306	-1.284	
L13-P13	844.452	-0.138	844.365	-0.225	844.423	-0.167	844.424	-0.166	844.423	-0.167	844.419	-0.171	
L13-P14	844.460	-0.130	844.392	-0.198	844.449	-0.141	844.448	-0.142	844.447	-0.143	844.443	-0.147	
L13-P15	844.465	-0.125	844.369	-0.221	844.455	-0.135	844.454	-0.136	844.452	-0.138	844.449	-0.141	
L13-P30	844.556	-0.034	844.465	-0.125	844.496	-0.094	844.495	-0.095	844.495	-0.095	844.491	-0.099	
L13-P31	844.563	-0.027	844.524	-0.066	844.535	-0.055	844.541	-0.049	844.533	-0.057	844.530	-0.060	
L13-P32	844.571	-0.019	844.532	-0.058	844.543	-0.047	844.541	-0.049	844.540	-0.050	844.538	-0.052	
Des. Est.	0.058		0.076		0.049		0.050		0.049		0.049		
Promedio	844.511	-0.079	844.441	-0.149	844.483	-0.107	844.484	-0.106	844.482	-0.108	844.478	-0.112	

Tabla 4.31: Resultados del análisis metroológico de precisión de la dimensión A la placa DD-ME-SST-P10. La desviación estándar y el promedio son para el segundo apartado de la tabla. Extraído de Microsoft Excel por elaboración propia.

La razón por la que fue requerido un análisis adicional para la dimensión A es debido a cómo fue programada su dimensionamiento, el obtener dimensiones de largo y ancho,

como se mencionó anteriormente, proviene de una operación de distancia entre punto y plano definida con la siguiente ecuación:

$$d = \left| \frac{Ax_p + By_p + C}{\sqrt{A^2 + B^2}} \right| \quad (4.1)$$

De la cual A, B y C provienen del coeficiente de la ecuación general de una recta, mientras que x_p y y_p son las coordenadas de un punto. En el caso de la dimensión A, para poder hacer uso adecuado de la ecuación anterior los puntos P 13, P 14, P 15, P 30, P 31 y P 32, los cuales se pueden apreciar en la Figura 4.24 y los primeros tres mencionados anteriormente en la Figura 4.25, se deben proyectar al plano de análisis yz de la CMM y así poder medir con referencia a la línea 13, obteniendo así la Figura 4.26.

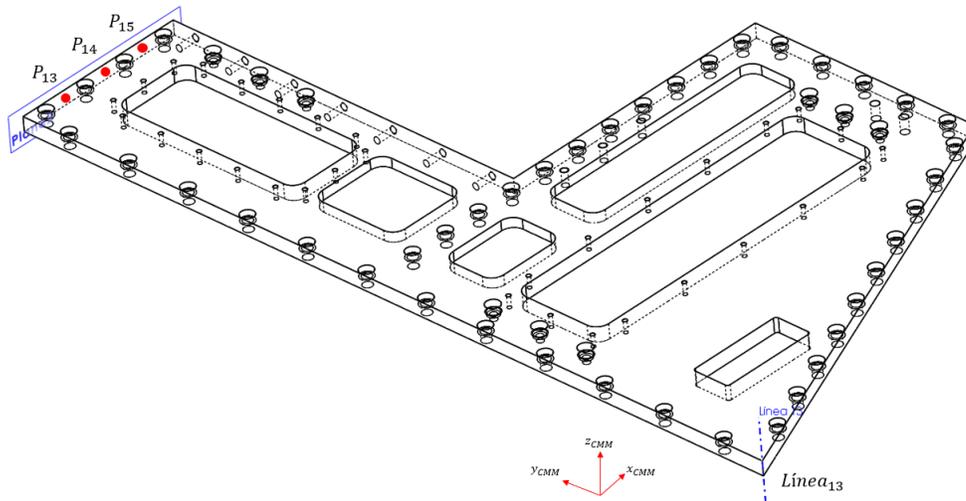


Figura 4.25: Representación de la placa DD-ME-SST-P10 y de los puntos y la línea 13 obtenidos del análisis metrológico de precisión Imagen obtenida de Solidworks y Powerpoint por elaboración propia.

Como se muestra en la misma figura, el problema radica en que la placa DD-ME-SST-P10 no mantenía una relación de paralelismo entre la cara definida por la dimensión A y el eje y de la CMM, lo cual es muy complicado de conseguir en la práctica, por lo tanto, las distancias calculadas por MCOSMOS resultan en un error ya que se obtienen distancias más grandes de lo esperado y no caracterizan adecuadamente la dimensión A, como se muestra en la Figura 4.26.

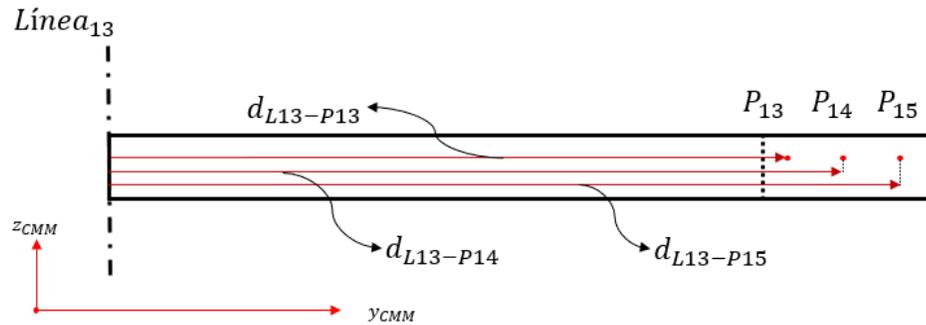


Figura 4.26: Procedimiento de medición erróneo realizado por el software MCOSMOS, mostrando la diferencia entre las dimensiones obtenidas por el ángulo existente entre la cara definida por la dimensión A de la placa DD-ME-SST-P10 y el eje y de la CMM. Imagen obtenida de Powerpoint por elaboración propia.

Debido a este error se calcularon manualmente las distancias que competen a la dimensión A, las cuales se muestran en la Tabla 4.31 en cualquiera de los dos apartados. Nótese que también se calculan las distancias entre los puntos P 30, 31 y 32 que no fueron ejemplificadas para no generar confusión al lector, pero siguen el mismo proceso que los puntos P 13, 14 y 15 explicados en esta sección. Ahora bien, para calcular estas distancias se definieron dos planos, el primero Π_1 con base en los puntos P 13, 31 y 15, el segundo Π_2 con base en P 29, 45 y 27, y un tercero Π_3 con base en P 26, 42 y 43. Al intersectarse los planos Π_1 y Π_2 se genera la línea 14 y con la intersección de Π_2 y Π_3 se genera la línea 13, líneas que permitirán generar puntos adicionales para obtener mayor información como se muestra posteriormente. Este proceso y las geometrías generadas se muestran en la Figura 4.27.

Para obtener las primeras tres distancias con base en los puntos P13, 14 y 15 se elige el plano de trabajo definido por la coordenada z compartida por todos los puntos incluidos en el análisis desarrollado, lo cual es posible debido a que todos los puntos obtenidos por la CMM fueron medidos con el cuidado adecuado para que estuvieran contenidos en el mismo plano de medición. Con esto se obtienen los puntos P a1 y P a3 generados a partir de la intersección de las líneas 13 y 14 con el plano de trabajo definido por la coordenada z mencionada anteriormente. Ahora bien, para disponer de una línea con la cual poder medir la distancia se obtiene en primer lugar la línea f_L con base en los puntos P 13 y P15,

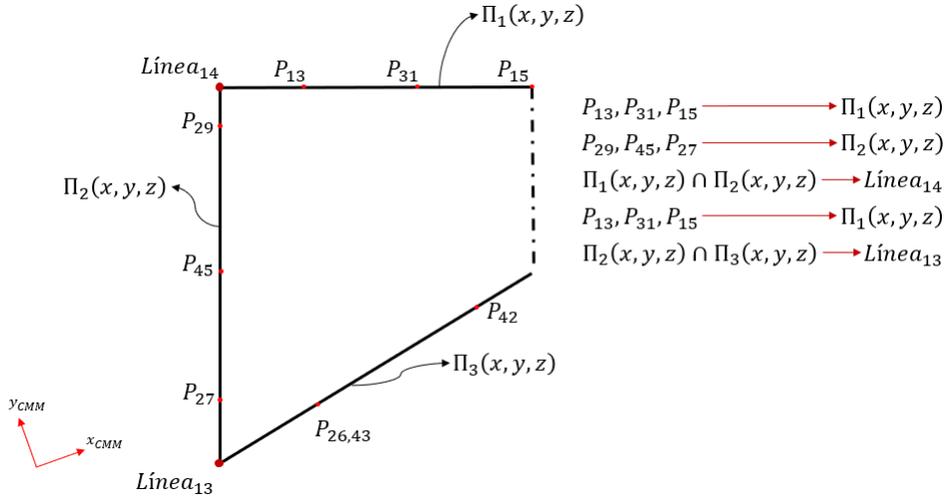


Figura 4.27: Definición matemática de los planos y rectas utilizadas a partir de los puntos obtenidos del análisis metrológico de precisión. Imagen obtenida de Powerpoint por elaboración propia.

los cuales al estar más separados permiten obtener una línea que caracterice con mayor aproximación a la cara lateral izquierda de la placa;, con la cual al obtener su pendiente descrita por la ecuación:

$$m = \frac{P_{15y} - P_{13y}}{P_{15x} - P_{13x}} \tag{4.2}$$

Ahora bien, con el punto P a3, la pendiente de f_L definida y con base en que líneas rectas paralelas comparten la misma pendiente, se genera la línea recta f_1 con la ecuación punto pendiente como se muestra a continuación:

$$y - P_{a3y} = \left(\frac{P_{15y} - P_{13y}}{P_{15x} - P_{13x}} \right) (x - P_{a3x}) \tag{4.3}$$

Ecuación de la recta que se expresa en su forma general como:

$$Ax + By + C = 0 \tag{4.4}$$

De donde con base en la ecuación 4.3 al ser operada, A , B y C son:

$$A = -\frac{P_{15y} - P_{13y}}{P_{15x} - P_{13x}}; B = 1 \tag{4.5}$$

$$C = \frac{P_{a3x}P_{15y} - P_{a3x}P_{13y} - P_{a3y}P_{15x} + P_{a3y}P_{13x}}{P_{15x} - P_{13x}} \quad (4.6)$$

Con estos valores definidos, ahora es posible sustituir los valores de cada iteración del análisis en la ecuación 4.1 para obtener las distancias d_1 , d_2 y d_3 como se muestra en la Figura 4.28. De esta forma se obtienen los valores reportados en la Tabla 4.31 en su segundo apartado, reportando ahora bien resultados que concuerdan entre ellos y con lo que deben representar.

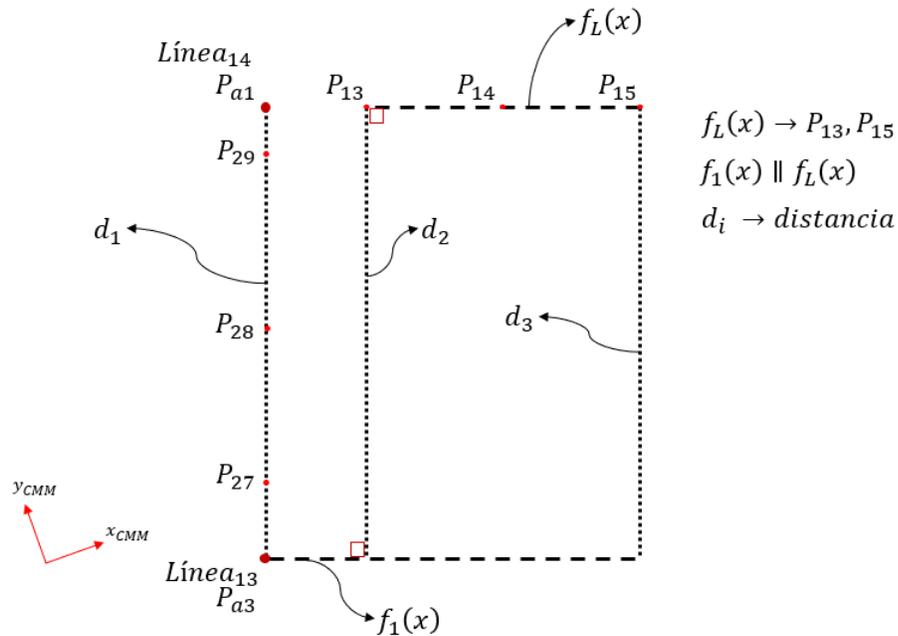


Figura 4.28: Definición matemática de las rectas en el plano de análisis a partir de los puntos obtenidos del análisis metrológico de precisión junto a las distancias calculadas para cada iteración del análisis. Imagen obtenida de Powerpoint por elaboración propia.

Para el caso del resto del análisis de la placa DD-ME-SST-P10 no se presenta ningún problema similar, mostrando los resultados en las tablas mostradas a continuación.

4.2. ANÁLISIS METROLÓGICO

Dimensión B [mm]			Plano de Análisis				Método de Análisis					
Nominal	182.230	[mm]	Tolerancia \pm	0.500	[mm]	XY	Punto a Línea					
Medición	Iteración											
	0	Dif.	1	Dif.	2	Dif.	3	Dif.	4	Dif.	5	Dif.
L11-P16	182.158	-0.072	182.157	-0.073	182.159	-0.071	182.159	-0.071	182.158	-0.072	182.157	-0.073
L11-P17	182.141	-0.089	182.138	-0.092	182.142	-0.088	182.142	-0.088	182.141	-0.089	182.140	-0.090
L11-P18	182.134	-0.096	182.132	-0.098	182.135	-0.095	182.135	-0.095	182.135	-0.095	182.134	-0.096
L12-P33	182.266	0.036	182.264	0.034	182.266	0.036	182.266	0.036	182.266	0.036	182.265	0.035
L12-P34	182.248	0.018	182.245	0.015	182.248	0.018	182.248	0.018	182.248	0.018	182.247	0.017
L12-P35	182.244	0.014	182.241	0.011	182.245	0.015	182.245	0.015	182.244	0.014	182.243	0.013
L3-P27	182.123	-0.107	182.121	-0.109	182.126	-0.104	182.126	-0.104	182.125	-0.105	182.124	-0.106
L3-P28	182.131	-0.099	182.129	-0.101	182.132	-0.098	182.132	-0.098	182.132	-0.098	182.131	-0.099
L3-P29	182.168	-0.062	182.167	-0.063	182.170	-0.060	182.169	-0.061	182.169	-0.061	182.167	-0.063
L4-P44	182.238	0.008	182.236	0.006	182.240	0.010	182.239	0.009	182.239	0.009	182.238	0.008
L4-P45	182.249	0.019	182.246	0.016	182.250	0.020	182.249	0.019	182.249	0.019	182.248	0.018
L4-P46	182.270	0.040	182.267	0.037	182.270	0.040	182.270	0.040	182.269	0.039	182.268	0.038
Des. Est.	0.059		0.059		0.059		0.059		0.059		0.059	
Promedio	182.198	-0.032	182.195	-0.035	182.199	-0.031	182.198	-0.032	182.198	-0.032	182.197	-0.033

Tabla 4.32: Resultados del análisis metrológico de precisión de la dimensión B la placa DD-ME-SST-P10. Extraído de Microsoft Excel por elaboración propia.

Dimensión C [mm]			Plano de Análisis				Método de Análisis					
Nominal	475.600	[mm]	Tolerancia \pm	0.500	[mm]	XY	Punto a Línea					
Medición	Iteración											
	0	Dif.	1	Dif.	2	Dif.	3	Dif.	4	Dif.	5	Dif.
L7-P27	475.481	-0.119	475.479	-0.121	475.485	-0.115	475.484	-0.116	475.483	-0.117	475.482	-0.118
L7-P28	475.472	-0.128	475.468	-0.132	475.475	-0.125	475.474	-0.126	475.473	-0.127	475.471	-0.129
L7-P29	475.498	-0.102	475.493	-0.107	475.501	-0.099	475.501	-0.099	475.499	-0.101	475.496	-0.104
L8-P44	475.579	-0.021	475.575	-0.025	475.581	-0.019	475.581	-0.019	475.579	-0.021	475.578	-0.022
L8-P45	475.578	-0.022	475.573	-0.027	475.580	-0.020	475.580	-0.020	475.579	-0.021	475.576	-0.024
L8-P46	475.590	-0.010	475.585	-0.015	475.592	-0.008	475.592	-0.008	475.591	-0.009	475.588	-0.012
L11-P22	475.468	-0.132	475.464	-0.136	475.471	-0.129	475.471	-0.129	475.469	-0.131	475.467	-0.133
L11-P23	475.473	-0.127	475.470	-0.130	475.477	-0.123	475.476	-0.124	475.475	-0.125	475.473	-0.127
L11-P24	475.460	-0.140	475.457	-0.143	475.464	-0.136	475.463	-0.137	475.462	-0.138	475.460	-0.140
L12-P39	475.568	-0.032	475.563	-0.037	475.570	-0.030	475.570	-0.030	475.569	-0.031	475.567	-0.033
L12-P40	475.565	-0.035	475.560	-0.040	475.567	-0.033	475.567	-0.033	475.566	-0.034	475.563	-0.037
L12-P41	475.560	-0.040	475.555	-0.045	475.562	-0.038	475.562	-0.038	475.560	-0.040	475.558	-0.042
Des. Est.	0.052		0.052		0.052		0.052		0.052		0.052	
Promedio	475.524	-0.076	475.520	-0.080	475.527	-0.073	475.527	-0.073	475.525	-0.075	475.523	-0.077

Tabla 4.33: Resultados del análisis metrológico de precisión de la dimensión C la placa DD-ME-SST-P10. Extraído de Microsoft Excel por elaboración propia.

4.2. ANÁLISIS METROLÓGICO

Dimensión D [mm]				Plano de Análisis				Método de Análisis				
Nominal	293.380	[mm]	Tolerancia ±	0.500	[mm]	XY	Punto a Línea					
Medición	Iteración											
	0	Dif.	1	Dif.	2	Dif.	3	Dif.	4	Dif.	5	Dif.
L7-P16	293.324	-0.056	293.321	-0.059	293.326	-0.054	293.326	-0.054	293.325	-0.055	293.324	-0.056
L7-P17	293.337	-0.043	293.334	-0.046	293.338	-0.042	293.338	-0.042	293.337	-0.043	293.336	-0.044
L7-P18	293.338	-0.042	293.336	-0.044	293.340	-0.040	293.339	-0.041	293.339	-0.041	293.338	-0.042
L8-P33	293.316	-0.064	293.314	-0.066	293.318	-0.062	293.318	-0.062	293.318	-0.062	293.316	-0.064
L8-P34	293.328	-0.052	293.326	-0.054	293.330	-0.050	293.330	-0.050	293.329	-0.051	293.328	-0.052
L8-P35	293.326	-0.054	293.324	-0.056	293.327	-0.053	293.327	-0.053	293.327	-0.053	293.325	-0.055
L3-P22	293.338	-0.042	293.337	-0.043	293.340	-0.040	293.340	-0.040	293.339	-0.041	293.338	-0.042
L3-P23	293.352	-0.028	293.351	-0.029	293.355	-0.025	293.354	-0.026	293.353	-0.027	293.352	-0.028
L3-P24	293.346	-0.034	293.345	-0.035	293.348	-0.032	293.347	-0.033	293.347	-0.033	293.346	-0.034
L4-P39	293.329	-0.051	293.327	-0.053	293.331	-0.049	293.330	-0.050	293.330	-0.050	293.329	-0.051
L4-P40	293.334	-0.046	293.332	-0.048	293.335	-0.045	293.335	-0.045	293.334	-0.046	293.333	-0.047
L4-P41	293.337	-0.043	293.334	-0.046	293.337	-0.043	293.337	-0.043	293.336	-0.044	293.335	-0.045
Des. Est.	0.010		0.010		0.010		0.010		0.010		0.010	
Promedio	293.334	-0.046	293.332	-0.048	293.335	-0.045	293.335	-0.045	293.335	-0.046	293.333	-0.047

Tabla 4.34: Resultados del análisis metrológico de precisión de la dimensión D la placa DD-ME-SST-P10. Extraído de Microsoft Excel por elaboración propia.

Angulo entre Planos E y F [°]				Plano de Análisis				Método de Análisis				
Nominal	66.67	[°]	Tolerancia ±	0.10	[°]	-	Angulo entre planos					
Elemento	Iteración											
	0	1		2		3		4		5		
Valor CMM	66:42:38		66:42:37		66:42:38		66:42:38		66:42:38		66:42:38	
Decimal	66.71	Dif.	0.04	66.71	Dif.	0.04	66.71	Dif.	0.04	66.71	Dif.	0.04
Des. Est.	0.000											
Promedio	66.711		0.041									

Tabla 4.35: Resultados del análisis metrológico de precisión del ángulo E-F para la placa DD-ME-SST-P10. Extraído de Microsoft Excel por elaboración propia

Paralelismo entre Planos A y Mármol [mm]										
Nominal	0.04	[mm]	Tolerancia ±	-	[mm]					
Elemento	Iteración									
	0	1		2		3		4		5
Valor	0.112	-0.072	0.119	-0.079	0.121	-0.081	0.121	-0.081	0.122	-0.082
Des. Est.	0.0037									
Promedio	0.119		-0.079							

Tabla 4.36: Resultados del análisis metrológico de precisión del paralelismo Plano A y Plano de Granito para la placa DD-ME-SST-P10. Extraído de Microsoft Excel por elaboración propia.

A manera de resumen, se muestra en la Tabla 4.37 los resultados promedio del análisis realizado sobre las placas involucradas en el análisis metrológico de precisión. En primer lugar, las dimensiones promedio para el espesor de las placas resulta estar fuera de tolerancia salvo por la DD-ME-SST-P4, notando además que individualmente las placas presentan mediciones del espesor inconsistentes entre sí lo que se traduce también en estar fuera de tolerancia para el paralelismo, lo que permite determinar que las placas presentan pandeo en su cara frontal y así se determina que el rectificado de las placas y la manufactura en router CNC no produjo los resultados esperados, esto es estar dentro de la tolerancia de 0.05 [mm] y una tolerancia geométrica de paralelismo de 0.040 [mm]. La causa de ello radica en el uso de una hoja de MDF como interfaz entre la zona de succión del router CNC y la placa base para protección al perforar; esta hoja no garantiza una superficie de referencia para los maquinados con las condiciones requeridas mencionadas anteriormente para la estructura de soporte de DDRAGO. Es importante mencionar que la tolerancia geométrica de paralelismo de diseño está denotada como 0.05 [mm/m] y se trata como 0.040 [mm] en el análisis, esto es debido a que el software MCOSMOS trata la tolerancia para una determinada longitud, en este caso fue de 800 [mm], por lo tanto al operar con la tolerancia original se convierte en el valor de 0.040 [mm].

Para el caso de las dimensiones de largo y ancho de las placas, es decir, las dimensiones A, B, C y D, todas están dentro de tolerancia lineal, sin embargo, es importante mencionar el significado de la desviación estándar en promedio de las mediciones lineales apoyados en la regla empírica ya definida previamente en el análisis metrológico de taller. Para el caso del análisis metrológico de precisión de igual forma nos permite entender el nivel de precisión de la manufactura a mayor detalle en tanto a exhaustividad de análisis se refiere, tomando igualmente un nivel de análisis de 3σ . Al realizar este análisis se observa que los valores para dimensiones lineales abarcan un rango de 0.042 a 0.177 [mm] involucrando a la gran mayoría de los puntos obtenidos, mientras que la diferencia promedio del valor nominal con el valor promedio de las dimensiones abarca un rango de -0.396 a 0.165 [mm], dando un rango de variación de la exactitud de los maquinados de 0.561 [mm], el cual sale fuera de tolerancia, aunque no se presentan dimensiones fuera de tolerancia es importante

4.2. ANÁLISIS METROLÓGICO

<i>Placa</i>	<i>Dim.</i>	<i>Nominal</i>	<i>Tol.</i>	<i>Actual Prom.</i>	<i>Dif. Prom.</i>	<i>Des. Est.</i>
DD-ME-SST-P2	Espesor	15.000	0.050	15.113	0.113	0.058
Termalizada	A	813.250	0.500	812.852	-0.398	0.032
	B	629.000	0.500	628.700	-0.300	0.026
	F \angle E	33.00	0.10	32.99	-0.01	0.0001
	PA \parallel PM	0.040	-	0.191	-0.151	0.0004
DD-ME-SST-P4	Espesor	15.000	0.050	14.971	-0.030	0.026
Termalizada	A	659.000	0.500	658.604	-0.396	0.032
	B	413.901	0.500	413.607	-0.294	0.019
	C	492.174	0.500	491.911	-0.263	0.022
	E \angle F	33.00	0.10	32.98	-0.02	0.0002
	PA \parallel PM	0.040	-	0.089	-0.049	0.0010
DD-ME-SST-P7	Espesor	15.000	0.050	15.163	0.163	0.066
Termalizada	A	629.000	0.500	628.645	-0.355	0.024
	B	524.410	0.500	524.157	-0.253	0.014
	PA \parallel PM	0.040	-	0.233	-0.193	0.0008
DD-ME-SST-P10	Espesor	15.000	0.050	15.165	0.165	0.030
Termalizada	A	844.590	0.500	844.480	-0.110	0.055
	B	182.230	0.500	182.197	-0.033	0.059
	C	475.600	0.500	475.525	-0.076	0.052
	D	293.380	0.500	293.334	-0.046	0.0099
	E \angle F	66.67	0.10	66.71	0.04	0.0001
	PA \parallel PM	0.040	-	0.119	-0.079	0.0037

Tabla 4.37: *Tabla de resultados resumida para el análisis metrológico de precisión. Todos los valores lineales en [mm] y angulares en [°]. Extraída de Microsoft Excel por elaboración propia.*

tener en consideración que los métodos de manufactura empleados, con base en el rango de variación de la desviación estándar y el promedio actual, fueron imprecisos e inexactos por las diferencias promedio pero sí se encuentran dentro del rango permisible de variación, es decir, dentro de tolerancia.

Adicionalmente se evaluó el error de medición de la CMM, esto mediante el análisis comparativo entre mediciones iguales y los resultados obtenidos para las iteraciones 2 a 6, excluyendo la primera iteración debido a que es la base de programación y corrección, por lo tanto, no se recomienda emplear en general para análisis de esta naturaleza debido a mantener las condiciones de repetibilidad, esto principalmente abordando al operador, manteniendo así la misma velocidad del cabezal y no alterar en gran medida el análisis,

evitando así inducir errores. Mitutoyo⁴ otorga un valor para el error de medición con base en la ecuación siguiente:

$$E = \left(4.5 + \frac{4.5L}{1000} \right) [\mu m] \quad (4.7)$$

Donde L es la dimensión de interés nominal y el resultado se entrega en micrometros [μm]. Este es el valor con el que se van a comparar los resultados obtenidos del proceso de medición, dichos resultados se observan en la Tabla 4.38.

<i>Placa</i>	<i>Dimensión</i>	<i>Error Prom.</i>	<i>Des. Est.</i>	<i>Error Mitutoyo</i>
DD-ME-SST-P2	Espesor	0.0005	0.0005	0.0046
	A	0.0010	0.0006	0.0082
	B	0.0010	0.0004	0.0073
	Angular E-F	0.0003	-	N/A
DD-ME-SST-P4	Espesor	0.0032	0.0012	0.0046
	A	0.0069	0.0014	0.0075
	B	0.0044	0.0005	0.0064
	C	0.0022	0.0026	0.0067
	Angular E-F	0.0006	-	N/A
DD-ME-SST-P7	Espesor	0.0003	0.0005	0.0046
	A	0.0009	0.0004	0.0073
	B	0.0006	0.0005	0.0069
	Angular E-F	0.0000	-	N/A
DD-ME-SST-P10	Espesor	0.0027	0.0020	0.0046
	A	0.0079	0.0023	0.0083
	B	0.0033	0.0009	0.0053
	C	0.0069	0.0005	0.0066
	D	0.0037	0.0007	0.0045
	Angular E-F	0.0000	-	N/A

Tabla 4.38: Error calculado para las mediciones lineales y angulares para la mesa de medición por coordenadas Mitutoyo M7106

Al examinar la tabla se aprecia que prácticamente todos los valores promedio del error de medición están por debajo del suministrado por Mitutoyo, excluyendo al error de la dimensión C para la placa DD-ME-SST-P10. Sin embargo, es importante denotar con base en la regla empírica y el nivel de análisis 3σ empleado anteriormente que la desviación estándar de los errores en algunos casos sobrepasan el error de Mitutoyo observados con una

⁴Ecuación extraída del catálogo Mitutoyo No. E16013 [14]

frecuencia de una en doce mediciones aproximadamente, sin poder identificar una causa aparente ligada a la magnitud de la dimensión medida o el eje de análisis de la CMM. El único caso en el que se encontró una posible fuente de error fue en el análisis de la placa DD-ME-SST-P10 que fue medida 0.2 [° C] por encima del resto de las placas, observando que en ella se obtuvieron la mayor cantidad de errores, como se mencionó anteriormente y al analizar con la regla empírica. Cabe mencionar además que en la misma placa al analizar la dimensión A se optó por eliminar la segunda iteración debido a que presentó un error muy grande y, por lo tanto, se descartó del análisis del error.

Un elemento que permite enriquecer aún más el análisis metrológico de precisión es calcular la incertidumbre asociada a los procesos de medición, la cual fue obtenida de acuerdo a lo expuesto por Grous en su obra *Applied Metrology for Manufacturing Engineering* y extraído en el Marco Teórico, particularmente en el análisis de la resolución de las mediciones. Con base en lo expuesto en dicha sección, al analizar entre sí cada conjunto de mediciones se obtuvo la incertidumbre para cada una de las mediciones con sus 5 iteraciones, excluyendo nuevamente la primera por las mismas razones expuestas anteriormente para el análisis del error, y posteriormente se promediaron por cada dimensión de interés para facilitar su análisis general y apreciación a continuación en la Tabla 4.39.

De la misma tabla, se aprecia que prácticamente todos los valores de la incertidumbre están dentro del mismo orden de magnitud, menos de 10 [μm], dichos valores se deben añadir a los valores promedio calculados para cada una de las dimensiones determinadas en la Tabla 4.37, determinando ahora que las dimensiones tienen una incertidumbre asociada de ± 10 [μm] máxima, evidentemente dependiendo de cada caso. Es importante mencionar de este análisis que aún con una incertidumbre calculada y añadida a dichos valores como se muestra en esta última tabla, los valores aún están dentro de tolerancia de manufactura y son aprobadas para ser ahora integradas y analizadas como un conjunto, para proceder con la aceptación de la estructura de soporte de DDRAGO.

Por último, es importante mencionar que las piezas fueron analizadas a 20 [° C] porque

<i>Placa</i>	<i>Dimensión</i>	<i>Incertidumbre 99.74 %</i>	<i>Valor Final</i>
DD-ME-SST-P2	Espesor	± 0.0007	15.113 ± 0.0007
	A	± 0.0016	812.852 ± 0.0016
	B	± 0.0014	628.700 ± 0.0014
DD-ME-SST-P4	Espesor	± 0.0041	14.971 ± 0.0041
	A	± 0.0088	658.604 ± 0.0088
	B	± 0.0057	413.607 ± 0.0057
	C	± 0.0055	491.911 ± 0.0055
DD-ME-SST-P7	Espesor	± 0.0005	15.163 ± 0.0005
	A	± 0.00013	628.645 ± 0.00013
	B	± 0.0009	524.157 ± 0.0009
DD-ME-SST-P10	Espesor	± 0.0034	15.165 ± 0.0034
	A	± 0.0080	844.480 ± 0.0080
	B	± 0.0042	182.197 ± 0.0042
	C	± 0.0087	475.525 ± 0.0087
	D	± 0.0046	293.380 ± 0046

Tabla 4.39: *Incertidumbre calculada con un nivel de confianza del 99.74 % para las mediciones lineales realizadas en el análisis metrológico de precisión.*

es el estándar recomendado y de operación de la CMM pero DDRAGO fue diseñado para operar a 25 [° C], por lo tanto se espera que las placas se expandan conforme a los resultados reportados en la Tabla 4.40, tabla construida con base en lo expuesto en el Marco Teórico. Esto quiere decir que las piezas se encontrarán aún más cerca del valor nominal ya que las dimensiones lineales fuera del espesor están por debajo de este valor. Denotar este fenómeno es de suma importancia para el trabajo futuro en tanto a integración y aceptación de la estructura de soporte completa.

<i>Valor dimensión [mm]</i>	<i>Incremento [μm]</i>
844.590	100.084
813.250	96.369
659.000	78.092
182.230	21.594
15.000	1.778

Tabla 4.40: *Intervalo de incremento longitudinal para varias dimensiones, de no encontrar un valor se puede realizar una interpolación lineal.*

4.3. Trabajo futuro

El objetivo del presente trabajo es permitir dar una evaluación de la calidad de las piezas de la estructura de DDRAGO para así asegurar su correcta integración y funcionamiento junto al telescopio COLIBRÍ. La evaluación de las piezas requeridas, como se presentó en la sección anterior, fue positiva y se permite dar el avance hacia la integración de la estructura de soporte de las mismas, pero es importante mencionar que varias piezas de la estructura de soporte se retrasaron y aún no son maquinados sus acabados en el TMP-CU, dichas piezas incluyen dos placas del criostato y algunas piezas de la WOB, así como la entrega y análisis metrológico de precisión de la placa DD-ME-SST-P1. Por lo tanto, la integración completa de la estructura de soporte de DDRAGO/CAGIRE, el criostato y la WOB no es posible en un corto plazo. Un primer ensamble de la estructura de DDRAGO se muestra en las Figura 4.29 y 4.30.



Figura 4.29: Estructura de soporte de DDRAGO ensamblada de manera preliminar, nótese la ausencia de la placa DD-ME-SST-P1 que va hacia el puerto nasmyth del telescopio y la placa DD-ME-SST-CYSP5B. Imagen de elaboración propia.

Con este ensamble preliminar se identifican los errores generados en la etapa de ma-

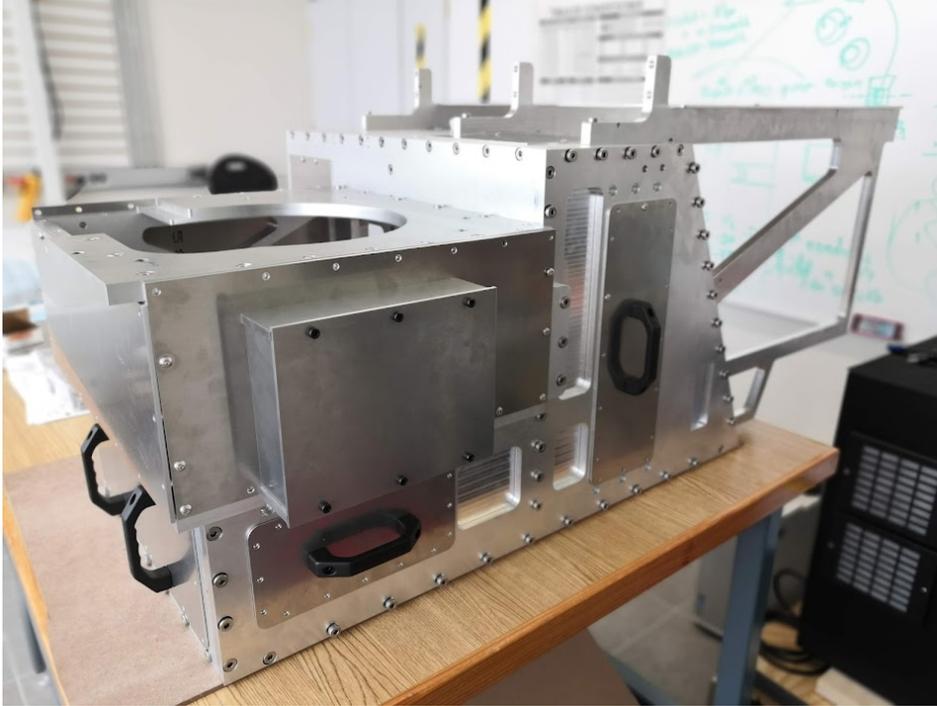


Figura 4.30: Otra toma de la estructura de soporte de DDRAGO ensamblada de manera preliminar. Imagen de elaboración propia.

nufactura de acabados, determinando entre ellos posiciones de barrenos que no coinciden entre placas, siendo este fenómeno más perceptible en la unión entre la placa DD-ME-SST-P2 y DD-ME-SST-P7, así como entre la DD-ME-SST-P4 y DD-ME-SST-P20. Este fenómeno se ejemplifica en la Figura 4.31.

Visto esto, ahora compete corregir estos pequeños errores identificados, los cuales cabe mencionar que no son irremediables y son fáciles de enmendar, además de ya ser esperados por el equipo del TMP así como por el equipo de diseño. Para arreglar estos errores el equipo tiene dos opciones, la primera es introducir un tapón del mismo material en el barreno y rehacer los barrenos y cuerdas pertinentes, y la segunda es convertir los barrenos con caja circulares en ojales, evitando así perder tiempo y permitir incluso dar una mayor holgura de acomodo de tornillos. Sin embargo, esta última opción repercute en la estética de la estructura; ambas opciones se considerarán y evaluarán en corto plazo. Junto a esto, se va a terminar de manufacturar los acabados sobre las placas restantes del criostato y la WOB. Es importante mencionar nuevamente que se dispone de todos los elementos



Figura 4.31: *Error de alineación de los barrenos entre la placa DD-ME-SST-P20 y DD-ME-SST-P4, notando que el barreno con caja no se alinea de manera adecuada con el barreno roscado, impidiendo así su correcto ensamble. Imagen de elaboración propia.*

necesarios para dar solución y fin pronto a todas estas tareas debido al avance iterativo de planos de manufactura y a la retroalimentación constante a los encargados del Taller Mecánico de Precisión.

A continuación en la Figura 4.32 se muestra el ensamble preliminar de las estructuras de soporte de DDRAGO, el criostato (notando que no se incluye la placa DD-ME-SST-CYSP5B y un maquinado de corrección de 1 [mm] del espesor de la placa DD-ME-SST-CYSP5 a realizarse en el futuro cercano con alta prioridad) y CAGIRE, las cuales se comparan con el modelo CAD diseñado en Solidworks, mostrando diferentes vistas para mayor referencia así como para denotar los resultados finales.

4.3.1. Análisis metrológico del ensamble del instrumento

El último paso para aceptar a la estructura de DDRAGO es realizar un ensamble con todas las placas, es decir, la estructura de DDRAGO, CAGIRE, el criostato y la WOB, y realizar un análisis metrológico de precisión en la misma CMM empleada para el análisis

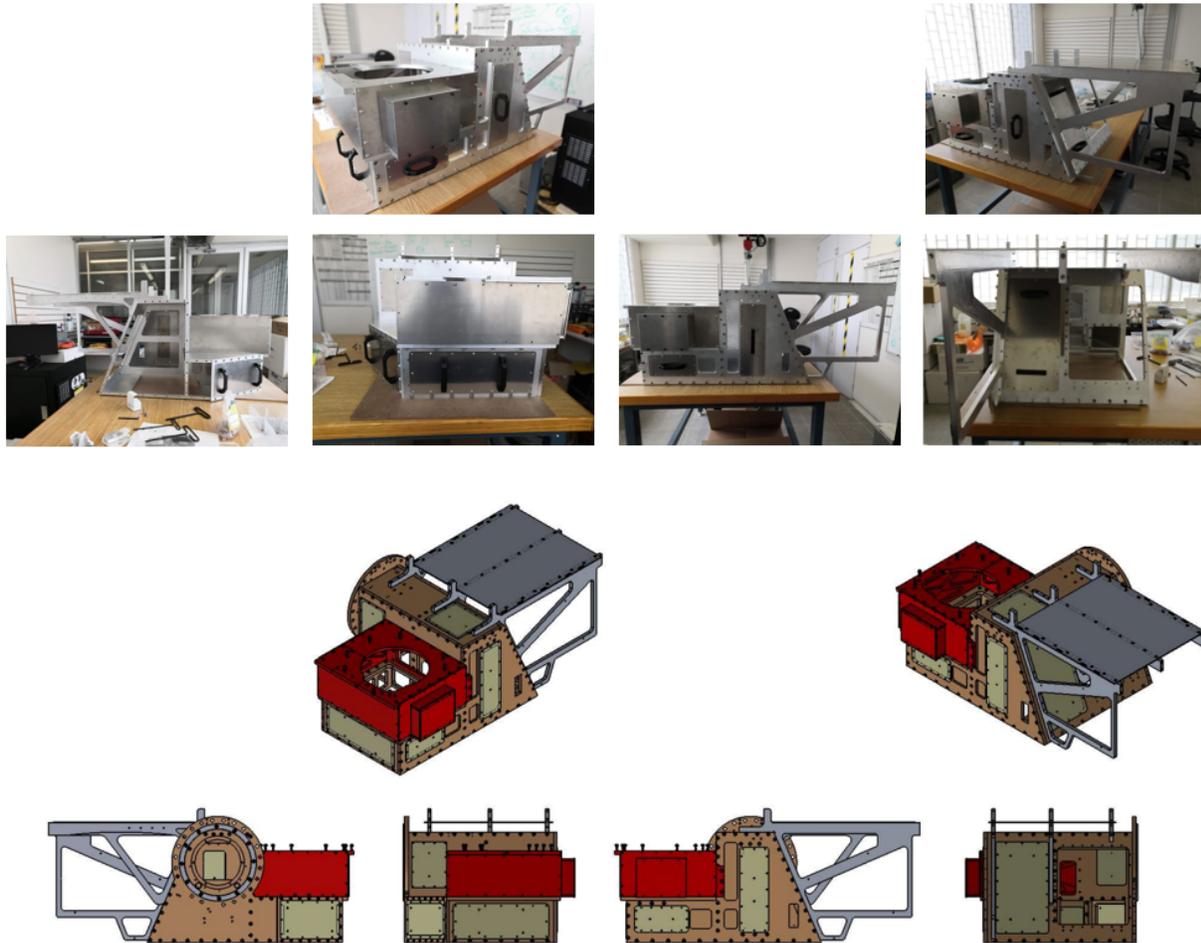


Figura 4.32: Comparación entre el ensamble preliminar de la estructura de soporte de DDRA-GO, el criostato y CAGIRE con el modelo CAD de diseño en Solidworks. Imagen de elaboración propia.

metrológico de precisión presentado en secciones anteriores. Es importante mencionar que este análisis requiere forzosamente a la placa DD-ME-SST-P1, que al momento de redacción no se ha recibido y por ende, este análisis resulta poco productivo de ser realizado debido a que la referencia de diseño de toda la estructura de soporte es la placa mencionada.

Dicho análisis tendrá la finalidad de asegurar que el ensamble completo del instrumento, con las correcciones y ajustes realizados, esté dentro del presupuesto de error asignado a la estructura de soporte para así dar el óptimo posicionamiento de la óptica completa. Para ello se revisarán distancias, paralelismos y perpendicularidades entre placas en varias iteraciones para posteriormente realizar un análisis estadístico que permita caracterizar

adecuadamente el análisis metrológico de precisión del ensamble de DDRAGO.

Este análisis será efectuado con rapidez debido a que el instrumento base de DDRAGO, DDRAGUITO, fue analizado de la misma manera, por lo tanto se empleará una metodología de análisis y evaluación similar.

4.3.2. Integración con el telescopio COLIBRÍ y observación de GRB

Posterior al análisis metrológico de precisión del ensamble y la aceptación del instrumento se enviará al sitio astronómico de San Pedro Mártir, donde será transportado por medio de un carro elaborado también por el Instituto de Astronomía y será ensamblado en el puerto nasmyth del telescopio COLIBRÍ. Una imagen del cómo será el ensamble mencionado se aprecia en la Figura 4.33.

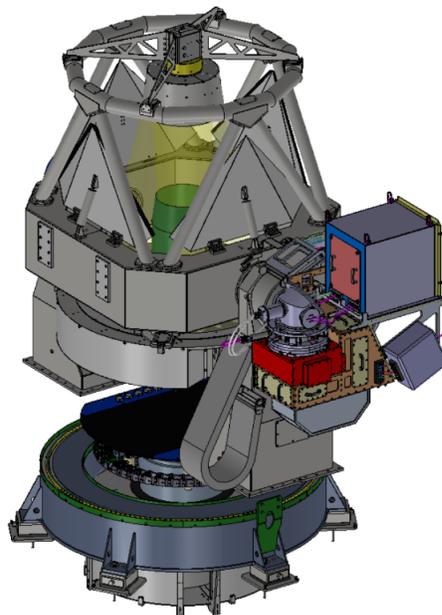


Figura 4.33: El telescopio COLIBRÍ junto al instrumento DDRAGO en vista isométrica desde un renderizado del modelo CAD empleado por el Instituto de Astronomía para su diseño. Imagen obtenida de Solidworks.

Los resultados esperados por el proyecto DDRAGO son de la más alta calidad y rele-

vancia para el ámbito nacional e internacional, esto con base en los resultados obtenidos por su antecesor DDRAGUITO, el cual se muestra en la Figura 4.34, los cuales ya son empezados a obtener en el sitio astronómico de San Pedro Mártir del Instituto de Astronomía para su análisis y eventual publicación. Una vez que DDRAGO sea terminado e integrado con COLIBRÍ, DDRAGUITO será desechado.

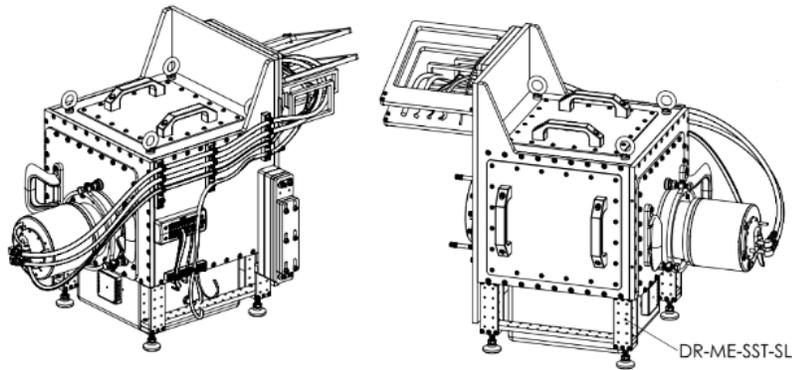


Figura 4.34: *Instrumento DDRAGUITO apreciado en diferentes vistas. Imagen obtenida de Solidworks.*

Capítulo 5

Conclusiones

El objetivo del presente trabajo es, en síntesis, analizar los requerimientos de diseño del instrumento DDRAGO, mediante el uso de tecnologías de diseño asistido por computadora (CAD), para así elaborar los planos de manufactura de las placas que conforman a la estructura de soporte del instrumento en cuestión, posteriormente evaluar los procesos productivos mediante análisis metrológicos con dos diferente enfoques: uno de taller y uno de precisión, para así poder hacer un seguimiento de los procesos de manufactura y realizar los ajustes pertinentes en la manufactura de taller para obtener así los resultados esperados en tanto a tolerancias geométricas y dimensionales se refiere. Así, con los resultados obtenidos de ambos análisis metrológicos se puede dar un veredicto final sobre el resultado esperado de la integración del instrumento y su funcionamiento, desde la perspectiva mecánica, al ser integrado con el telescopio COLIBRÍ para la observación de destellos de rayos gamma (GRB). Para ello, se analizaron los requerimientos de diseño para el instrumento antecesor DDRAGUITO, cuya función es de demostración tecnológica, así como del diseño del instrumento actual DDRAGO con los cuales se sintetizaron e introdujeron en los requisitos enviados al proveedor de rectificado Jacuar y de manufactura JobShop, y en los planos de manufactura de acabados haciendo especial énfasis en paralelismo entre caras frontal y trasera de las placas, así como las tolerancias determinadas para cada uno de los procesos, siendo éstas $50\ [\mu\text{m}]$ para el rectificado, $250\ [\mu\text{m}]$ para la manufactura general y $50\ [\mu\text{m}]$ para la manufactura de acabados. Con ello, se realizaron los planos e indicaciones respectivas que se incluyen en el presente trabajo para su consulta.

El uso de tecnologías de diseño asistido por computadora (CAD) fue un elemento de vital importancia en el correcto desarrollo del presente trabajo, debido a que gracias a su facilidad para permitir la visualización de piezas y ensambles, ofreciendo así la capacidad de identificar interferencias, juntas y elementos de fijación mal ubicados, así como dimensiones ideales a tomar en cuenta. Junto a esto, la tecnología CAD permite hacer múltiples iteraciones y rediseños fácilmente, con lo que se permite corregir con facilidad cualquier observación registrada en el taller de manufactura para optimizar la estructura mecánica y su metodología de ensamble. Esto se vió reflejado en acabados de manufactura, localización de barrenos y ensambles de las piezas de la estructura de soporte y el criostato; destacando que todo esto sería inútil si no se tiene un registro adecuado de cambios e interpretación para manufactura, demostrado en la realización de los planos de manufactura con base en los modelados CAD, los requerimientos de diseño y la retroalimentación del TMP-CU.

El análisis metrológico de taller se encargó de dar una evaluación temprana de los procesos productivos así como caracterizar dimensionalmente las piezas más sencillas de la estructura de soporte de DDRAGO y el criostato, es decir, aquellas piezas que se permiten evaluar con un calibrador vernier Mitutoyo de 620 [mm] de rango y que no dispongan de geometrías específicas de análisis como condiciones de paralelismo particulares o bien ángulos de interés. De dicho análisis se concluye que las piezas están dentro de tolerancia, que el instrumento empleado está en condiciones óptimas de operación y se asegura la confiabilidad y repetibilidad del análisis mediante el análisis estadístico posterior. Para las placas restantes, aquellas que requirieron un análisis con otro instrumento de mayor rango, precisión y capacidad de medir geometrías complejas se evaluaron con el análisis metrológico de precisión con el uso de una mesa de medición por coordenadas (CMM) Mitutoyo M7106 Crysta-Plus, del cual se concluye que el proceso de rectificado no fue exitoso, debido a que las tolerancias de 50 [μm] no fueron conseguidas, además de ser irregular la superficie respecto a un plano de referencia, lo que se traduce en que la condición de paralelismo esté muy por fuera de tolerancia. Observando las dimensiones lineales de largo y ancho, es decir, las dimensiones A, B, C y D, resultaron dentro de tolerancia, pero denotando una

gran variación respecto a ellas, recordando que son en gran medida parecidas, por lo tanto, el maquinado del router CNC de JobShop no fue exacto ni preciso, notando además que la tolerancia de 250 [μm] se amplió la tolerancia primero en 300 [μm] y al ver que no era suficiente se amplía al máximo de 500 [μm] disponibles por el presupuesto de error asignado a la estructura de soporte debido a que la manufactura en router no otorgó resultados favorables inicialmente, resultados que rebasaban la tolerancia inicial en un 159.2% en el caso más grave. Es importante mencionar que no todo el presupuesto de error asignado fue empleado, en realidad dicho error se acota a 400 [μm] dejando así 100 [μm] para ser empleados en algún otro subsistema, de ser necesario.

Para permitir obtener mejores maquinados y un funcionamiento óptimo de un análisis metrológico de taller se debe recibir la primera pieza producida y medirla, para así dar retroalimentación temprana de los procesos productivos a JobShop, permitiéndoles corregir parámetros de control del router CNC empleado. Haber contemplado esto en la etapa de diseño permitiría obtener mejores resultados de la manufactura en esta ocasión; esto se decidió así debido a que la misma empresa fue la encargada de manufacturar la estructura de soporte de DDRAGUITO, la cual también presentó errores importantes en su manufactura pero caen dentro de tolerancia, además, el desempeño y resultados recientes de este instrumento fueron de una gran calidad y fueron aprobados por el equipo científico de Francia. Por lo tanto, es posible esperar que los resultados de DDRAGO sean de la misma o de una mayor calidad al ser DDRAGUITO la base y demostración tecnológica de una porción de lo que DDRAGO podrá hacer.

Tomando en cuenta lo anterior, la manufactura realizada por JobShop tuvo un precio accesible, comparada con otras opciones como manufactura por fresadora CNC externa, y con la evaluación de los procesos productivos y los resultados obtenidos por DDRAGUITO permiten concluir que la manufactura de la estructura de soporte de DDRAGO ofreció los mejores resultados con base en una relación de costo-beneficio. Sin embargo, es importante mencionar que la experiencia previa en proyectos astronómicos de índole similar, los resultados obtenidos en este caso y las observaciones provenientes del TMP-CU, así como

las máquina herramienta disponibles en él, permiten la manufactura de casi la totalidad de las placas entregadas por JobShop, permitiendo tener control de las condiciones de paralelismo, al tener máquinas que permiten garantizar dicha condición, así como el permitir una supervisión y retroalimentación constante e inmediata de los resultados recién obtenidos, con una reducción importante en los costos de manufactura, permitiendo éstos ser empleados en programas de capacitación adicionales para el personal y disponer de material adicional en caso de presentarse algún error.

Las placas que conforman la estructura de soporte de DDRAGO y el criostato son aceptadas, y se permite avanzar al proceso de ensamble de la estructura completa para ser analizada con un análisis metrológico de precisión, con el cual se decidirá si se acepta la integración completa con los elementos ópticos y es enviado al sitio astronómico de San Pedro Mártir para su operación conjunta con el telescopio COLIBRÍ. Permitiendo así cumplir su funcionamiento en la detección, seguimiento, localización y estudio de destellos de rayos gamma (GRB), aportando así un elemento adicional a la sociedad científica mexicana en el estudio de la física fundamental que rige al universo.

Bibliografía

- [1] Barojas Méndez, E.J. (2013). Maunfactura, integración, metrología y aceptación de las celdas optomecánicas de la cámara del espectrógrafo ESOPO para el telescopio de 2.1 metros del Observatorio Astronómico Nacional (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- [2] Biro, S. (2015). Arena, vidrio, lente...¡Telescopio! En Tonda J., Regules S y Burgos E. (Eds.), Antología de Astronomía ¿Cómo Ves? (pp. 74-76). México: Universidad Nacional Autónoma de México, Dirección General de Divulgación de la Ciencia.
- [3] Budynas, R.G. Et. Al. (2012). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. México: McGraw Hill.
- [4] Centro Nacional de Metrología. (2004). Guía para estimar la incertidumbre de la medición. México: Wolfgang, A. Consultado de URL: <https://www.cenam.mx/publicaciones/>
- [5] Dieter, E. Et. Al. (2013). Engineering Design. Estados Unidos: McGraw Hill.
- [6] Centro Nacional de Estudios Espaciales, CNES. (2014). SVOM. Consultado de URL: <https://www.svom.eu/en/home/>
- [7] Escamilla Esquivel, A. (2014). Metrología y sus aplicaciones. México: Grupo Editorial Patria.
- [8] Gehrels, N. Mészáros, P. (2012). Gamma-Ray Bursts. Science Magazine. Volumen (337), 932-936. Consultado de URL: <https://www.science.org/doi/full/10.1126/science.1216793>

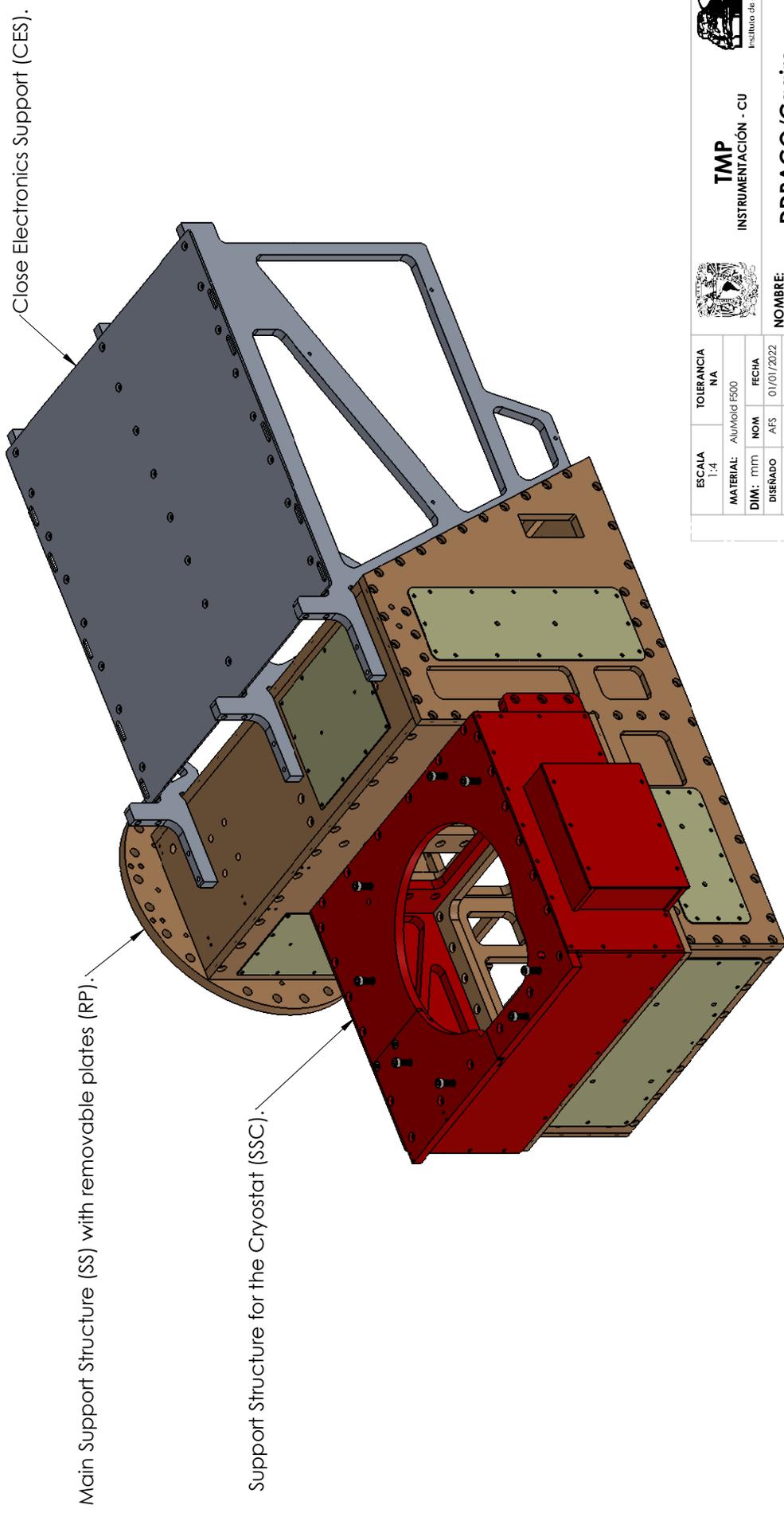
- [9] Grous, A. (2011). Applied Metrology for Manufacturing Engineering. Estados Unidos: John Wiley & Sons.
- [10] Instituto de Astronomía, UNAM. (S/A). COLIBRÍ. Consultado de URL: https://www.COLIBRÍ-obs.org/?page_id=745&lang=es
- [11] Meadows, J.D. (2009). geometric Dimensioning and Tolerancing Handbook: Applications, Analysis & Measurements. Estados Unidos: ASME Press.
- [12] Memoria de cálculo en Excel, disponible en URL: <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1T-YXRKIYXPnKqX1knR1rHDhR2m5Df1n1/edit?usp=sharing&oid=109389950434192471322&rtpof=true&sd=true>
- [13] Mendenhall, W. Et. Al. (2010). Introducción a la probabilidad y estadística. México: Cengage Learning.
- [14] Mitutoyo. (S/A). Manual Coordinate Measuring Machine MICROCORD Crysta-Plus M Series. Japón: Mitutoyo Quality.
- [15] Raghavendra, N.V. (2013). Engineering Metrology And Measurements. India: Oxford University Press.
- [16] Velázquez, C. E. (2019). HAWC: astronomía de rayos gamma desde México. Cien-ciorama, (23), 15-20. Consultado de URL: http://www.cienciorama.unam.mx/a/pdf/545_cienciorama.pdf
- [17] Watson, A. Et. Al. (2022). DDRAGO and WOB Mechanical Design. México: Instituto de Astronomía, UNAM.

Anexos

Apéndice A

Anexo I: Planos de manufactura para acabados en el TMP-CU

DDRAGO / Cagire (01-2023)



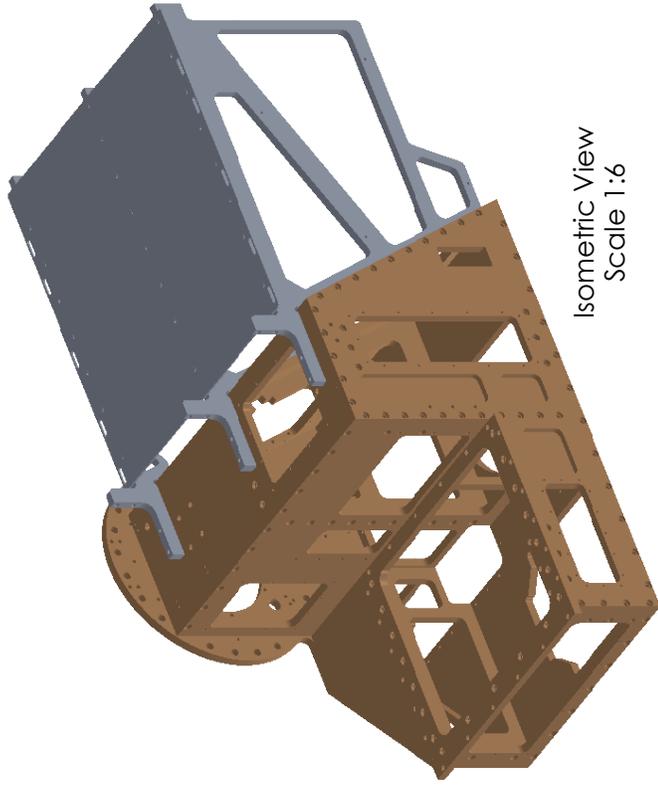
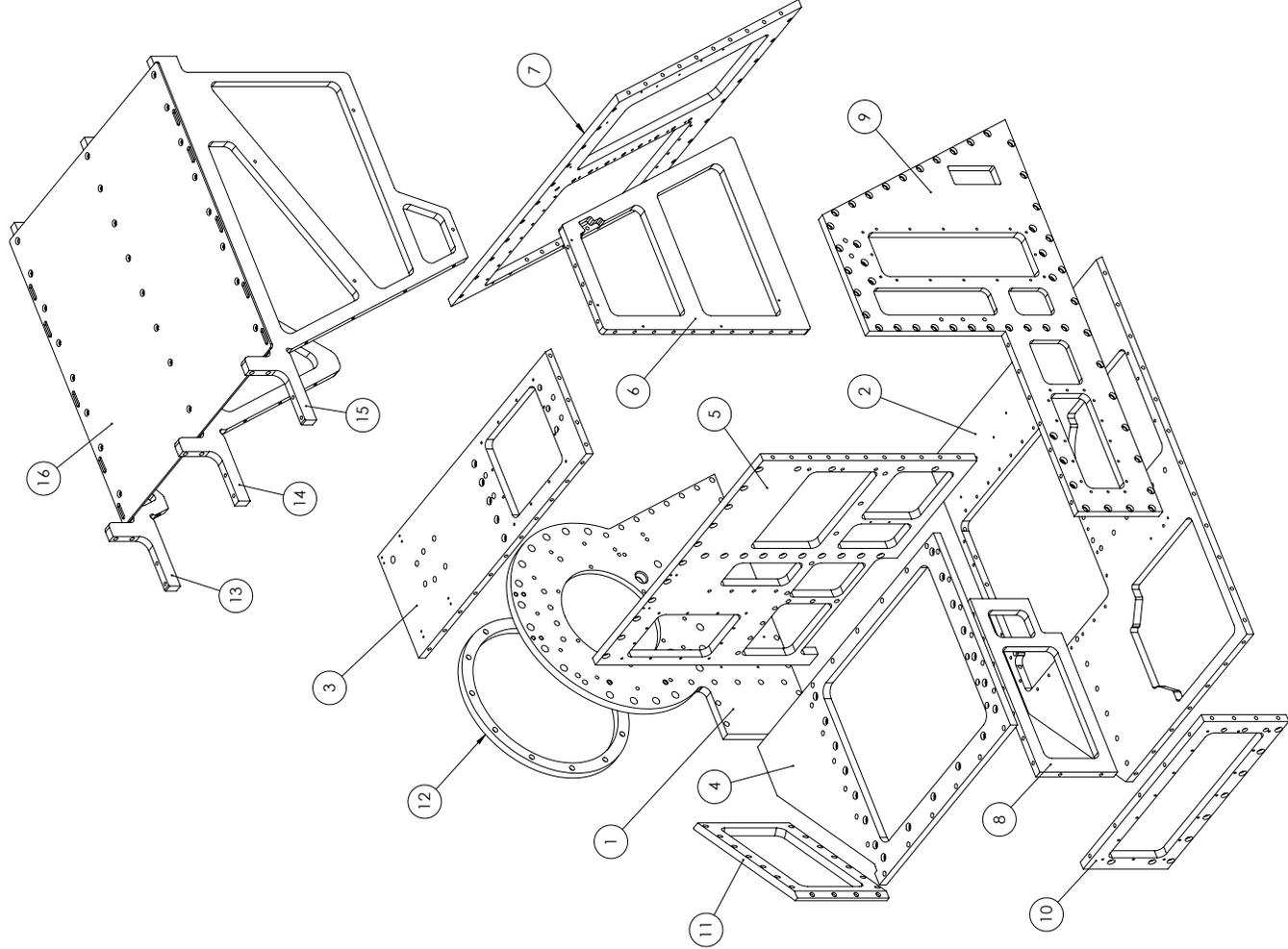
Close Electronics Support (CES).

Main Support Structure (SS) with removable plates (RP).

Support Structure for the Cryostat (SSC).

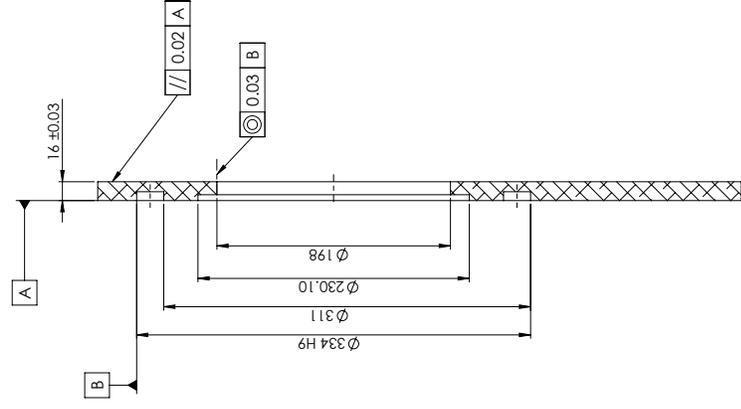
			
TMP INSTRUMENTACIÓN - CU		DDRAGO/Cagire Support Structure	
NOMBRE:		CANT: 1	
ESCALA 1:4		PROY: DDRAGO/Cagire	
TOLERANCIA NA		[Símbolo de precisión]	
MATERIAL: Aluminio 6061		[Símbolo de material]	
DIM: mm		[Símbolo de dimensión]	
DISEÑO	AFS	NOM	01/01/2022
DIBUJADO	JDV	FECHA	01/01/2023
AUTORIZADO	AFS		19/01/2023
APROBADO	RL		25/01/2023
FABRICACIÓN	JR		01/02/2023
COMENTARIOS:			
[Símbolo de código]		[Símbolo de edición]	
CÓDIGO: DD-Cg-MESS		HOJA: 1 31	
		EDICIÓN: 1	
		V. 0	

Structural Plates, DD-Cg,ME-SS-000-Exploded (17-01-2023)			Product Tree - ID		Manufacture by	
#	Component	CAD/Drawing Model	Qty	Product Tree - ID	Manufacture by	
1	Fixed plate 1, interface to the derotator	DD-Cg-ME-SS-P1	1	DD-ME-SST-P1	Instituto de Física	
2	Fixed plate 2	DD-Cg-ME-SS-P2	1	DD-ME-SST-P2	JobShop-Router CNC	
3	Fixed plate 3	DD-Cg-ME-SS-P3	1	DD-ME-SST-P3	JobShop-Router CNC	
4	Fixed plate 4	DD-Cg-ME-SS-P4	1	DD-ME-SST-P4	JobShop-Router CNC	
5	Fixed plate 5B	DD-Cg-ME-SS-P5B	1	DD-ME-SST-P5B	JobShop-Router CNC	
6	Fixed plate 6b	DD-Cg-ME-SS-P6b	1	DD-ME-SST-P6b	JobShop-Router CNC	
7	Fixed plate 7	DD-Cg-ME-SS-P7	1	DD-ME-SST-P7	JobShop-Router CNC	
8	Fixed plate 8b	DD-Cg-ME-SS-P8b	1	DD-ME-SST-P8b	JobShop-Router CNC	
9	Fixed plate 10	DD-Cg-ME-SS-P10	1	DD-ME-SST-P10	JobShop-Router CNC	
10	Fixed plate 19	DD-Cg-ME-SS-P19	1	DD-ME-SST-P19	JobShop-Router CNC	
11	Fixed plate 20	DD-Cg-ME-SS-P20	1	DD-ME-SST-P20	JobShop-Router CNC	
12	Centering ring	DD-Cg-ME-SS-CR	1	DD-ME-SST-CTR	JobShop-Router CNC	
Cagire close electronics support, DD-Cg,ME-SS-000-Exploded (17-01-2023)						
13	Cagire close electronics support 1	DD-Cg-ME-SS-E01A	1	DD-ME-SST-CE51A	JobShop-Router CNC	
14	Cagire close electronics support 2	DD-Cg-ME-SS-E01B	1	DD-ME-SST-CE51B	JobShop-Router CNC	
15	Cagire close electronics support 3	DD-Cg-ME-SS-E01C	1	DD-ME-SST-CE51C	JobShop-Router CNC	
16	Cagire close electronics plate	DD-Cg-ME-SS-CloseElectronicsPlate	1	DD-Cg-ME-SS-CloseElectronicsPlate	JobShop-Router CNC	

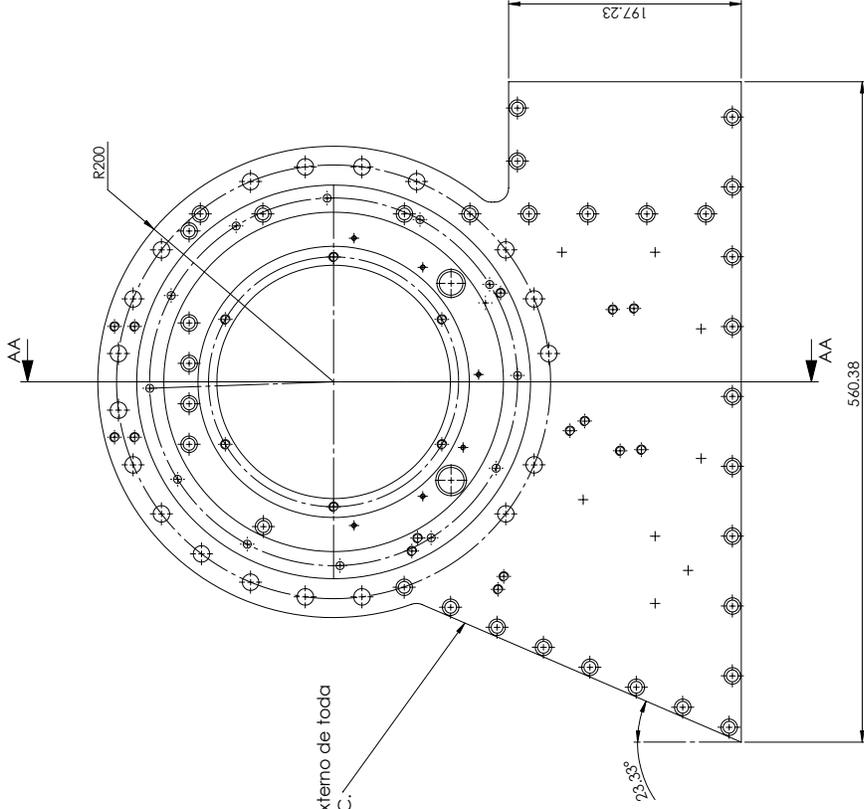


Isometric View
Scale 1:6

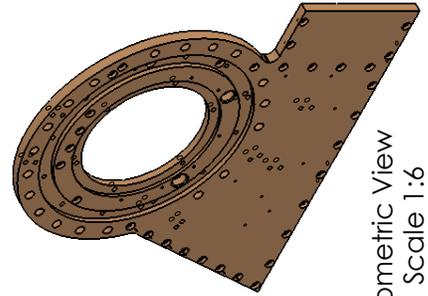
			
INSTRUMENTACIÓN - CU		INSTRUMENTACIÓN - CU	
NOMBRE: DDRAGO/Cagire Support Structure		CANT: 1	
ESCALA: 1:6 TOLERANCIA: ± 0,05		PROY: DDRAGO/Cagire	
MATERIAL: Aluminio F500		CÓDIGO: DD-Cg-MESS	
DIM: mm		HOJA: 2	
FECHA: 01/01/2022		EDICIÓN: 1	
DISEÑADO: AFS		V: 0	
DIBUJADO: JDV			
AUTORIZADO: AFS			
APROBADO: RL			
FABRICACIÓN: JR			
COMENTARIOS:			



SECTION AA-AA
SCALE 1:3



Seguir el perfil externo de toda la pieza por CNC.



Isometric View
Scale 1:6



TMP
INSTRUMENTACIÓN - CU

DD-ME-SST-P1

CANT: 1

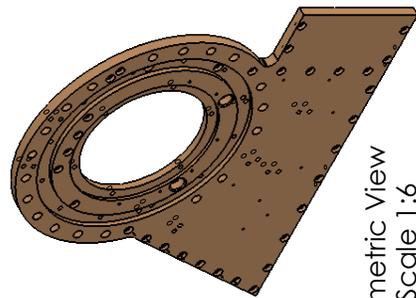
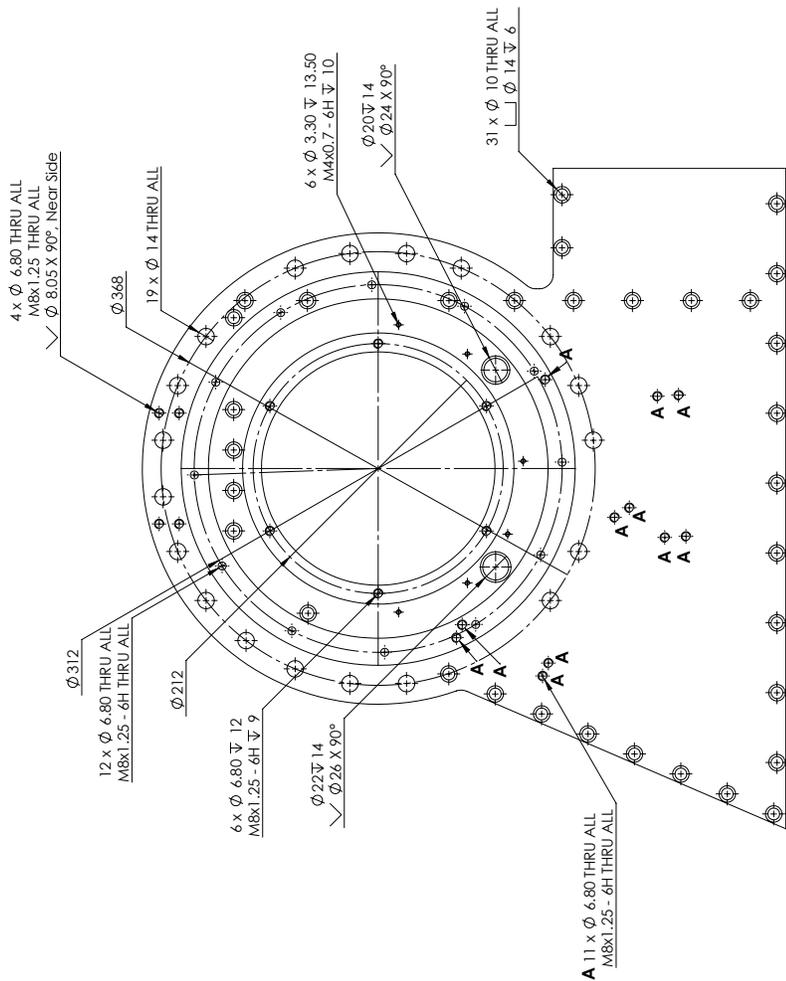
PROY: DDRAGO/Cagire

A2

CÓDIGO: DD-Cp-MESS

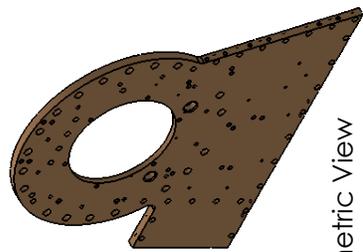
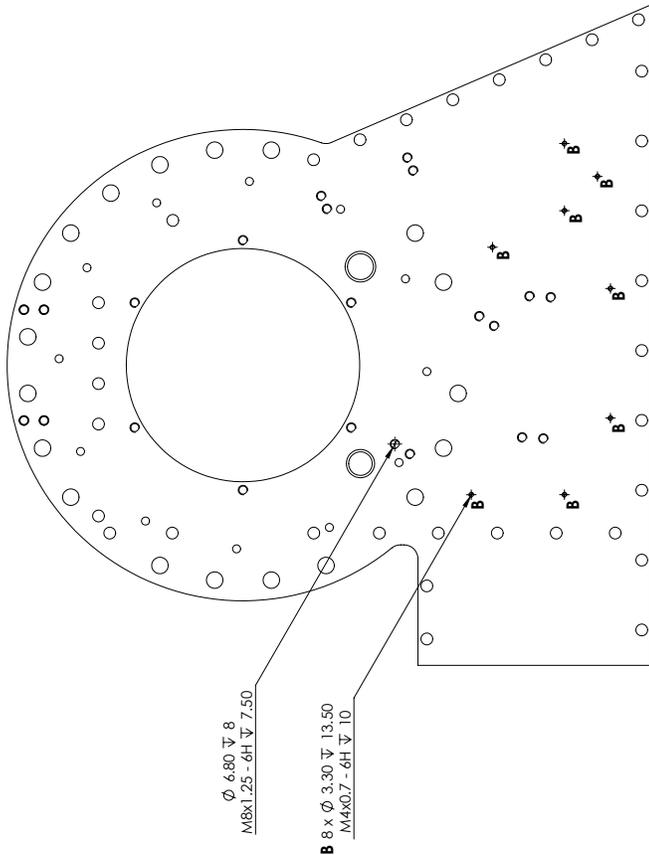
HOJA 3 31 EDICIÓN: 1 V. 0

ESCALA	TOLERANCIA	MATERIAL	DISEÑO	DIBUJADO	AUTORIZADO	APROBADO	FABRICACIÓN
1:3	± 0.05	Aluminio F500	AFS	JDV	AFS	RL	JR
			NOM	FECHA			
			01/01/2022	01/01/2023	19/01/2023	25/01/2023	01/02/2023
COMENTARIOS:							



NOTA: BARRENOS MARCADOS VAN POR LA CARA MOSTRADA

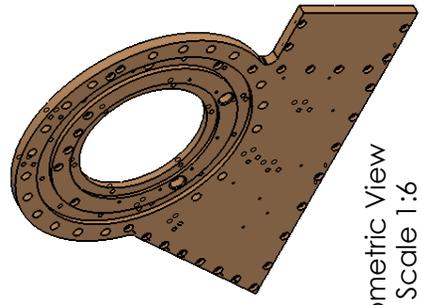
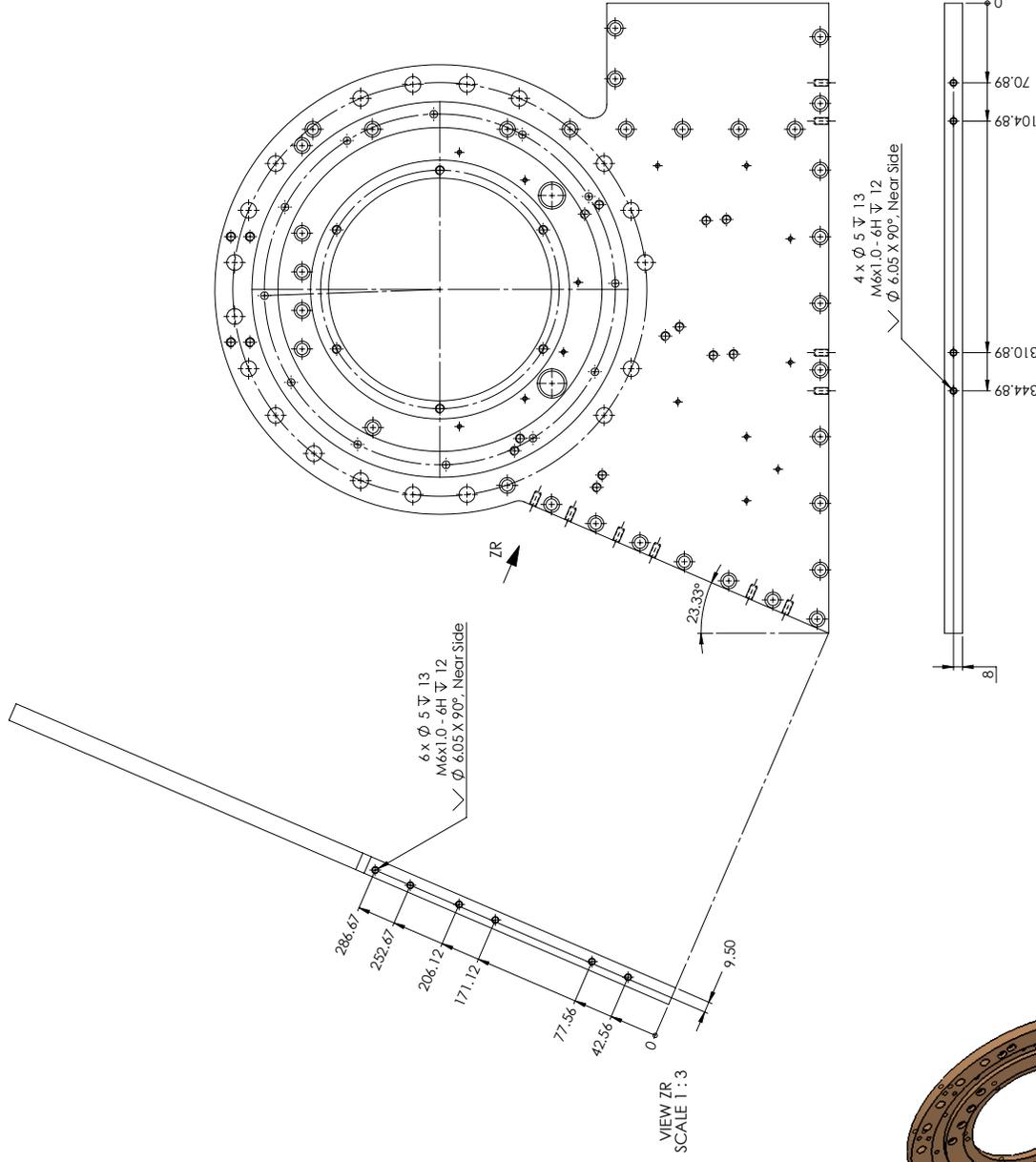
			
INSTRUMENTACIÓN - CU		INSTRUMENTACIÓN - CU	
NOMBRE:		DD-ME-SST-P1	
PROY:		A2	
CANT:		1	
CÓDIGO:		DD-Cp-MESS	
ESCALA		TOLERANCIA	
1:3		± 0.05	
MATERIAL:		Aluminio F500	
DIM:		NOM	
DISEÑO		AFS	
DIBUJADO		JDV	
AUTORIZADO		AFS	
APROBADO		RL	
FECHA		01/01/2022	
19/01/2023		01/01/2023	
25/01/2023		01/02/2023	
FABRICACIÓN		JR	
COMENTARIOS:			
(dele Proy: AW)			
HOJA		4	
EDICIÓN:		1	
V.		0	



Isometric View
Scale 1:6

NOTA: BARENOS MARCADOS VAN POR LA CARA MOSTRADA

				TMP INSTRUMENTACIÓN - CU				INSTITUTO DE ASTRONOMÍA	
ESCALA 1:3		TOLERANCIA ± 0.05		MATERIAL: Aluminio F500		NOMBRE: DD-ME-SST-P1		CANT.: 1	
DIM: mm		NOM		FECHA		PROY: A2		[Logo of a person in a hard hat]	
DISEÑO: AFS		01/01/2022		DIBUJADO: JDV		01/01/2023		[Logo of a person in a hard hat]	
AUTORIZADO: AFS		19/01/2023		APROBADO: RL		25/01/2023		CÓDIGO: DD-Cp-MESS	
FABRICACIÓN: JR		01/02/2023		COMENTARIOS:		[Logo of a person in a hard hat]		HOJA 5 31 EDICIÓN: 1 V. 0	



					
TMP INSTRUMENTACIÓN - CU		DD-ME-SST-P1		CANT: 1	
NOMBRE:		PROY: A2		(dele Proy: AW)	
ESCALA 1:3		TOLERANCIA ± 0.05		CÓDIGO: DD-Cp-MESS	
MATERIAL: Aluminio F500		FECHA		HOJA 6	
DIM: mm		NOM		EDICIÓN: 1	
DISEÑO: AFS		FECHA: 01/01/2022		V: 0	
DIBUJADO: JDV		FECHA: 01/01/2023			
AUTORIZADO: AFS		FECHA: 19/01/2023			
APROBADO: RL		FECHA: 25/01/2023			
FABRICACIÓN: JR		FECHA: 01/02/2023			
COMENTARIOS:					

Arreglo de Regletas	
#	Código
1*	P2-1
2*	P2-2
3*	P2-3
4*	P2-4
5*	P2-5

Detalles	
En hoja 5	

F 2 x ϕ 5 ∇ 13
M6x1.0 - 6H ∇ 12
✓ ϕ 6.05 X 90° - Near Side

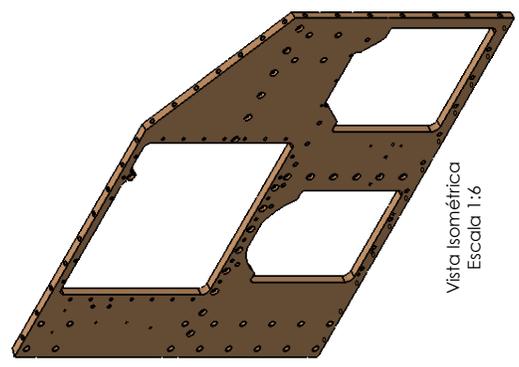
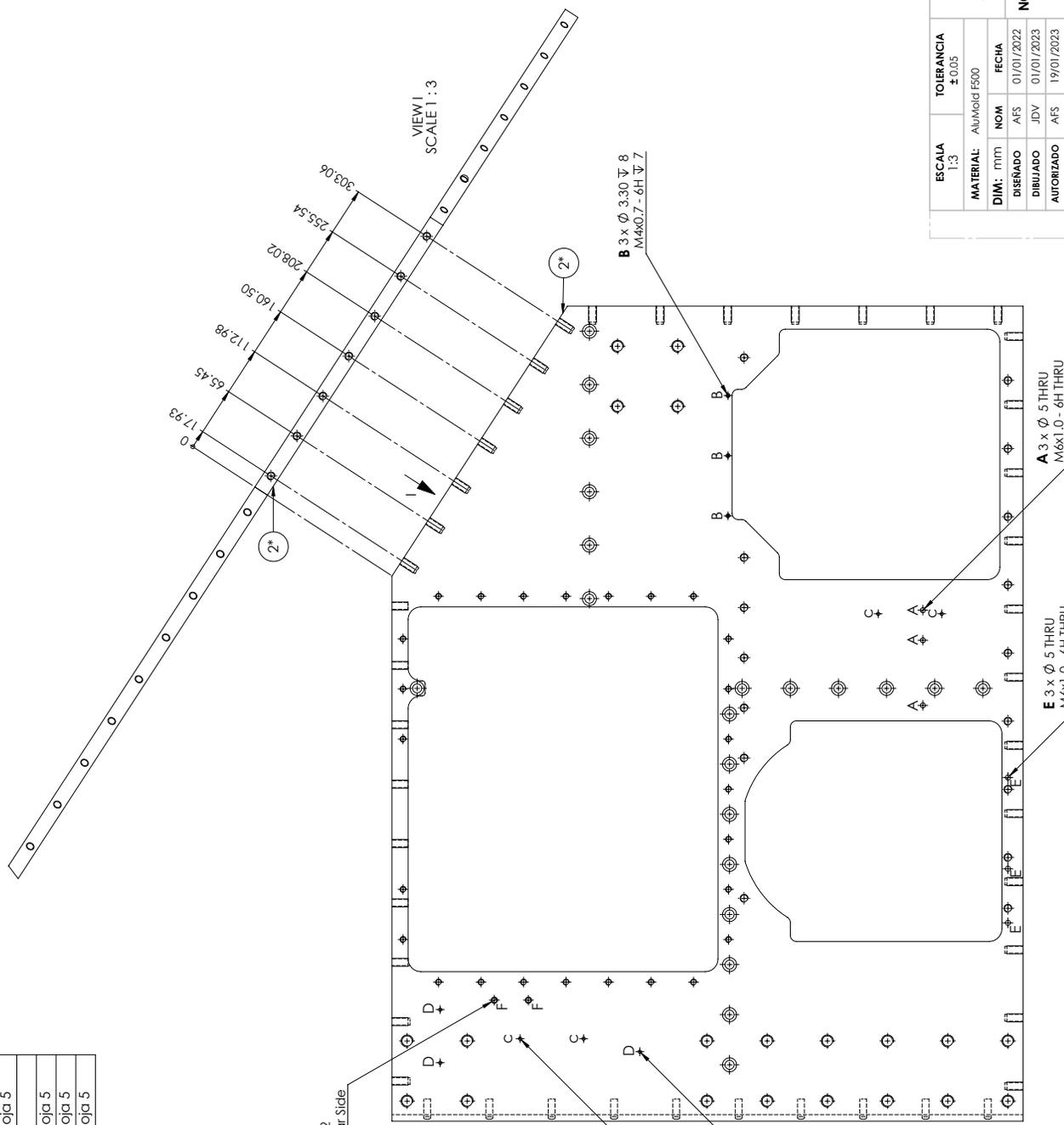
C 4 x ϕ 3.30 THRU
M4x0.7 - 6H THRU

D 3 x ϕ 3.30 THRU
M4x0.7 - 6H THRU

E 3 x ϕ 5 THRU
M6x1.0 - 6H THRU

A 3 x ϕ 5 THRU
M6x1.0 - 6H THRU

B 3 x ϕ 3.30 ∇ 8
M4x0.7 - 6H ∇ 7

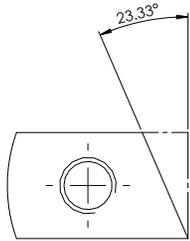


Vista Isométrica
Escala 1:6

 TMP INSTRUMENTACIÓN - CU		 Instituto de astronomía	
ESCALA 1:3		TOLERANCIA ± 0.05	
MATERIAL: Aluminio F500		FECHA	
DIM: mm		NOM	
DISEÑADO AFS		01/01/2022	
DIBUJADO JDV		01/01/2023	
AUTORIZADO AFS		19/01/2023	
APROBADO RL		25/01/2023	
FABRICACIÓN JR		01/02/2023	
COMENTARIOS:			
PROY: A2		CANT: 1	
NOMBRE: DD-ME-SST-P2		HOJA 8	
CÓDIGO: DD-Cg-MESS		EDICIÓN: 1	
(dele Proy: AW)		V. 0	

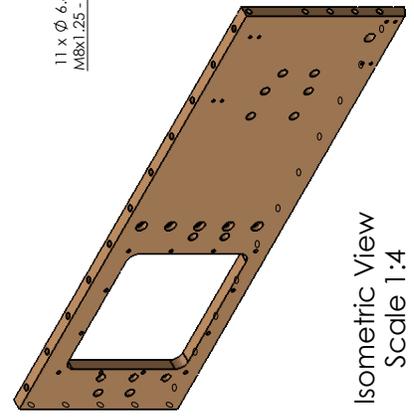
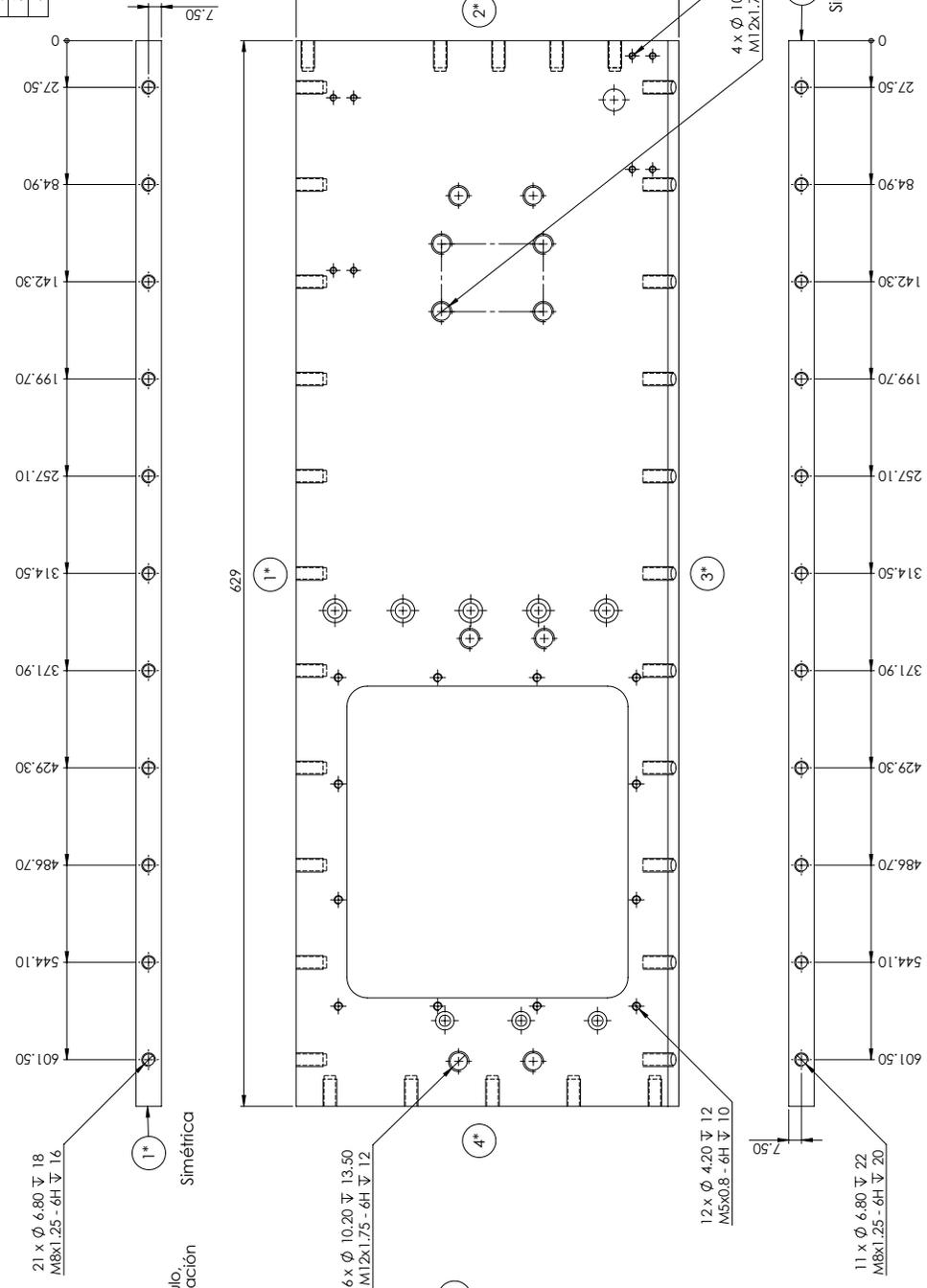
Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-anam.

Atriego de Regletas	
#	Código
1*	Placa Adyacente
2*	DD-ME-SST-F5B
3*	DD-ME-SST-P1
3*	DD-ME-SST-P7
4*	DD-ME-SST-P10



DETAIL A
SCALE 2 : 1

Nota de manufactura:
antes de maquinarse el ángulo,
revisar que sea en la orientación
adecuada de la placa.



Isometric View
Scale 1:4



TMP
INSTRUMENTACIÓN - CU



DD-ME-SST-P3

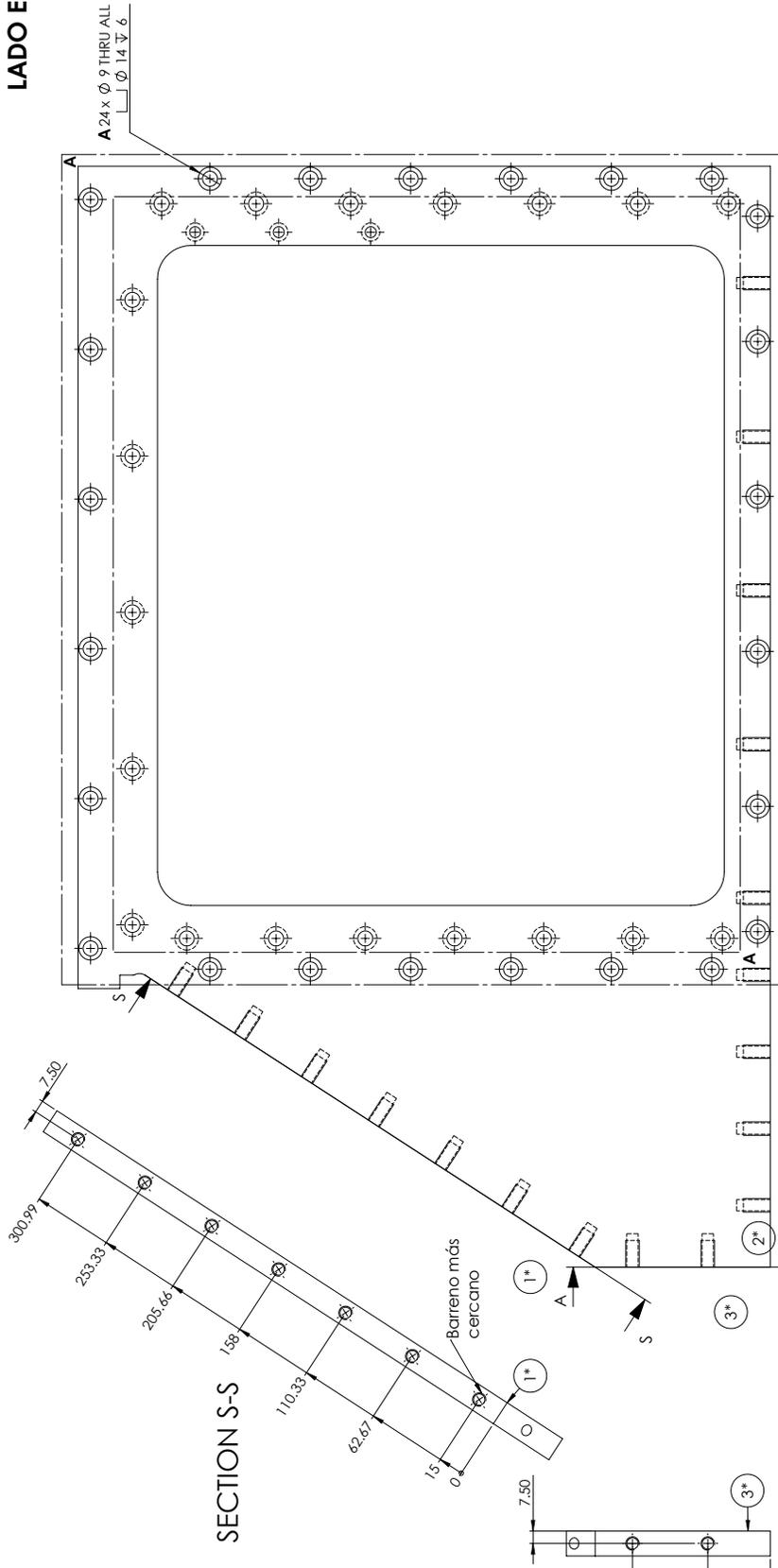
PROY: **DDRAGO/Cagire**
CANT: 1

ESCALA	TOLERANCIA	MATERIAL	DIM:	NOM	FECHA
1:2	± 0.05	Aluminio F500	mm		
DISEÑO	AFS	01/01/2022			
DIBUJADO	JDV	01/01/2023			
AUTORIZADO	AFS	19/01/2023			
APROBADO	RL	25/01/2023			
FABRICACIÓN	JR	01/02/2023			

NOMBRE:
CÓDIGO: DD-Cg-MESS
HOJA: 9 | 31 EDICIÓN: 1 | V. 0

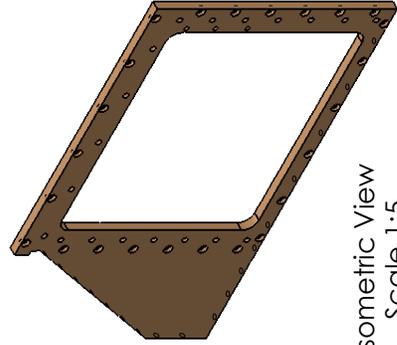
Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-unam.

Arreglo de Regletas	
#	Código
1*	Placa Adyacente
2*	DD-ME-SST-P20
3*	DD-ME-SST-P58
	DD-ME-SST-P1



SECTION S-S

SECTION A-A



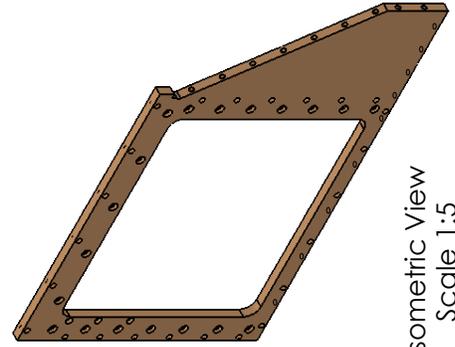
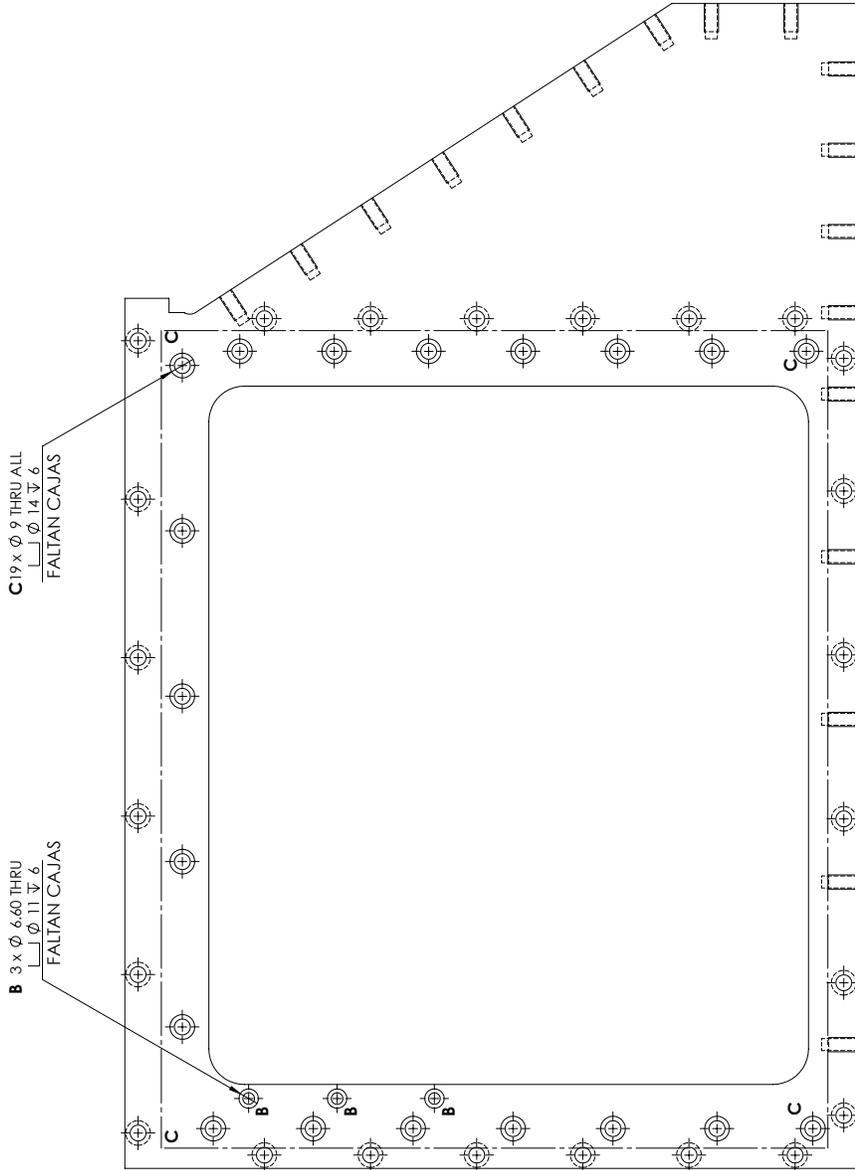
Isometric View
Scale 1:5

Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-unam.

NOTA: BARENOS MARCADOS VAN POR LA CARA MOSTRADA

INSTRUMENTACIÓN - CU		INSTRUMENTACIÓN - CU	
ESCALA 1:2		TOLERANCIA ± 0.05	
MATERIAL: Aluminio F500		DIM: mm NOM	
DISEÑO AFS 01/01/2022		FECHA	
DIBUJADO JDV 01/01/2023		DISEÑO AFS 01/01/2023	
AUTORIZADO AFS 19/01/2023		DIBUJADO JDV 01/01/2023	
AFROBADO RL 25/01/2023		AUTORIZADO AFS 19/01/2023	
FABRICACIÓN JR 01/02/2023		AFROBADO RL 25/01/2023	
COMENTARIOS:		FABRICACIÓN JR 01/02/2023	
CANT: 1		NOMBRE: DD-ME-SST-P4	
PROY: A2		CANT: 1	
CÓDIGO: DD-Cp-MESS		CANT: 1	
HOJA 1		EDICIÓN: 1	
V. 0		V. 0	

LADO I



Isometric View
Scale 1:5

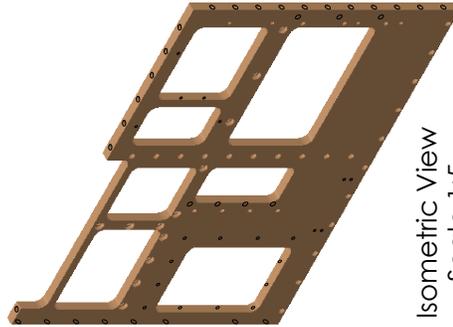
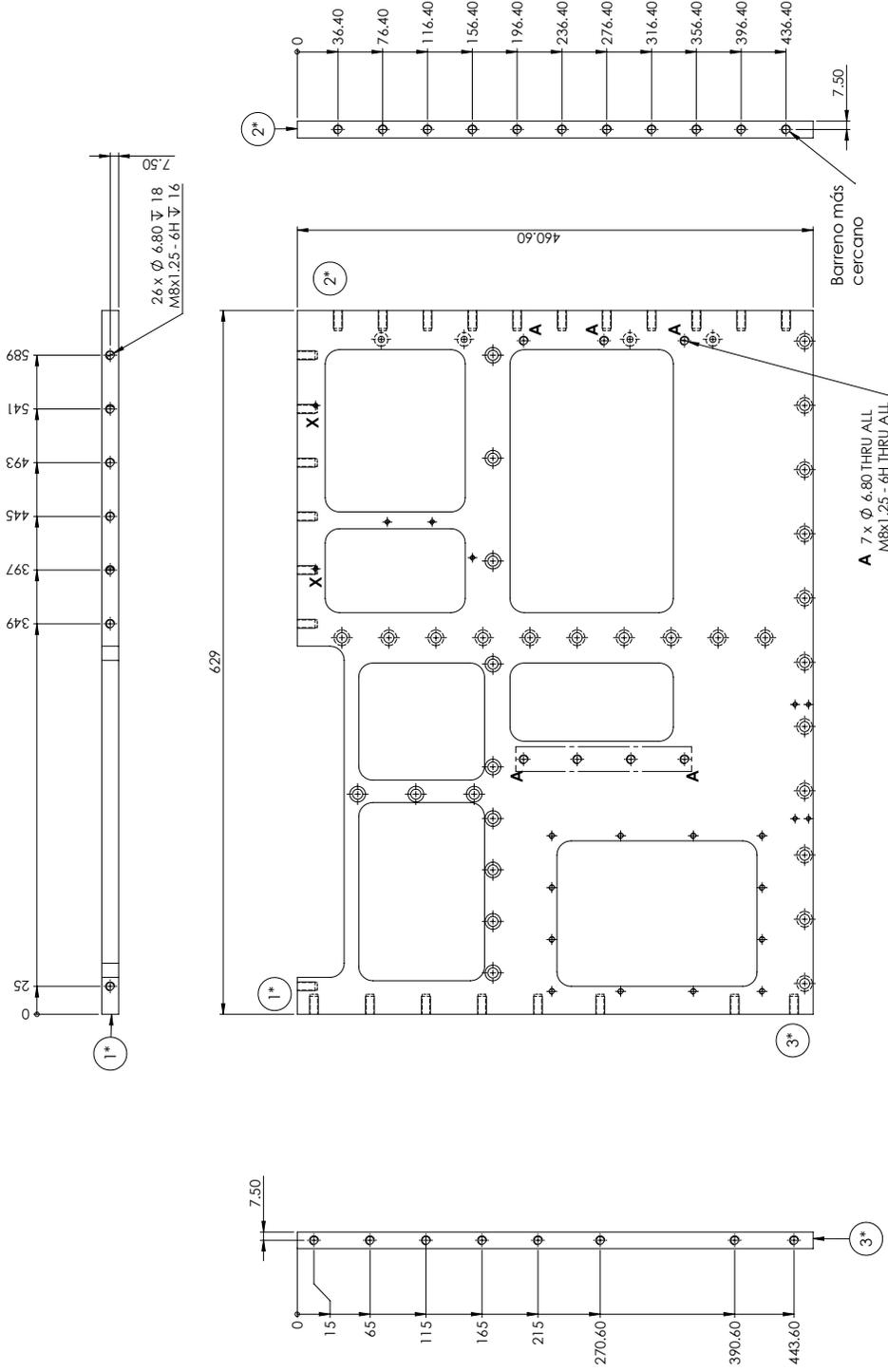
Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-unam.

NOTA: BARRENOS MARCADOS VAN POR LA CARA MOSTRADA

TMP INSTRUMENTACIÓN - CU		DD-ME-SST-P4		CANT: 1	
NOMBRE:		PROY: A2		(dele Proy: AW)	
ESCALA 1:2		TOLERANCIA ± 0.05		CÓDIGO: DD-Cp-MESS	
MATERIAL: Aluminio F500		DIM: mm		FECHA	
DISEÑO: AFS		NOM:		FECHA	
DIBUJADO: JDV		FECHA:		FECHA:	
AUTORIZADO: AFS		FECHA:		FECHA:	
APROBADO: RL		FECHA:		FECHA:	
FABRICACIÓN: JR		FECHA:		FECHA:	
COMENTARIOS:					
HOJA 1		EDICIÓN: 1		V. 0	

Arreglo de Regletas	
#	Código
1*	Placa Adyacente
2*	DD-ME-SST-P2
3*	DD-ME-SST-P10
3*	DD-ME-SST-P1

LADO E

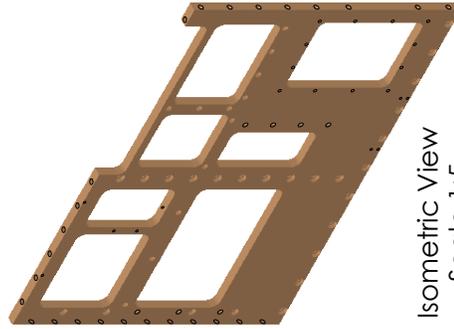
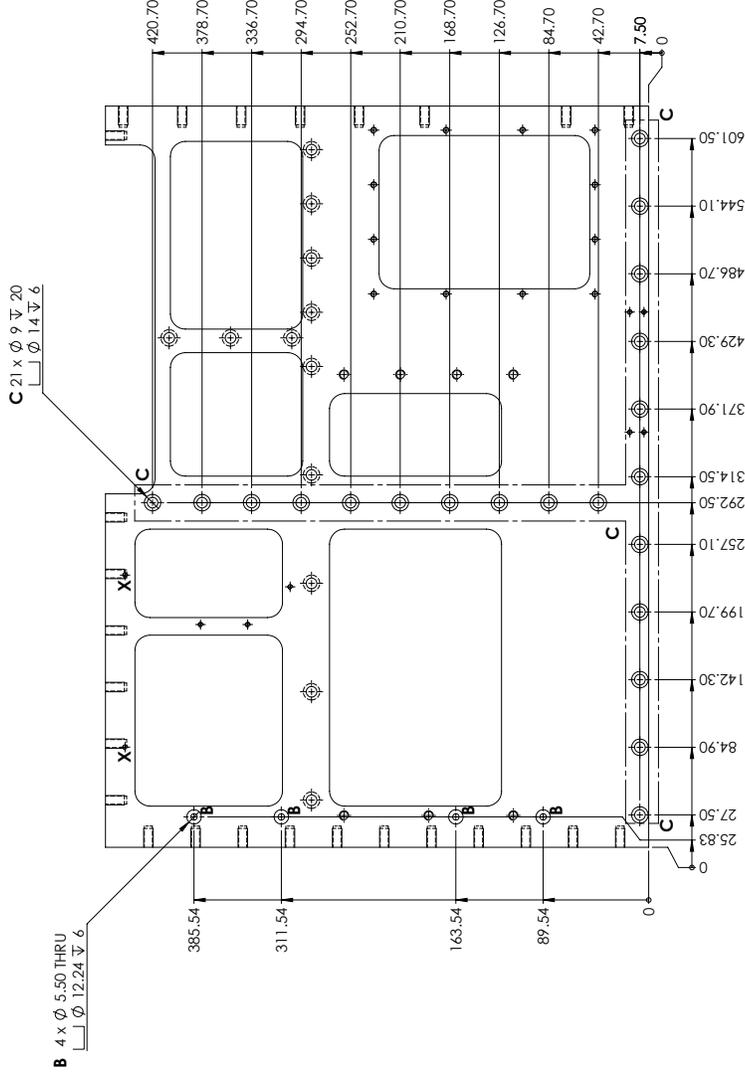


Isometric View
Scale 1:5

NOTA X: NO SE FABRICA ESTE ELEMENTO
NOTA: BARENOS MARCADOS VAN POR LA CARA MOSTRADA

 TMP INSTRUMENTACIÓN - CU		 Instituto de astronomía	
ESCALA 1:3		TOLERANCIA ± 0.05	
MATERIAL: Aluminio F500		FECHA	
DISEÑADO AFS	NOV 01/01/2022	COMENTARIOS:	
DIBUJADO JDV	NOV 01/01/2023		
AUTORIZADO AFS	NOV 19/01/2023		
APROBADO RL	NOV 25/01/2023		
FABRICACIÓN JR	NOV 01/02/2023		
NOMBRE: DD-ME-SST-P5B		CANT: 1	
PROY: A2		DDRAGO/Cagire	
(dele Proy: AW)			
CÓDIGO: DD-CG-MESS		HOJA 1 31 EDICIÓN: 1 V. 0	

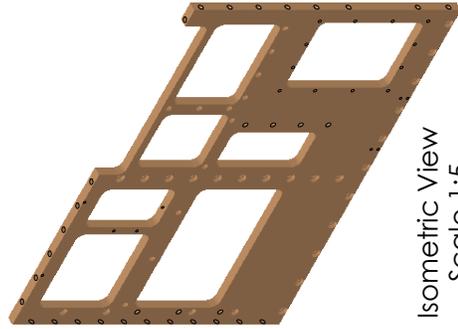
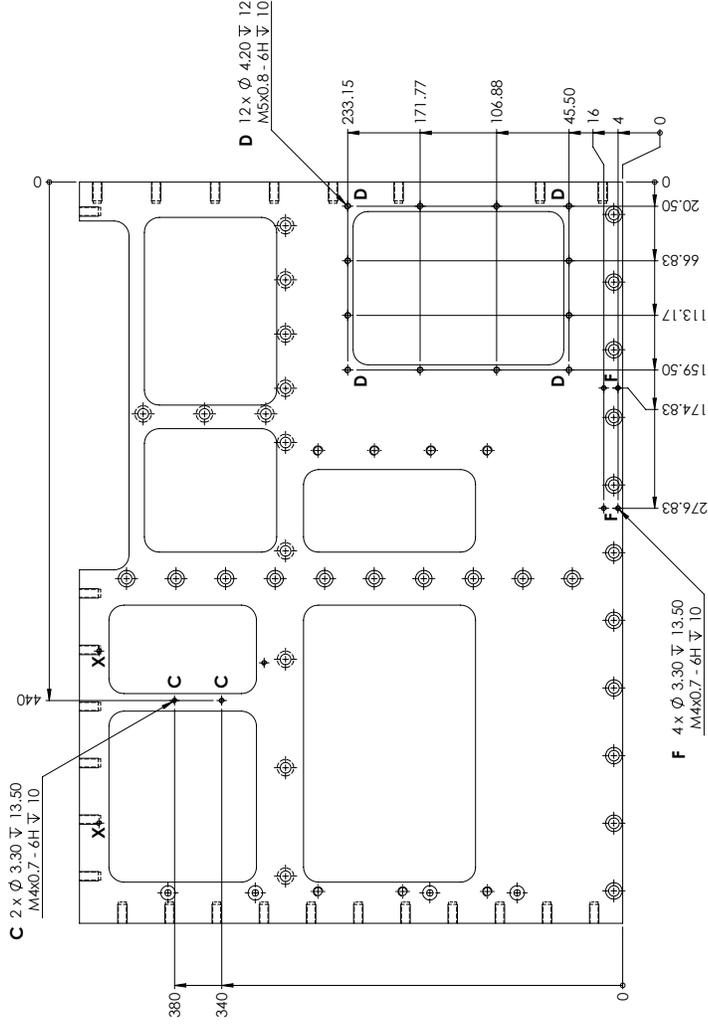
Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-unam.



Isometric View
Scale 1:5

NOTA X: NO SE FABRICA ESTE ELEMENTO
NOTA: BARRENOS MARCADOS VAN POR LA CARA MOSTRADA

TMP INSTRUMENTACIÓN - CU		DD-ME-SST-P5B	
ESCALA 1:3		TOLERANCIA ± 0.05	
MATERIAL: Aluminio F500		DIM: mm NOM: FECHA	
DISEÑADO: AFS	01/01/2022	NOMBRE: DD-ME-SST-P5B	
DIBUJADO: JDV	01/01/2023	CANT: 1	
AUTORIZADO: AFS	19/01/2023	PROY: DDRAGO/Cagire	
APROBADO: RL	25/01/2023	A2	
FABRICACIÓN: JR	01/02/2023	CÓDIGO: DD-Cg-MESS	
COMENTARIOS:		HOJA 1 31 EDICIÓN: 1 V. 0	

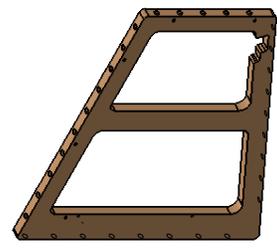
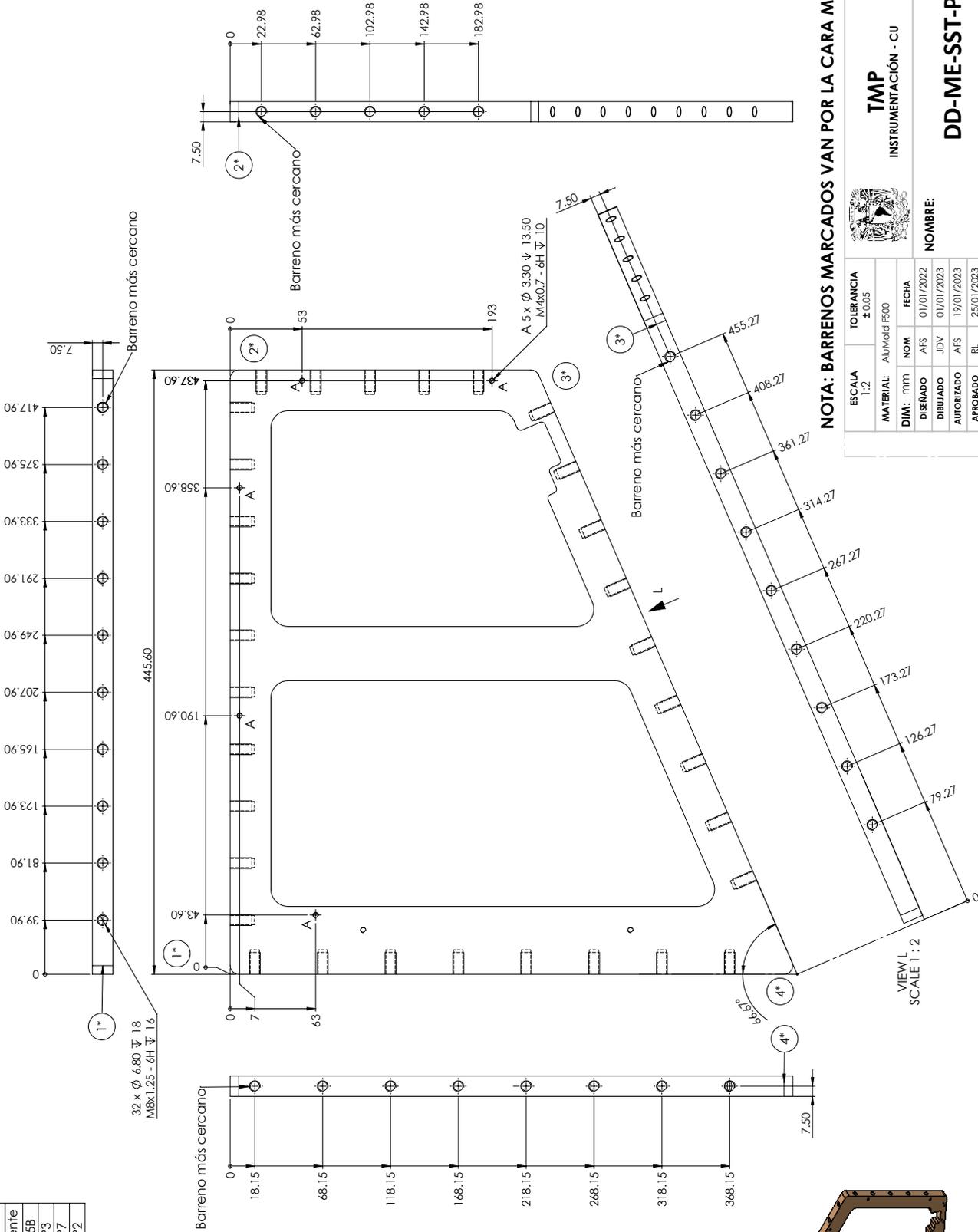


Isometric View
Scale 1:5

NOTA X: NO SE FABRICA ESTE ELEMENTO
NOTA: BARRENOS MARCADOS VAN POR LA CARA MOSTRADA

			
ESCALA 1:3		TOLERANCIA ± 0.05	
MATERIAL: Aluminio F500		FECHA	
DISEÑADO AFS	NOM	01/01/2022	
DIBUJADO JDV	FECHA	01/01/2023	
AUTORIZADO AFS	FECHA	19/01/2023	
APROBADO RL	FECHA	25/01/2023	
FABRICACIÓN JR	FECHA	01/02/2023	
COMENTARIOS:			
PROY: A2		CANT: 1	
NOMBRE: DD-ME-SST-P5B		(dele Proy: AW)	
CÓDIGO: DD-Cg-MESS		HOJA 1 31 EDICIÓN: 1 V. 0	

Arreglo de Regletas	
#	Código
	Placa Adyacente
1*	P68-1
2*	P68-2
3*	P68-3
4*	P68-4

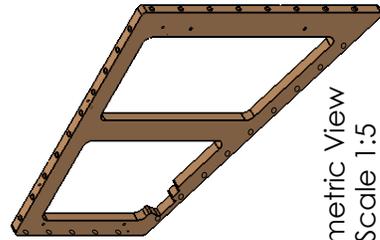
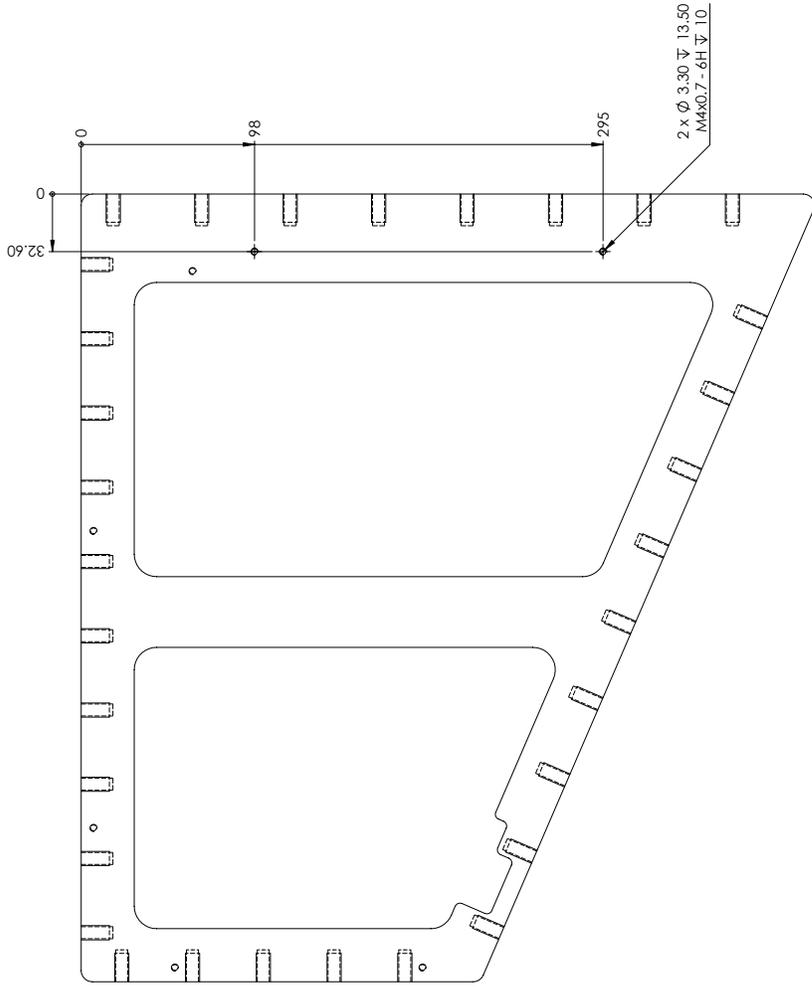


Isometric View
Scale 1:5

Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-unam.

NOTA: BARRENOS MARCADOS VAN POR LA CARA MOSTRADA

ESCALA	TOLERANCIA	NOMBRE:	
1:2	± 0.05	DD-ME-SST-P6b	
MATERIAL:	Aluminio F500	CANT: 1	
DIM: mm	NOM	PROY: DDRAGO/Cagire	
DESIGNADO	AFS	[Firma: Proj. AW]	
DIBUJADO	JDV	CÓDIGO: DD-Cg-MESS	
AUTORIZADO	AFS	HOJA 1 31 EDICIÓN: 1 V. 0	
APROBADO	RL		
FABRICACIÓN	JR		
COMENTARIOS:			



Isometric View
Scale 1:5

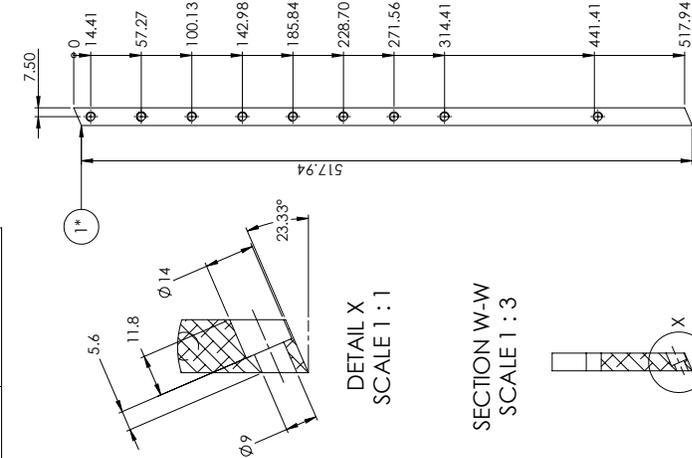
Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-unam.

NOTA: BARRENOS MARCADOS VAN POR LA CARA MOSTRADA

TMP INSTRUMENTACIÓN - CU		DD-ME-SST-P6b	
ESCALA 1:2		TOLERANCIA ± 0.05	
MATERIAL: Aluminio F500		NOMBRE:	
DIM: mm NOM		FECHA	
DISEÑO: AFS	01/01/2022	CANT: 1	
DIBUJADO: JDV	01/01/2023	(dele Proy: AW)	
AUTORIZADO: AFS	19/01/2023	CÓDIGO: DD-Cp-MESS	
APROBADO: RL	25/01/2023	PROJ:	
FABRICACIÓN: JR	01/02/2023	A2	
COMENTARIOS:		DDRAGO/Cagire	
HOJA 1		EDICIÓN: 1	
V. 0		V. 0	

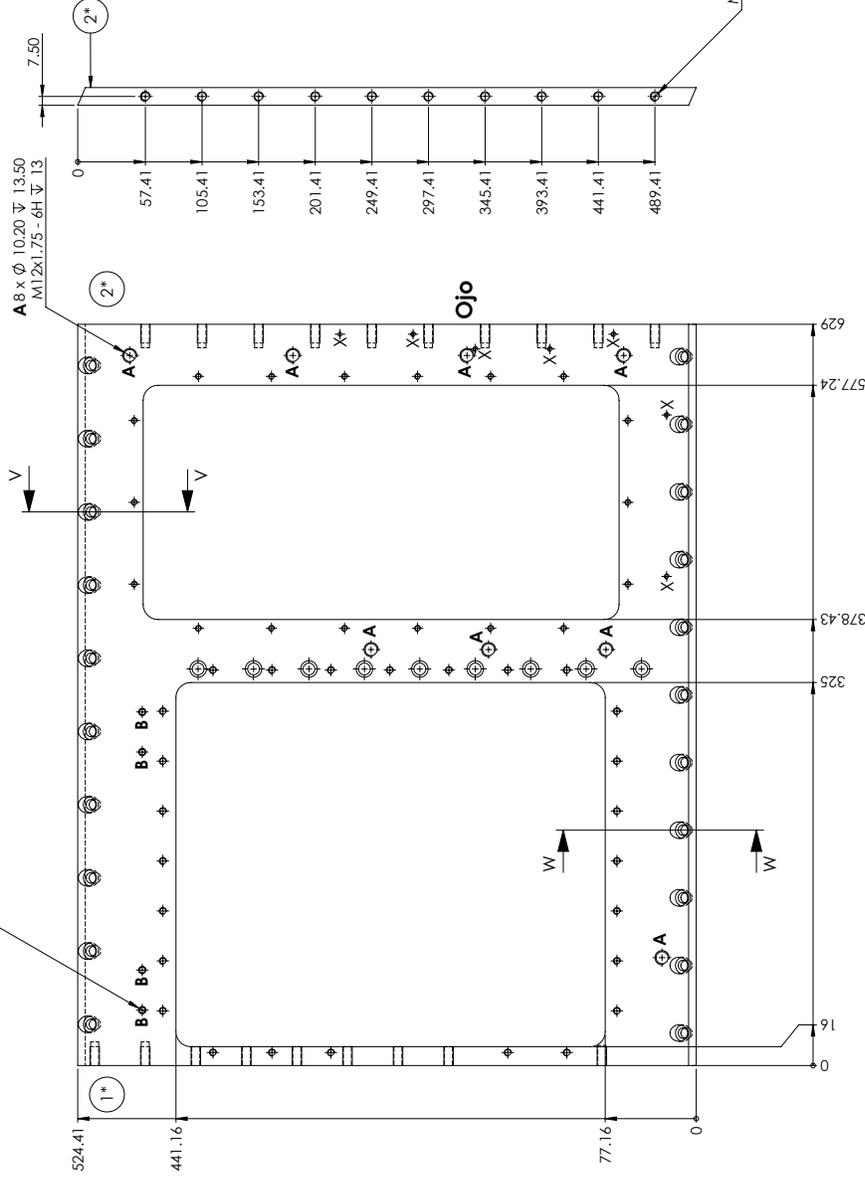
Arreglo de Regletas	
#	Código
1*	P7-1
2*	P7-2

B 4 x Ø 5 ∇ 13
M6x1.0 - 6H ∇ 12
Ø 6.05 X 90°, Near Side

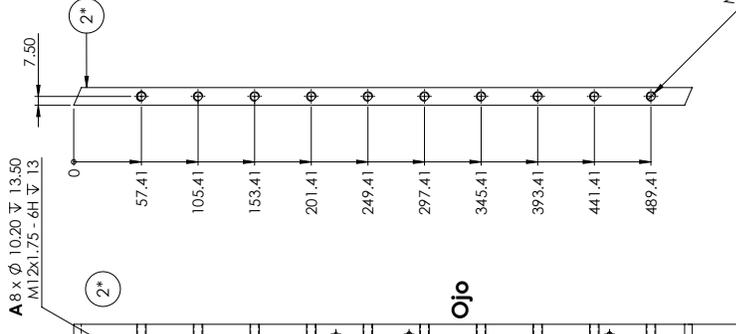


SECTION W-W
SCALE 1 : 3

DETAIL X
SCALE 1 : 1

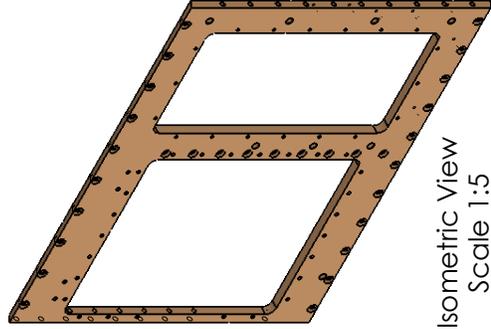


Ojo



SECTION V-V
SCALE 1 : 3

DETAIL Y
SCALE 1 : 1



Isometric View
Scale 1:5

NOTA X: NO SE FABRICA ESTE ELEMENTO

ESCALA	TOLERANCIA
1:3	± 0.05

MATERIAL	Aluminio F500	
DIM: mm	NOM	FECHA
DISEÑADO	AFS	01/01/2022
DIBUJADO	JDV	01/01/2023
AUTORIZADO	AFS	19/01/2023
APROBADO	RL	25/01/2023
FABRICACIÓN	JR	01/02/2023

COMENTARIOS:



TMP
INSTRUMENTACIÓN - CU



DD-ME-SST-P7

NOMBRE:

CANT: 1

PROY: DDRAGO/Cagire

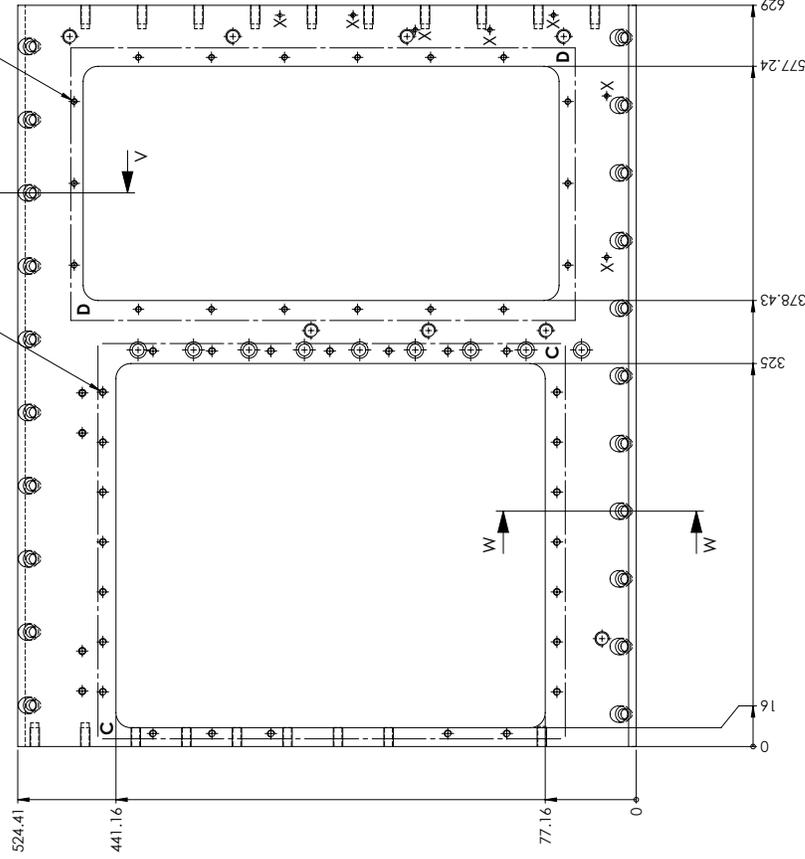
A2



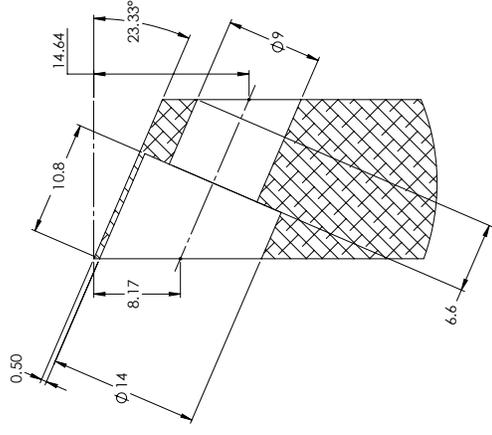
CÓDIGO: DD-Cg-MESS

D 18 x Ø 4.20 ∇ 12
M5x0.8 - 6H ∇ 10

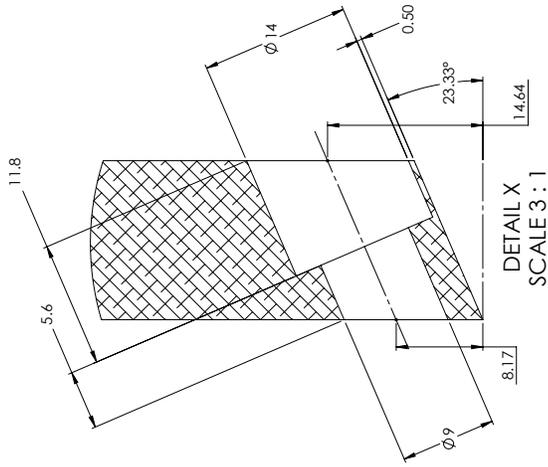
C 26 x Ø 5 THRU ALL
M6x1.0 - 6H THRU ALL



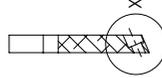
SECTION V-V
SCALE 1 : 3



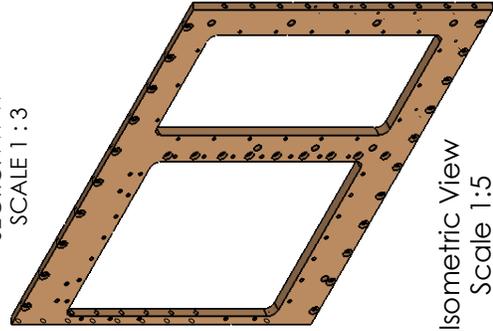
DETAIL Y
SCALE 3 : 1



DETAIL X
SCALE 3 : 1



SECTION W-W
SCALE 1 : 3



Isometric View
Scale 1:5

NOTA X: NO SE FABRICA ESTE ELEMENTO

ESCALA 1:3	TOLERANCIA ± 0.05	
MATERIAL: Alumilid F500		
DIM: mm	NOM	FECHA
DISEÑADO AFS	01/01/2022	
DIBUJADO JDV	01/01/2023	
AUTORIZADO AFS	19/01/2023	
APROBADO RL	25/01/2023	
FABRICACIÓN JR	01/02/2023	
COMENTARIOS:		



TMP
INSTRUMENTACIÓN - CU



DD-ME-SST-P7

NOMBRE:

CANT: 1

PROY: **DDRAGO/Cagire**

A2

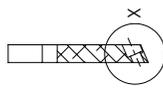
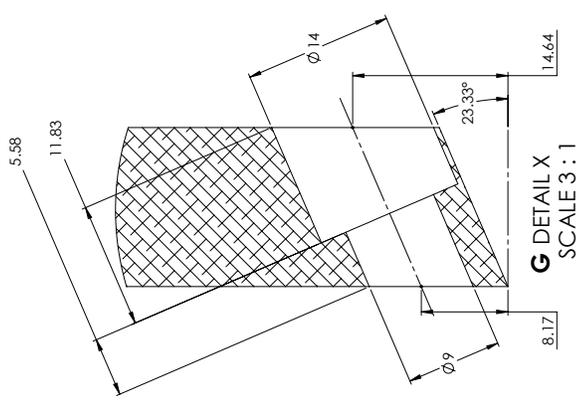
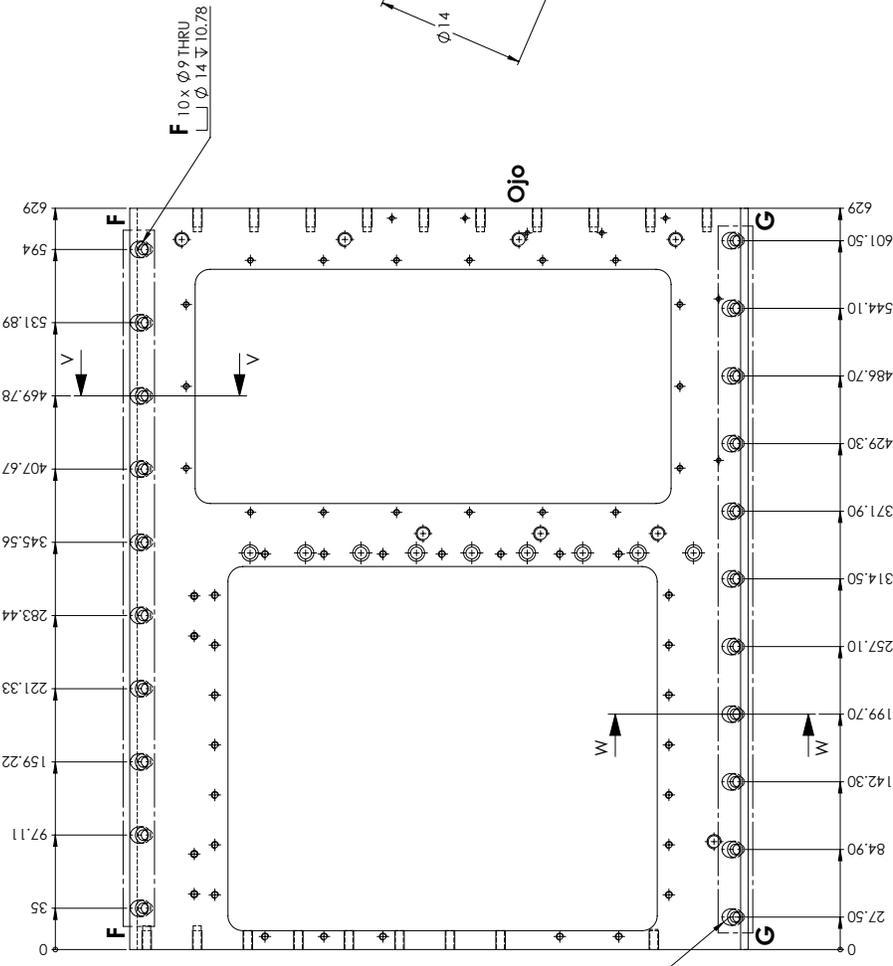


(dele Proy: AW)

CÓDIGO: DD-Cg-MESS

HOJA 1 31 EDICIÓN: 1 V. 0

Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-unam.

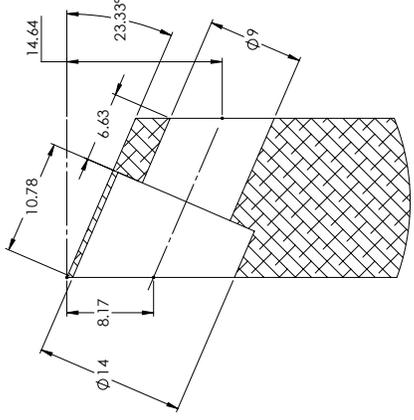


SECTION X-X
SCALE 1:3

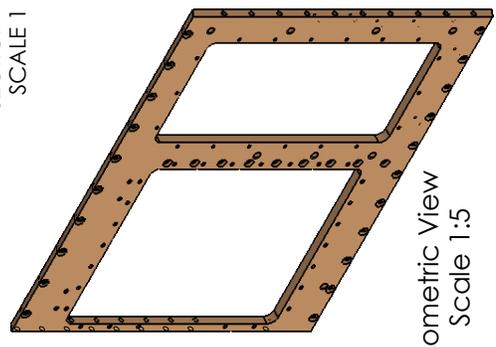


SECTION W-W
SCALE 1:3

SECTION V-V
SCALE 1:3



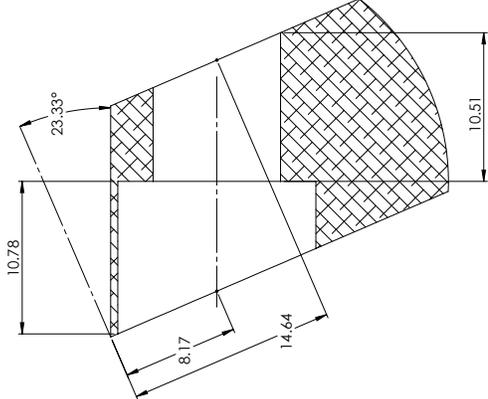
SECTION Y-Y
SCALE 3:1



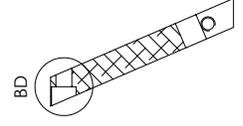
Isometric View
Scale 1:5

					
ESCALA 1:3		TOLERANCIA ± 0.05		NOMBRE: DD-ME-SST-P7	
MATERIAL: Aluminio F500		DISEÑO: AFS 01/01/2022		PROY: A2	
DIM: mm		DIBUJADO: JDV 01/01/2023		CANT: 1	
AUTORIZADO: AFS 19/01/2023		APROBADO: RL 25/01/2023		CÓDIGO: DD-Cp-MESS	
FABRICACIÓN: JR 01/02/2023		COMENTARIOS:		HOJA 1 31 EDICIÓN: 1 V. 0	

Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-unam.

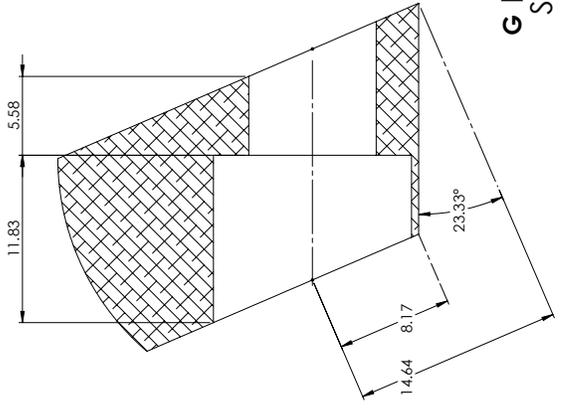


F DETAIL BD
SCALE 4 : 1

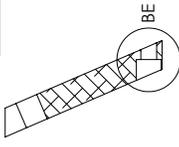


SECTION QY-QY
SCALE 1 : 2

F 10 X Ø 9 THRU
Ø 14.64 10.78

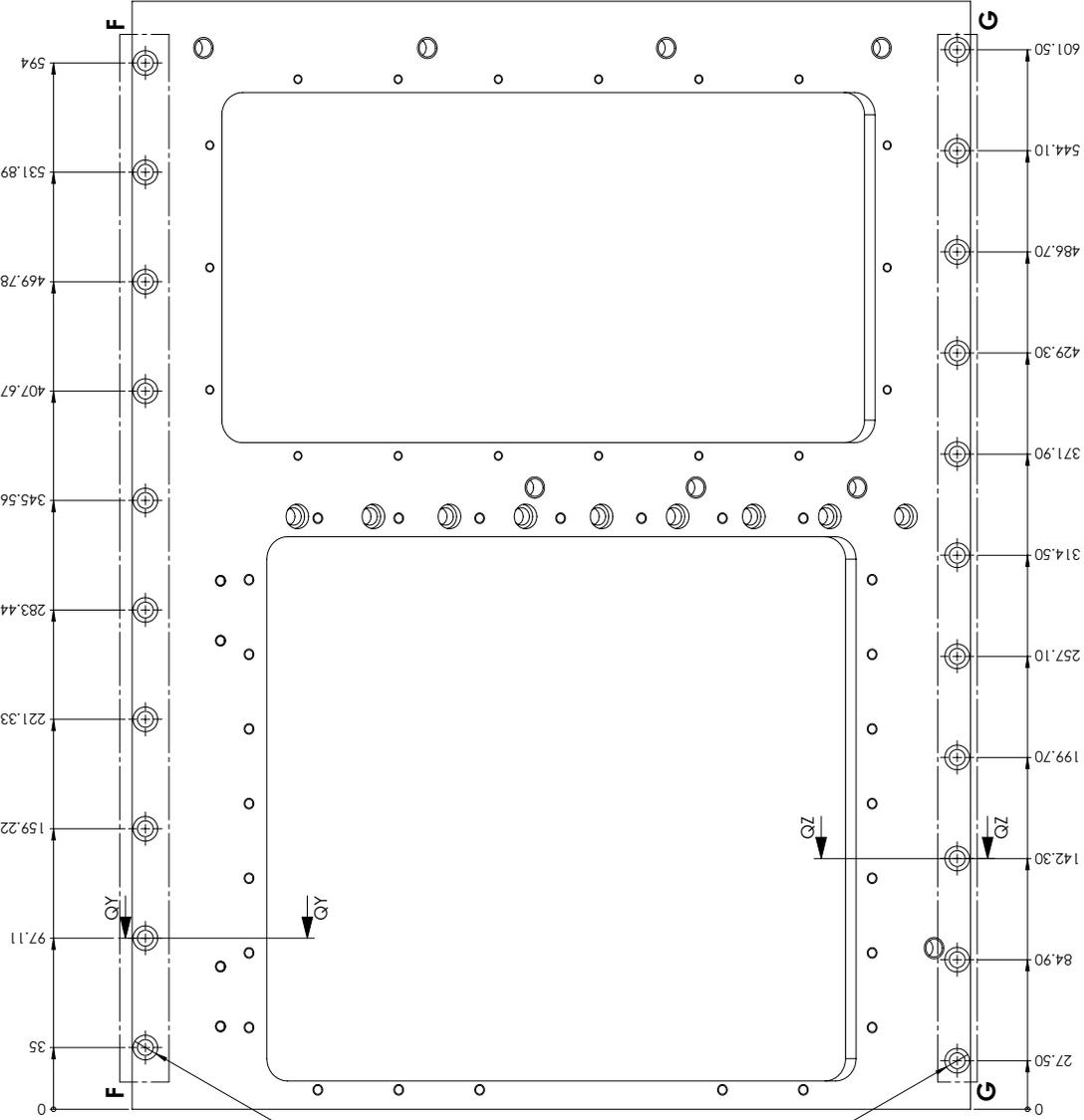


G DETAIL BE
SCALE 4 : 1



SECTION QZ-QZ
SCALE 1 : 2

G 11 X Ø 9 THRU
Ø 14.64 11.83



NOTA: VISTA NORMAL A ARREGLOS DE BARRENOS F Y G

ESCALA 1:3	TOLERANCIA ± 0.05
MATERIAL: ALUMINIO F500	
DIM: mm	NOM FECHA
DISENADO AFS 01/01/2022	
DIBUJADO JDV 01/01/2023	
AUTORIZADO AFS 19/01/2023	
APROBADO RL 25/01/2023	
FABRICACIÓN JR 01/02/2023	
COMENTARIOS:	



TMP
INSTRUMENTACIÓN - CU

DD-ME-SST-P7

NOMBRE:

PROY: A2 (dele Proy: AW)

DDRAGO/Cagire

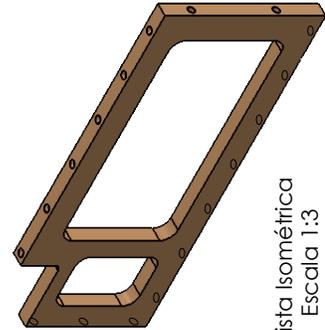
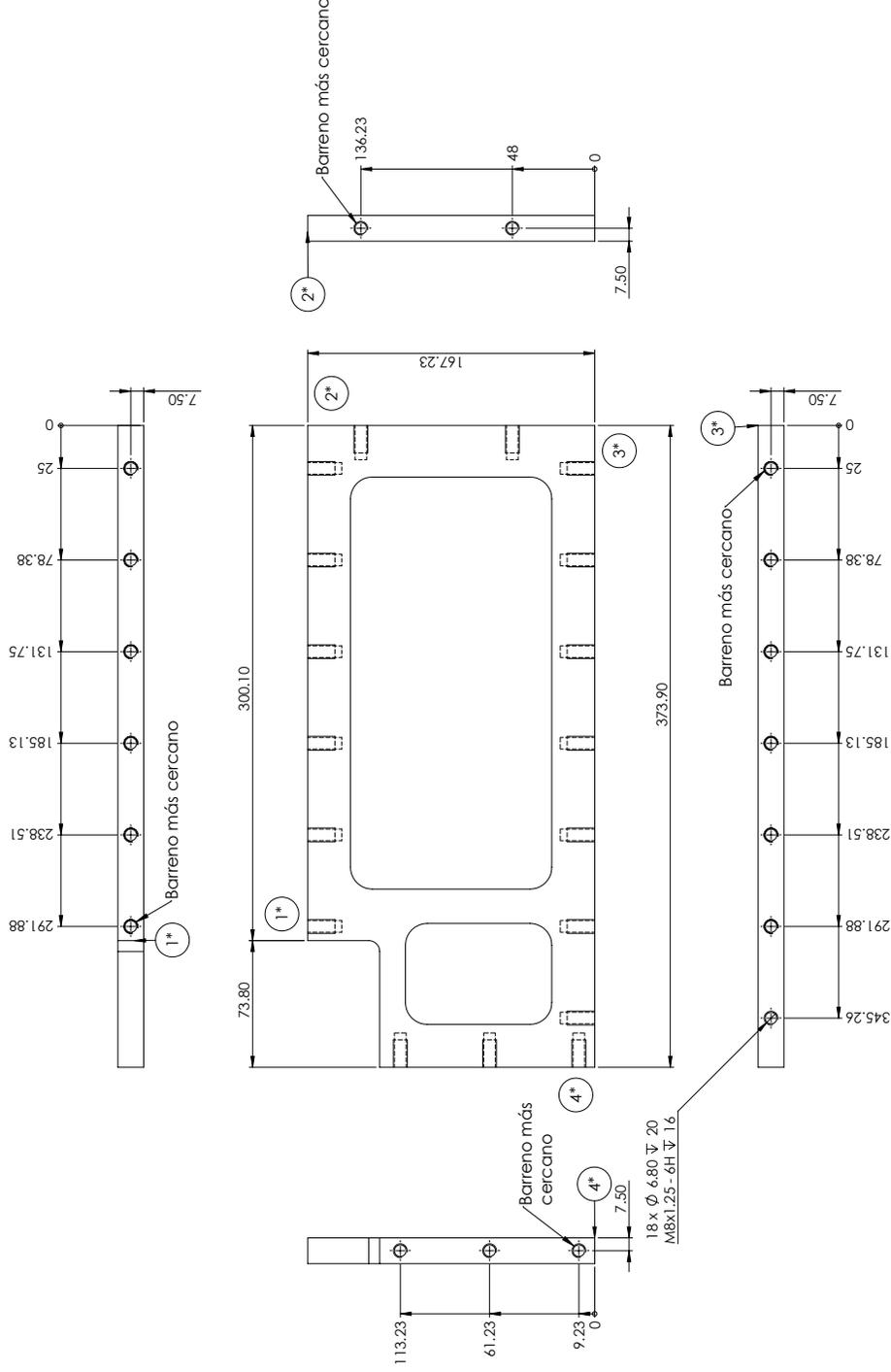
CANT: 1

CÓDIGO: DD-CG-MESS

HOJA 2 31 EDICIÓN: 1 V. 0

Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-unam.

Arreglo de Regletas	
#	Código
	Placa Adyacente
1*	P88-1 DD-ME-SST-P2
2*	P88-2 DD-ME-SST-P19
3*	P88-3 DD-ME-SST-P4
4*	P88-4 DD-ME-SST-P5B



Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-unam.



TMP
INSTRUMENTACIÓN - CU

DD-ME-SST-P8B

CANT: 1



NOMBRE:

DD-ME-SST-P8B

CANT: 1

ESCALA
1:2

TOLERANCIA
± 0.05

PROY:
A2

MATERIAL: Aluminio F500

DIM: mm

COMENTARIOS:

DISEÑO: AFS 01/01/2022

DIBUJADO: JDV 01/01/2023

HOJA 2 | 31

AUTORIZADO: AFS 19/01/2023

APROBADO: RL 25/01/2023

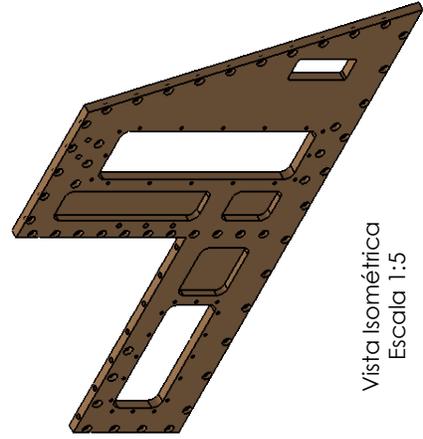
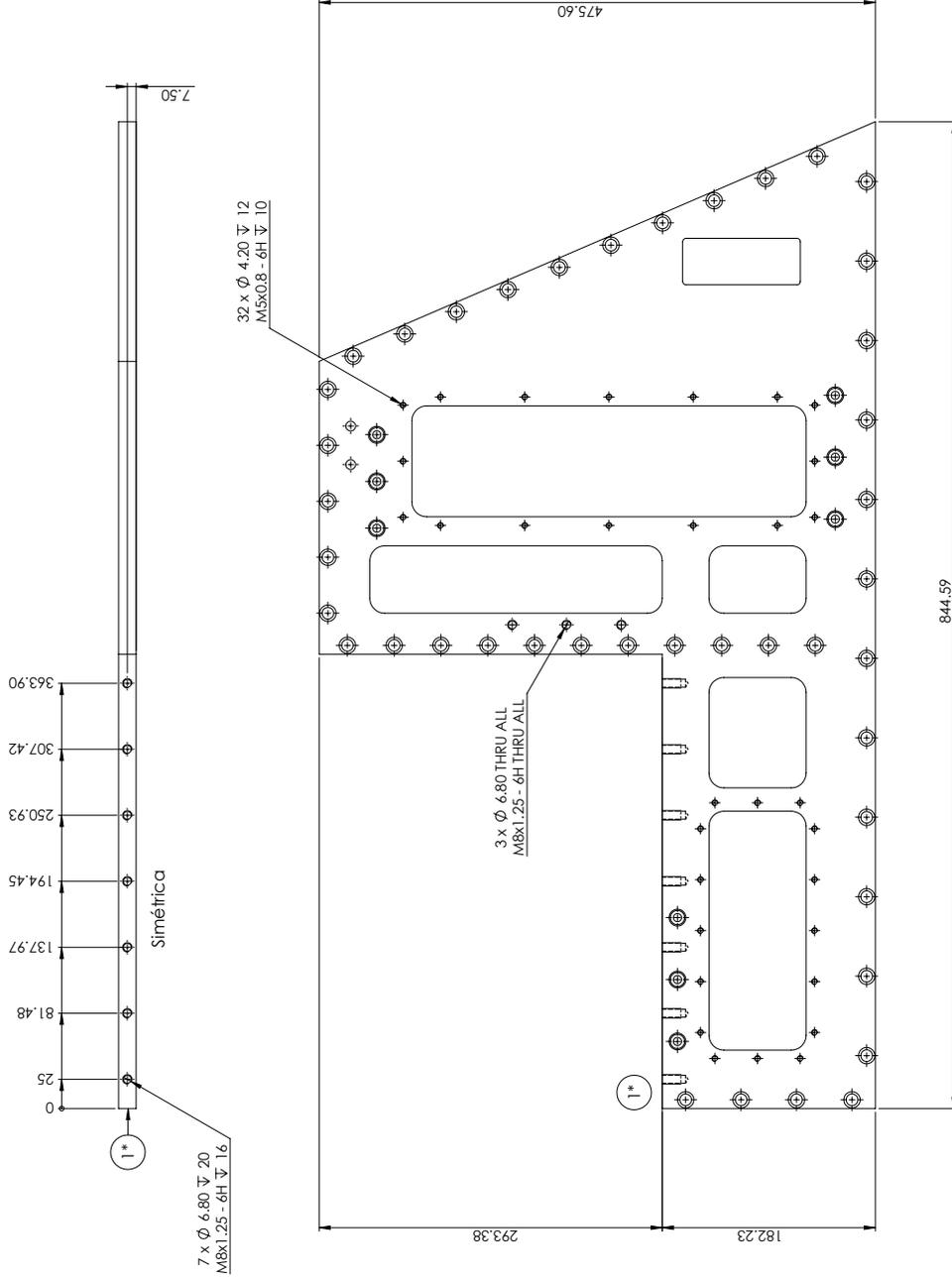
EDICIÓN: 1

FABRICACIÓN: JR 01/02/2023

CÓDIGO: DD-Cg-MESS

V. 0

Arreglo de Regletas	
#	Código
1*	P10-1
Placa Adyacente	
DD-ME-SST-P4	



Vista Isométrica
Escala 1:5

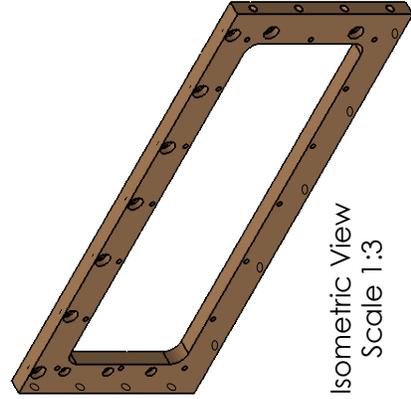
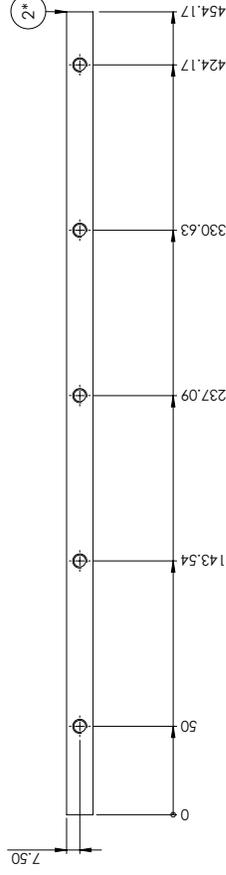
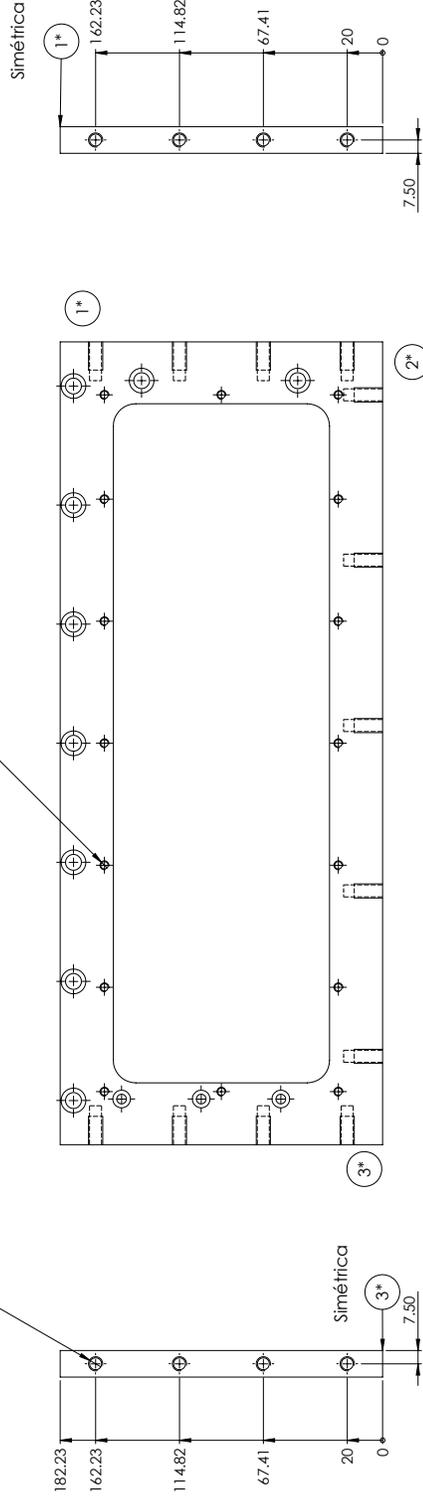
Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-unam.

			
TMP INSTRUMENTACIÓN - CU		DD-ME-SST-P10	
ESCALA 1:3		TOLERANCIA ± 0.05	
MATERIAL: Aluminio F500		FECHA	
DIM: mm		NOM	
DISEÑADO AFS		01/01/2022	
DIBUJADO JDV		01/01/2023	
AUTORIZADO AFS		19/01/2023	
APROBADO RL		25/01/2023	
FABRICACIÓN JR		01/02/2023	
COMENTARIOS:		NOMBRE:	
		DDRAGO/Cagire	
		PROY: A2	
		CANT: 1	
		<small>(dele Proy: AW)</small>	
		CÓDIGO: DD-Cg-MESS	
		HOJA 2	
		EDICIÓN: 1	
		V. 0	

Arreglo de Regletas	
#	Código
1*	Placa Adyacente
2*	DD-ME-SST-P20
3*	DD-ME-SST-P4
	DD-ME-SST-P10

13 x Ø 6.80 ∇ 22
M8x1.25 - 6H ∇ 16

16 x Ø 4.20 ∇ 12
M5x0.8 - 6H ∇ 10



Isometric View
Scale 1:3

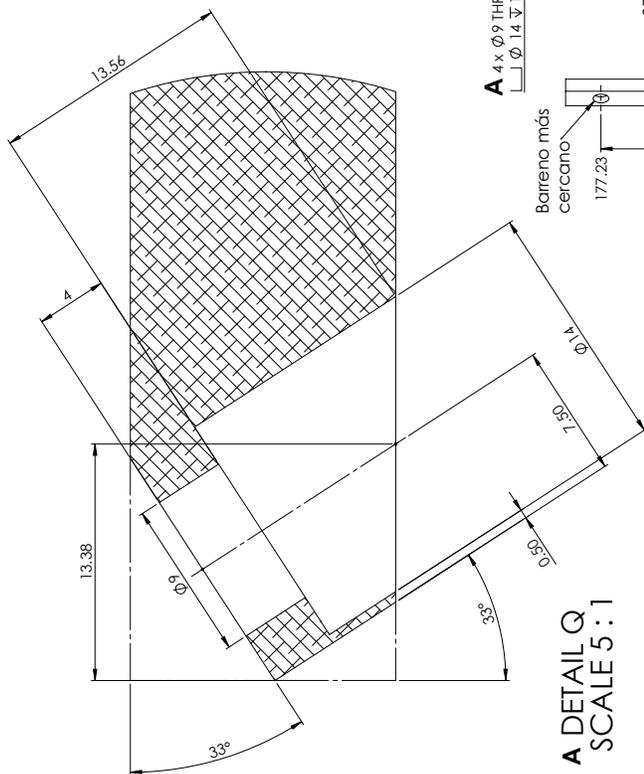
				TMP INSTRUMENTACIÓN - CU	
ESCALA 1:2		TOLERANCIA ± 0.05		NOMBRE: DD-ME-SST-P19	
MATERIAL: Aluminio F500		DIM: mm		FECHA	
DISEÑO: AFS		NOM:		FECHA: 01/01/2022	
DIBUJADO: JDV		NO:		FECHA: 01/01/2023	
AUTORIZADO: AFS		NO:		FECHA: 19/01/2023	
APROBADO: RL		NO:		FECHA: 25/01/2023	
FABRICACIÓN: JR		NO:		FECHA: 01/02/2023	
COMENTARIOS:					
PROY: A2		CANT: 1		HOJA: 2	
CÓDIGO: DD-Cg-MESS		EDICIÓN: 1		V: 0	

Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-unam.

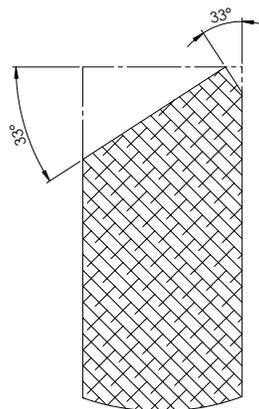
Arreglo de Regletas	
#	Código
1*	P20-1
Placa Adyacente	
DD-ME-SST-P19	



SECTION SR-SR
SCALE 1:2



A DETAIL Q
SCALE 5:1



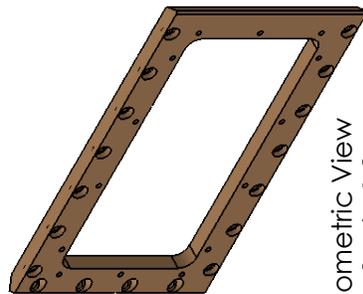
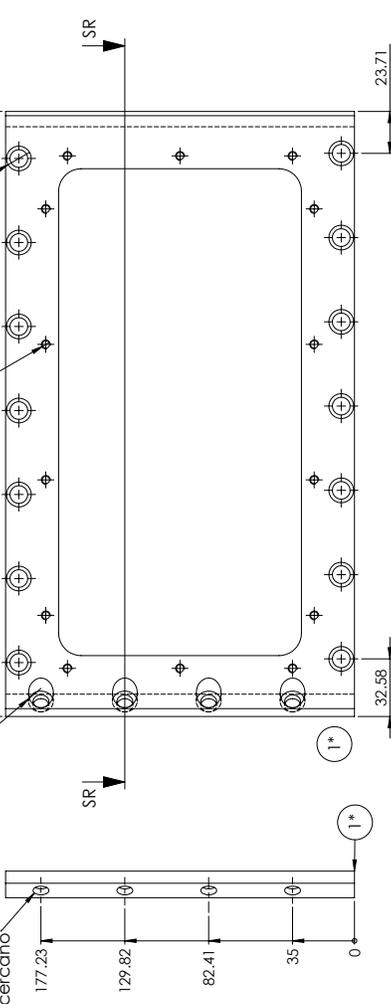
DETAIL P
SCALE 3:1

FALTAN CAJAS, REVISAR LADO DE INICIO
14 x Ø 10 THRU ALL
M5X0.8 - 6H 14 6

14 x Ø 4.20 12
M5X0.8 - 6H 14 10

A 4 x Ø 9 THRU
Ø 14 13.56

Barreno más
cercano



Isometric View
Scale 1:3



TMP
INSTRUMENTACIÓN - CU

DD-ME-SST-P20

CANT: 1

PROY: DDRAGO/Cagire

A2

(dele Proy: AW)



CÓDIGO: DD-Cg-MESS

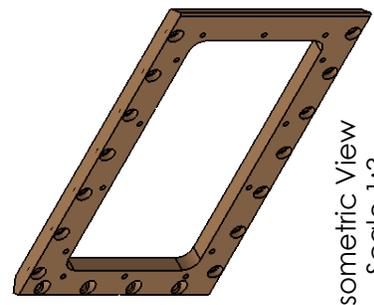
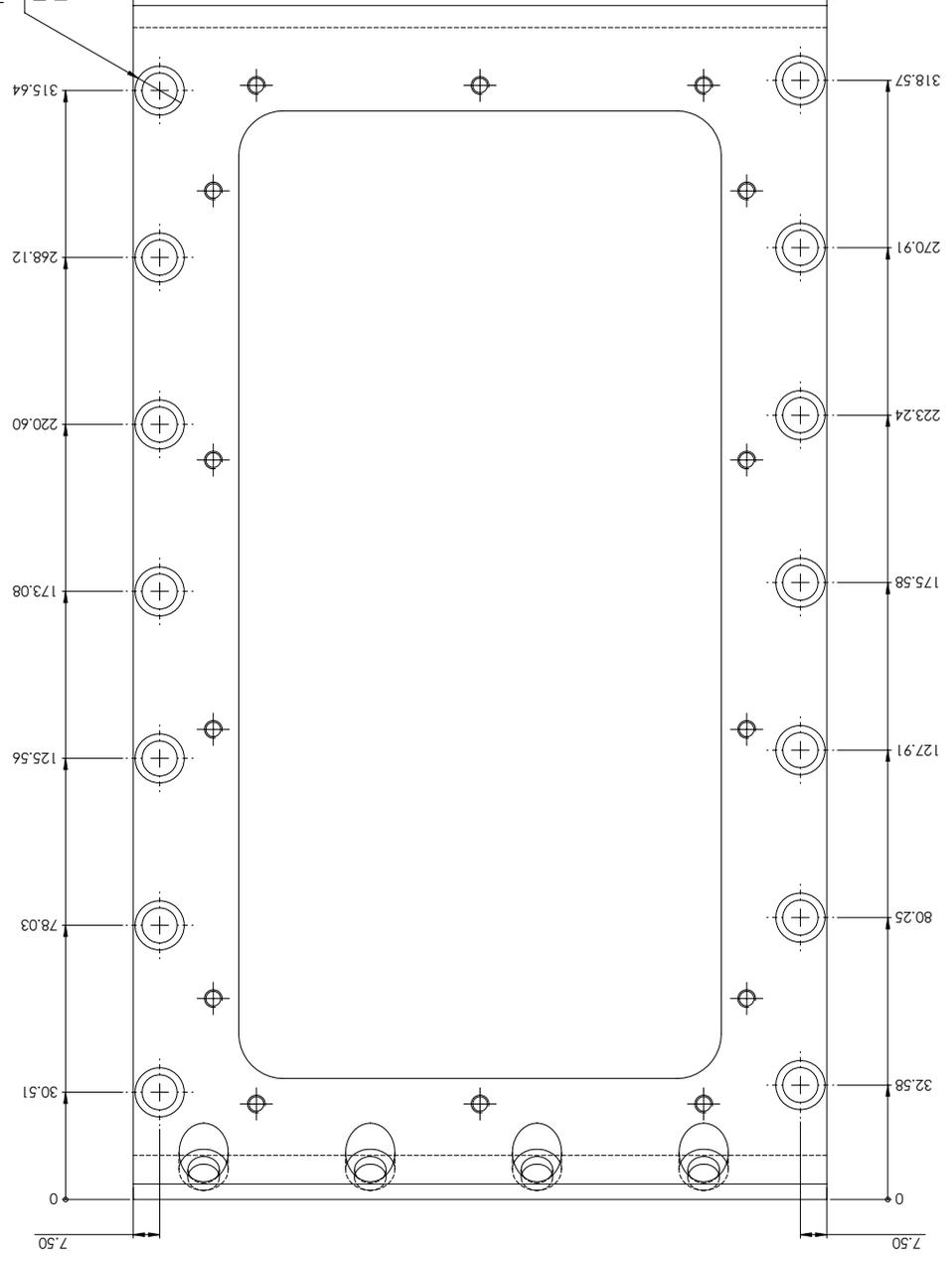
HOJA 2 31 EDICIÓN: 1 V. 0

ESCALA	TOLERANCIA	
1:2	± 0.05	
MATERIAL:	Aluminio F500	
DIM: mm	NOM	FECHA
DISEÑADO	AFS	01/01/2022
DIBUJADO	JDV	01/01/2023
AUTORIZADO	AFS	19/01/2023
APROBADO	RL	25/01/2023
FABRICACIÓN	JR	01/02/2023
COMENTARIOS:		

NOMBRE:

Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-unam.

14 x Ø 10 THRU ALL
 FALTAN CAJAS,
 REVISAR LADO DE INICIO

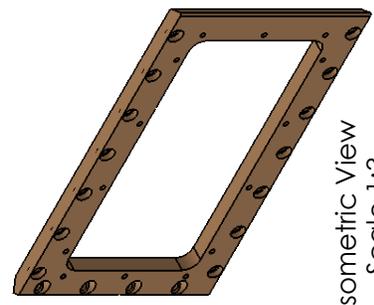
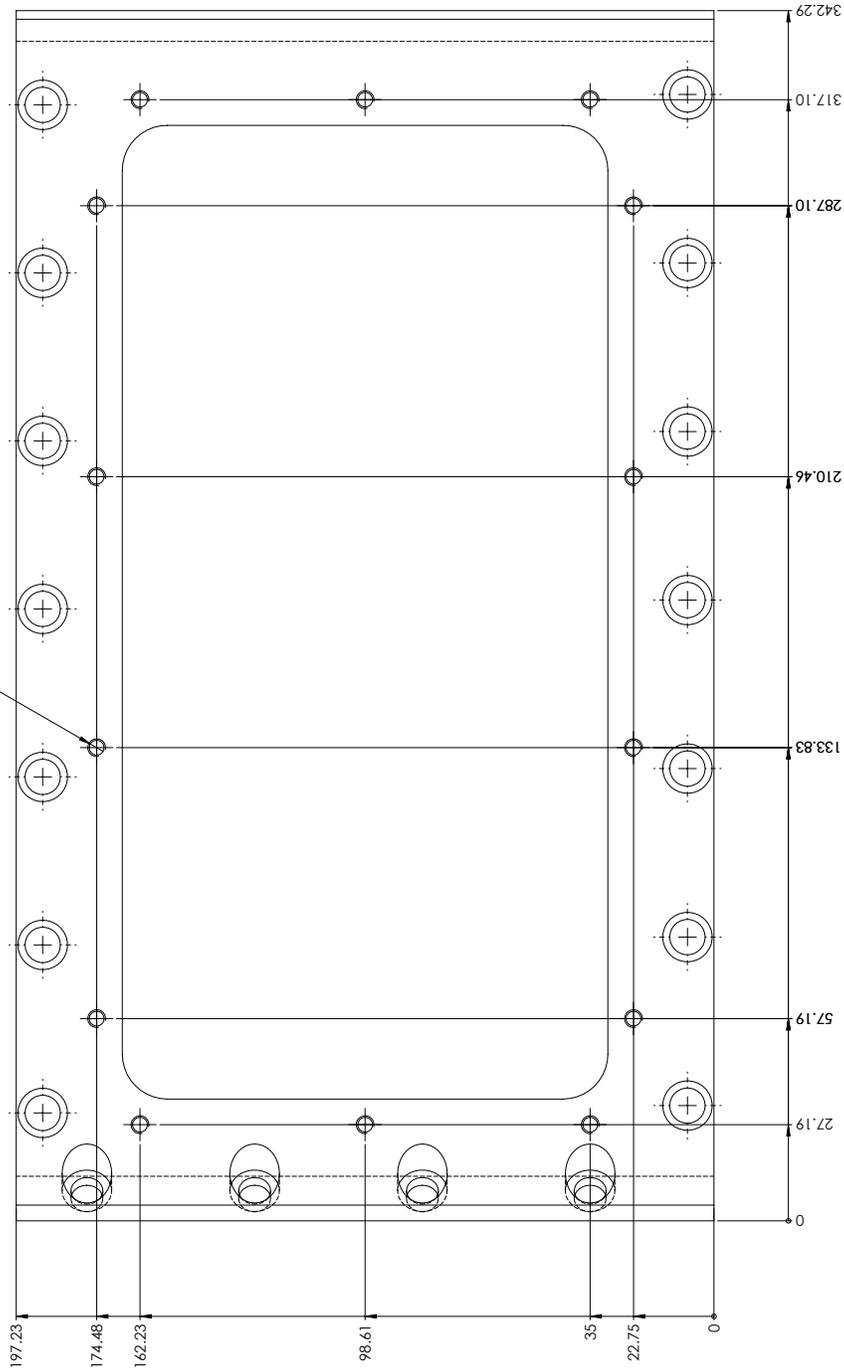


Isometric View
 Scale 1:3

Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-unam.

TMP INSTRUMENTACIÓN - CU		DD-ME-SST-P20	
ESCALA 1:1 TOLERANCIA ± 0.05 MATERIAL: Aluminio F500		NOMBRE: DDRAGO/Cagire	
DIM: mm NOM: AFS DISEÑADO: AFS DIBUJADO: JDV AUTORIZADO: AFS APROBADO: RL		FECHA: 01/01/2022 01/01/2023 19/01/2023 25/01/2023	
FABRICACIÓN: JR COMENTARIOS:		CANT: 1	
PROY: A2		(dele Proy: AW)	
CÓDIGO: DD-Cg-MESS		HOJA 2 31 EDICIÓN: 1 V. 0	

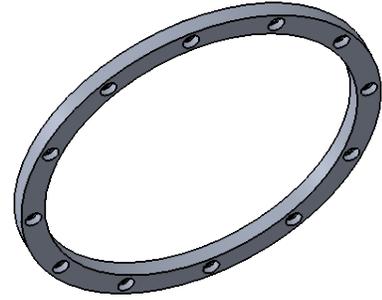
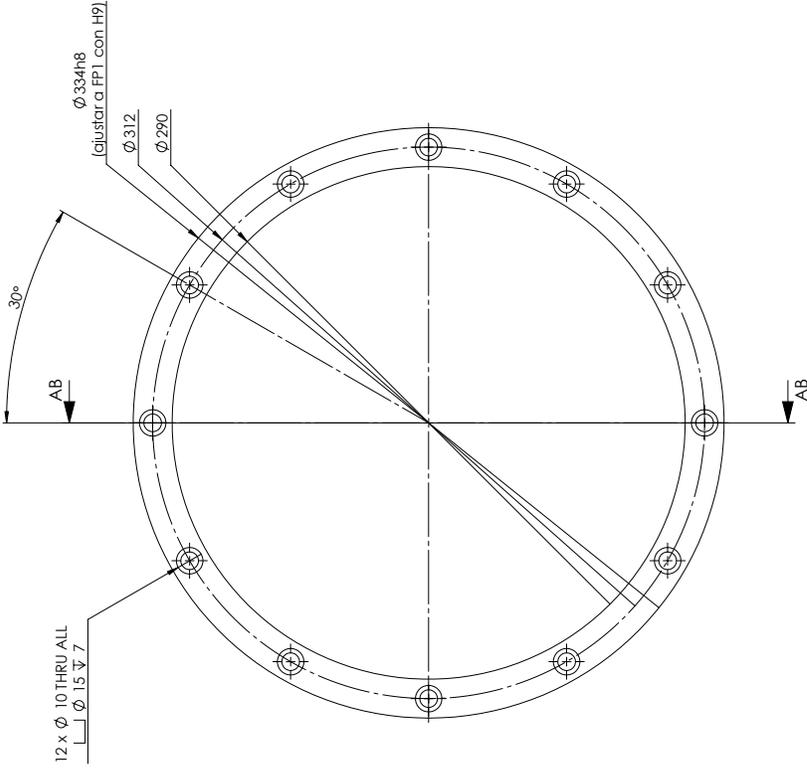
14 x Ø 4.20 ∇ 12
M5x0.8 - 6H ∇ 10



Isometric View
Scale 1:3

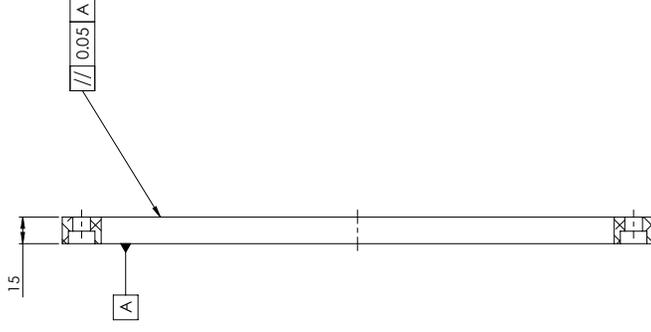
Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-unam.

		TMP INSTRUMENTACIÓN - CU			
DD-ME-SST-P20		NOMBRE:		CANT: 1	
ESCALA 1:1		TOLERANCIA ± 0.05		PROY: A2	
MATERIAL: Aluminio F500		DISEÑO: AFS 01/01/2022		HOJA 2	
DIM: mm		NOM:		EDICIÓN: 1	
DISEÑO: AFS 01/01/2022		FECHA:		V: 0	
DIBUJADO: JDV 01/01/2023		DISEÑO: AFS 01/01/2022		CÓDIGO: DD-CG-MESS	
AUTORIZADO: AFS 19/01/2023		DISEÑO: AFS 01/01/2022		DDRAGO/Cagire	
APROBADO: RL 25/01/2023		DISEÑO: AFS 01/01/2022		PROY: A2	
FABRICACIÓN: JR 01/02/2023		DISEÑO: AFS 01/01/2022		COMENTARIOS:	



Isometric View
Scale 1:3

SECTION AB-AB
SCALE 1:2



ESCALA 1:2	TOLERANCIA ± 0.05	
MATERIAL: Aluminio F500		
DIM: mm	NOM	FECHA
DISEÑADO AFS	01/01/2022	
DIBUJADO JDV	01/01/2023	
AUTORIZADO AFS	19/01/2023	
APROBADO RL	25/01/2023	
FABRICACIÓN JR	01/02/2023	
COMENTARIOS:		



TMP
INSTRUMENTACIÓN - CU

DD-ME-SST-CTR

NOMBRE:

CANT: 1

PROY: A2

DDRAGO/Cagire

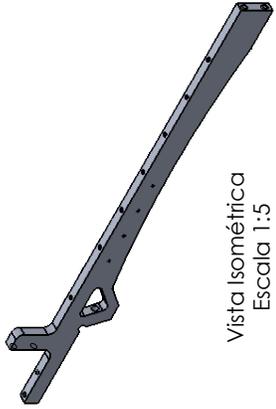
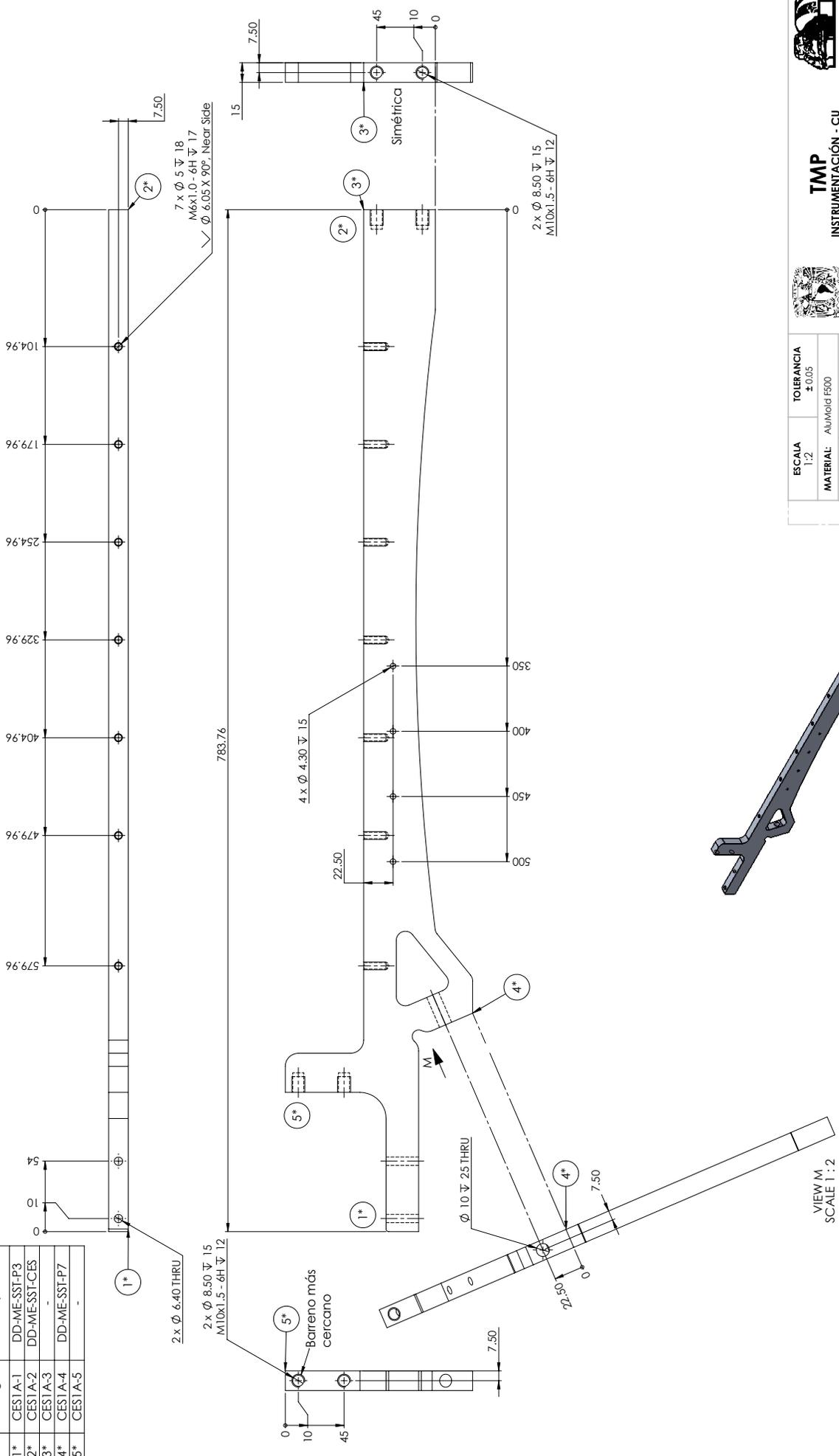
(dele Proy: AW)

CÓDIGO: DD-Cg-MESS

HOJA 2 31 EDICIÓN: 1 V. 0

Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-unam.

Arreglo de Regletas	
#	Código Placa Adyacente
1*	CEST A-1 DD-ME-SST-P3
2*	CEST A-2 DD-ME-SST-CES
3*	CEST A-3 -
4*	CEST A-4 DD-ME-SST-P7
5*	CEST A-5 -



Vista Isométrica
Escala 1:5

			
INSTRUMENTACIÓN - CU		INSTRUMENTACIÓN - CU	
			
TOLERANCIA ± 0.05		NOMBRE: DD-ME-SST-CES1A	
ESCALA 1:2	MATERIAL: Aluminio F500	PROY: A2	CANT: 1
DIM: mm	NOM	FECHA	
DISEÑADO AFS	01/01/2022		
DIBUJADO JDV	01/01/2023		
AUTORIZADO AFS	19/01/2023		
APROBADO RL	25/01/2023		
FABRICACIÓN JR	01/02/2023		
COMENTARIOS:			
CÓDIGO: DD-Cp-MESS			
[dele Proy: Aw]			
HOJA 2	31	EDICIÓN: 1	V. 0

Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-unam.

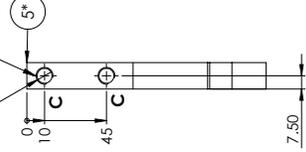
Arreglo de Regletas	
#	Código
1*	CES1B-1
2*	CES1B-2
3*	CES1B-3
4*	CES1B-4
5*	CES1B-5

Placa Adyacente
DD-ME-SST-P3
DD-ME-SST-CES
DD-ME-SST-P7

SECTION AD-AD

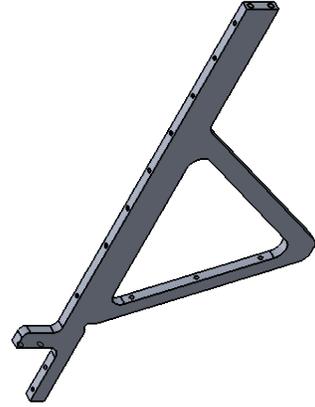
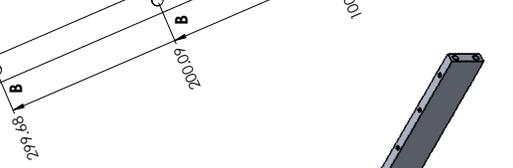
C 4 x ϕ 8.50 ∇ 16.50
M10x1.5 - 6H ∇ 12

Barreno más cercano



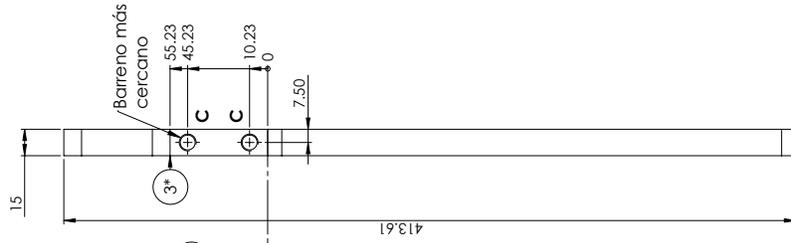
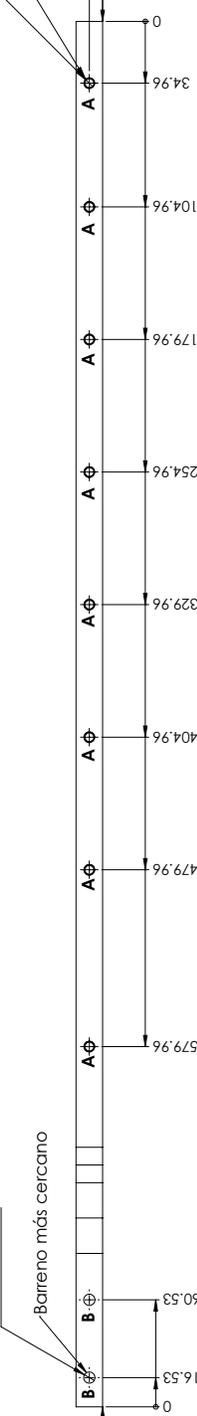
SECTION AN-AN

Barreno más cercano



Isometric View
Scale 1:5

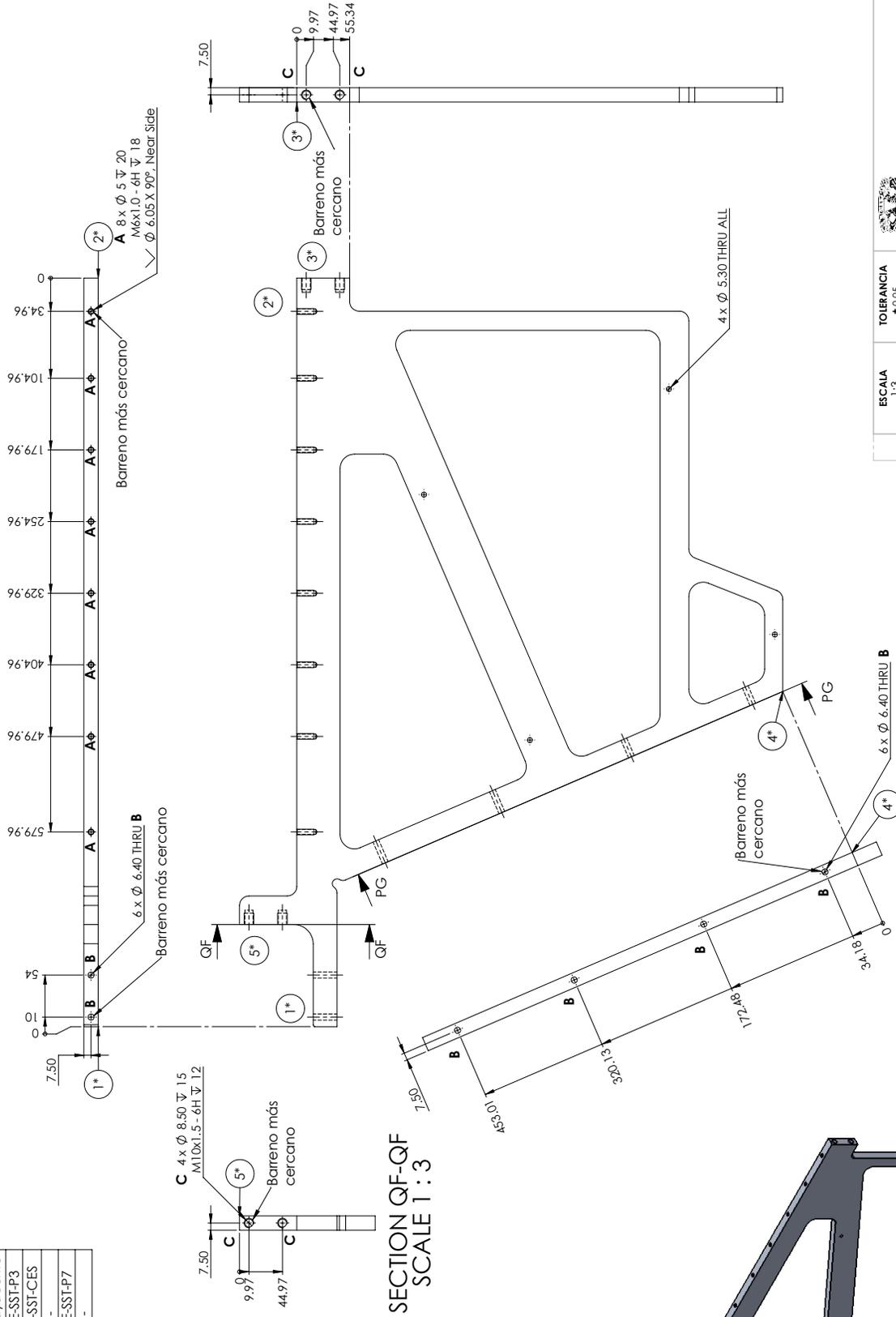
A 8 x ϕ 5 ∇ 21
M6x1.0 - 6H ∇ 18
 ϕ 6.05 X 90°, Near Side



			
TMP INSTRUMENTACIÓN - CU		DD-ME-SST-CES1B	
ESCALA 1:2		TOLERANCIA \pm 0.05	
MATERIAL: Aluminio F500		DIM: mm	
DISEÑO: AFS 01/01/2022		FECHA	
DIBUJADO: JDV 01/01/2023		DISEÑO: AFS 01/01/2022	
AUTORIZADO: AFS 19/01/2023		DIBUJADO: JDV 01/01/2023	
AFROBADO: RL 25/01/2023		AUTORIZADO: AFS 19/01/2023	
FABRICACIÓN: JR 01/02/2023		AFROBADO: RL 25/01/2023	
COMENTARIOS:		NOMBRE:	
PROY: A2		CANT: 1	
CÓDIGO: DD-Cg-MESS		PROY: DDRAGO/Cagire	
(dele Proy: AW)		HOJA: 2 / 31	
		EDICIÓN: 1	
EDICIÓN: 1		V: 0	

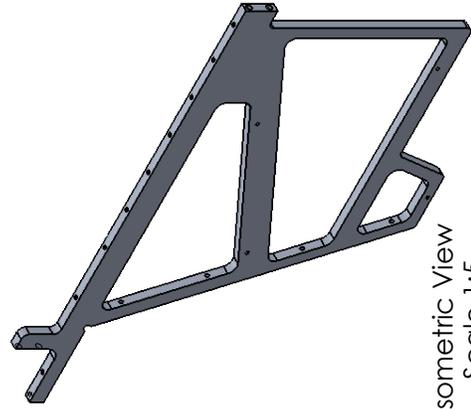
Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-unam.

Arreglo de Regletas	
#	Código
1*	Placa Adyacente
2*	CESTIC-1 DD-ME-SST-P3
3*	CESTIC-2 DD-ME-SST-CES
4*	CESTIC-3
5*	CESTIC-4 DD-ME-SST-P7
	CESTIC-5



SECTION QF-QF
SCALE 1:3

SECTION PG-PG



Isometric View
Scale 1:5



TMP
INSTRUMENTACIÓN - CU

DD-ME-SST-CES1C

DDRAGO/Cagire

CANT: 1

HOJA 3 31 EDICIÓN: 1 V. 0

ESCALA	TOLERANCIA
1:3	± 0.05

MATERIAL	DIM:	NOM	FECHA
Aluminio F500			
DESIGNADO	AFS	01/01/2022	
DIBUJADO	JDV	01/01/2023	
AUTORIZADO	AFS	19/01/2023	
APROBADO	RL	25/01/2023	
FABRICACIÓN	JR	01/02/2023	

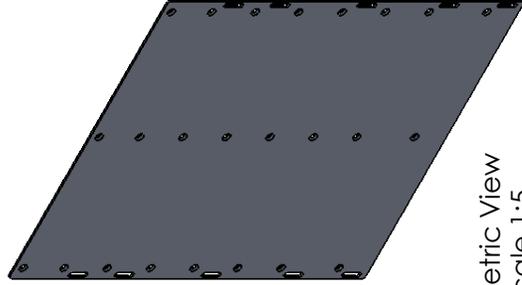
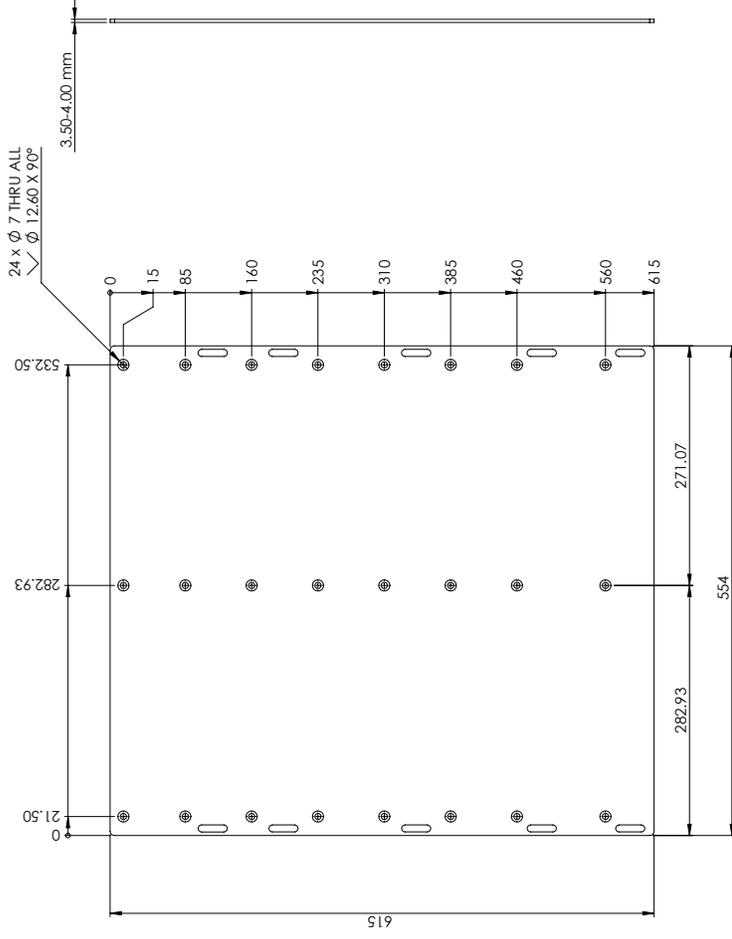
NOMBRE: DD-ME-SST-CES1C

PROY: A2 (dele Proy: AW)

CÓDIGO: DD-Cg-MESS

COMENTARIOS:

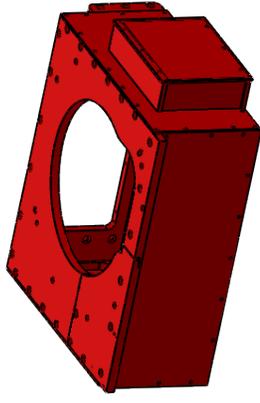
Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-unam.



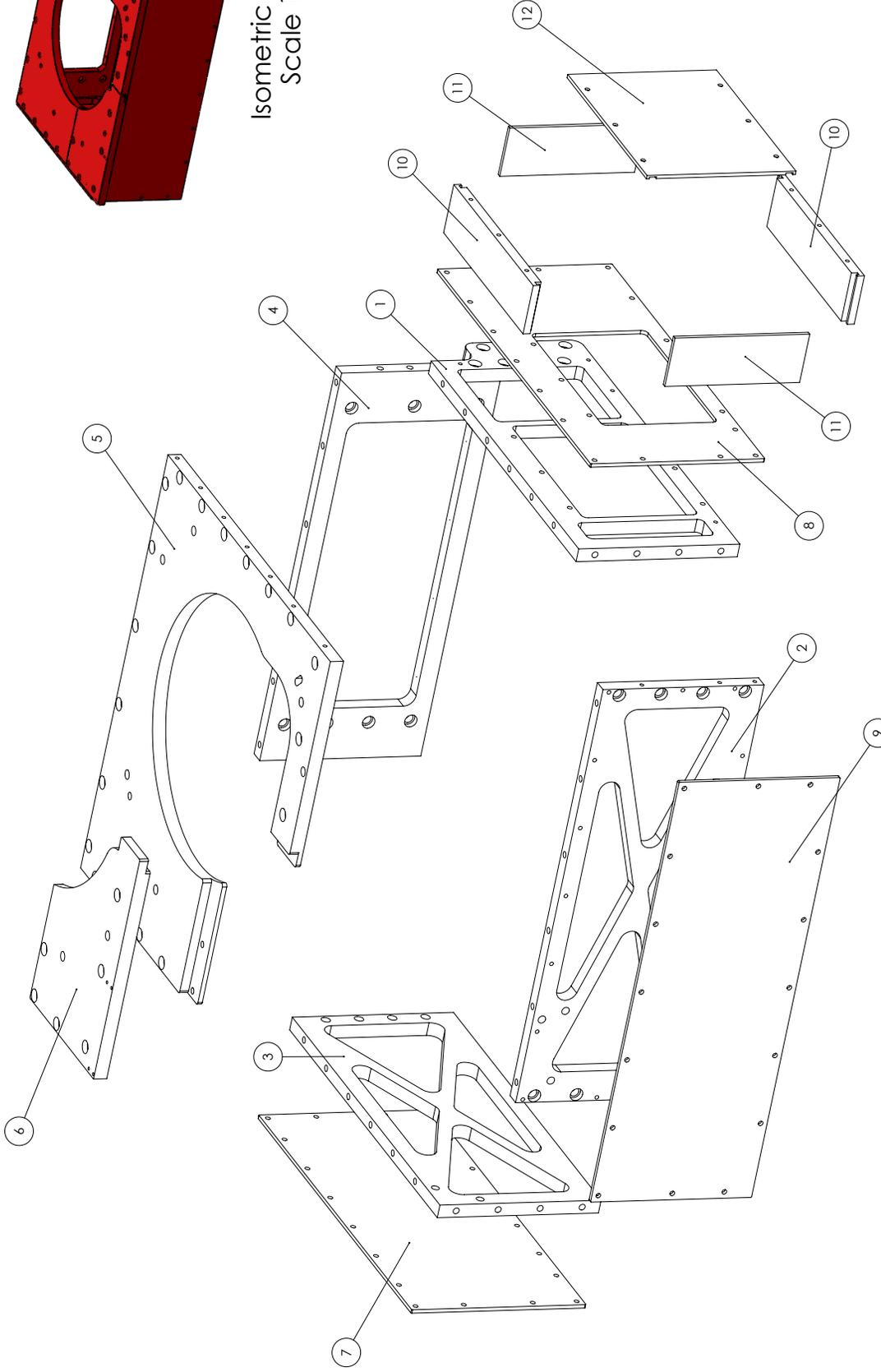
Isometric View
Scale 1:5

Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-unam.

			
TMP INSTRUMENTACIÓN - CU		DD-ME-SST- CloseElectronicsPlate	
ESCALA 1:4		TOLERANCIA ± 0.05	
MATERIAL: Aluminio F500		PROY: DDRAGO/Cagire	
DIM: mm		CANT: 1	
DISEÑO: AFS 01/01/2022		NOMBRE:	
DIBUJADO: JDV 01/01/2023		(dele Proy: AW)	
AUTORIZADO: AFS 19/01/2023		CÓDIGO: DD-Cp-MESS	
APROBADO: RL 25/01/2023		HOJA 3 31 EDICIÓN: 1 V. 0	
FABRICACIÓN: JR 01/02/2023		COMENTARIOS:	



Isometric View
Scale 1:6



TMP
INSTRUMENTACIÓN - CU

NOMBRE:
DD-ME-SST-CYS Exploded
View

CANT: 00

PROY: DDRAGO/Cagire

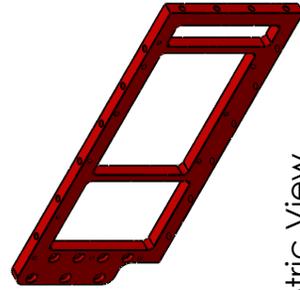
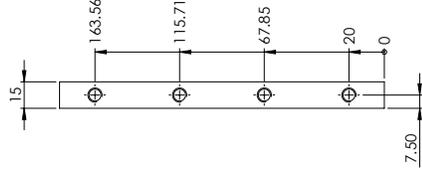
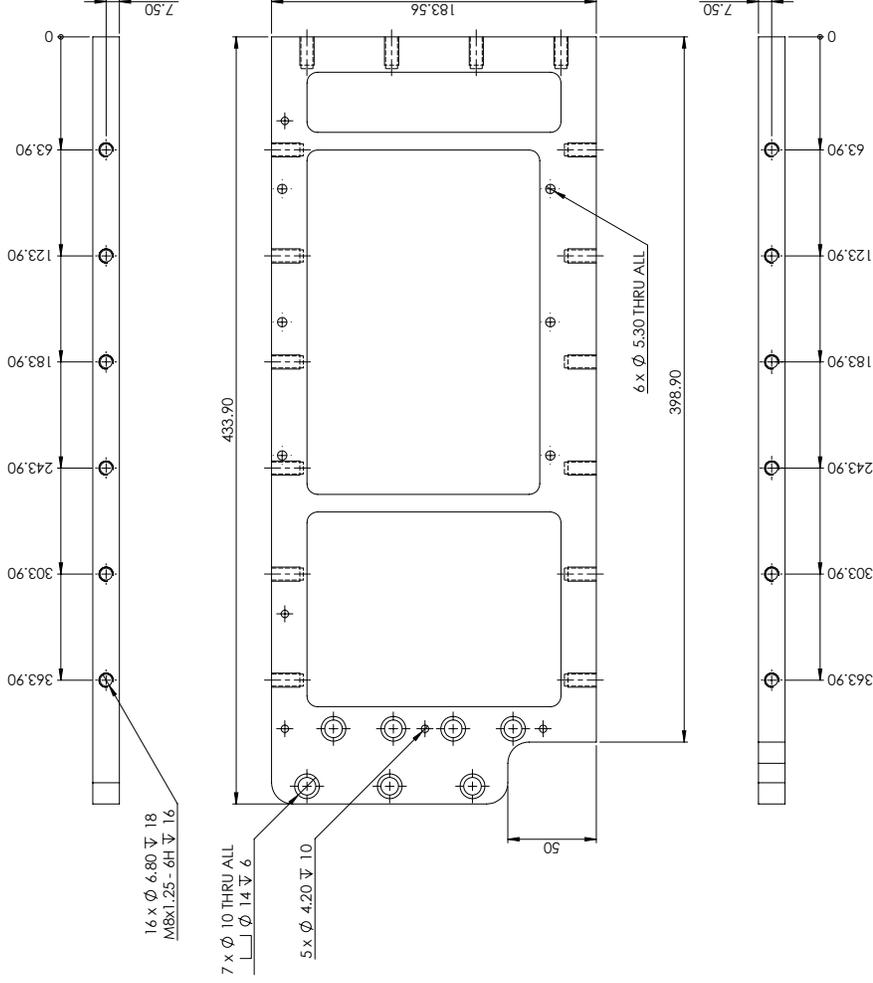
A2 [dele Proy. AW]

CÓDIGO: DD-Cg-MESSC

HOJA 1 14 EDICIÓN: 1 V. 0

ESCALA 1:3	TOLERANCIA ± 0,050	
MATERIAL: Aluminio F500		
DIM: mm	NOM	FECHA
DISENADO	AFS	01/01/2022
DIBUJADO	JDV	01/01/2023
AUTORIZADO	AFS	19/01/2023
APROBADO	RL	25/01/2023
FABRICACIÓN	JR	01/02/2023
COMENTARIOS: XXXX		

# Component	CAD/Drawing Model	Qty	Product Tree - ID	Manufacture by
1	DD-Cg-ME-SSC-P1	1	DD-ME-SST-CYSP1	JobShop-Router CNC
2	DD-Cg-ME-SSC-P2	1	DD-ME-SST-CYSP2	JobShop-Router CNC
3	DD-Cg-ME-SSC-P3	1	DD-ME-SST-CYSP3	JobShop-Router CNC
4	DD-Cg-ME-SSC-P4	1	DD-ME-SST-CYSP4	JobShop-Router CNC
5	DD-Cg-ME-SSC-P5	1	DD-ME-SST-CYSP5	JobShop-Router CNC
6	DD-Cg-ME-SSC-P5b	1	DD-ME-SST-CYSP5b	JobShop-Router CNC
7	DD-Cg-ME-SSC-P6	1	DD-ME-SST-CYSP6	JobShop-Router CNC
8	DD-Cg-ME-SSC-P7	1	DD-ME-SST-CYSP7	JobShop-Router CNC
9	DD-Cg-ME-SSC-P8	1	DD-ME-SST-CYSP8	JobShop-Router CNC
10	DD-Cg-ME-SSC-P9	2	DD-ME-SST-CYSP9	JobShop-Router CNC
11	DD-Cg-ME-SSC-P10	2	DD-ME-SST-CYSP10	JobShop-Router CNC
12	DD-Cg-ME-SSC-P11	1	DD-ME-SST-CYSP11	JobShop-Router CNC



Isometric View
Scale 1:4

Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-unam.



TMP
INSTRUMENTACIÓN - CU



NOMBRE: DD-ME-SST-CYSP1

CANT: 00

PROY: DDRAGO/Cagire

A2

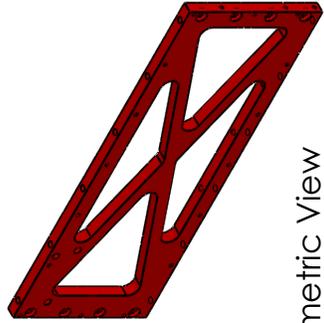
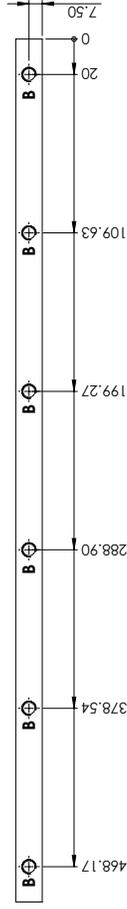
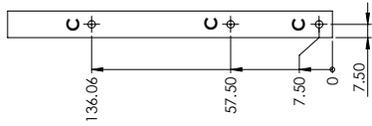
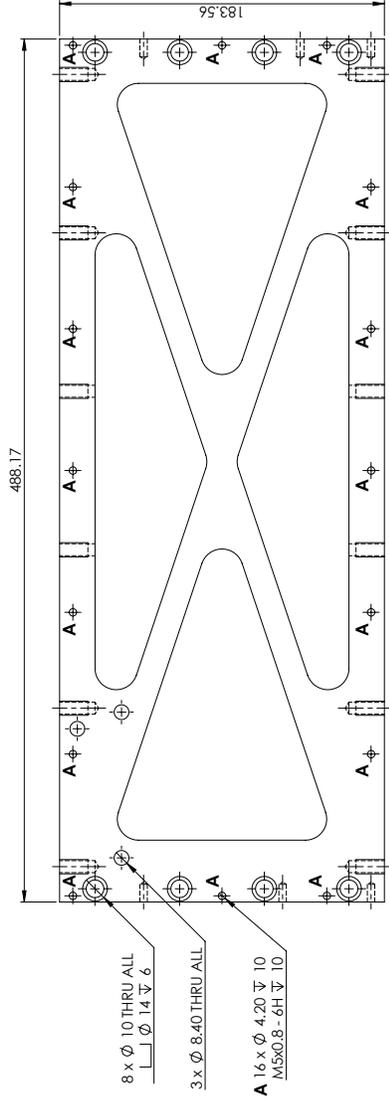
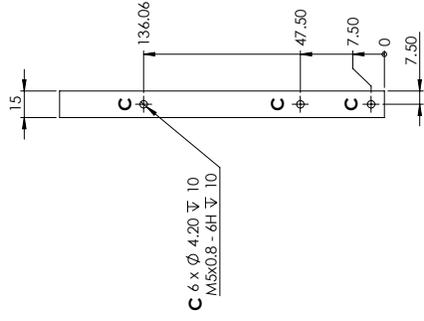
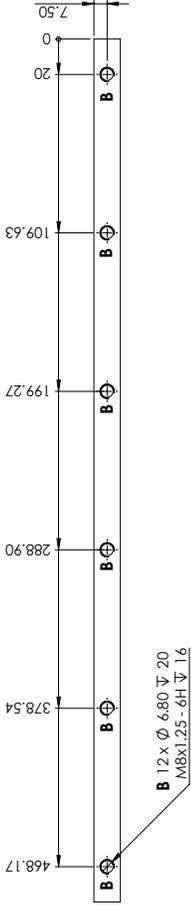
[dele Proy: AW]

CÓDIGO: DD-Cg-MESSC

HOJA 2 14 EDICIÓN: 1

V. 0

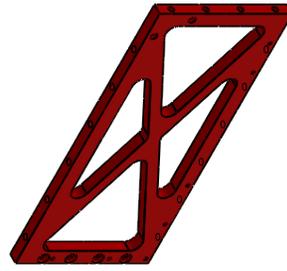
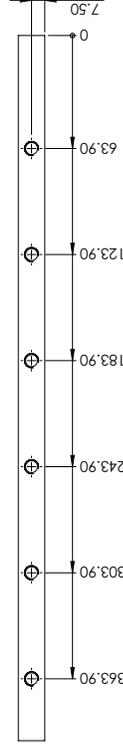
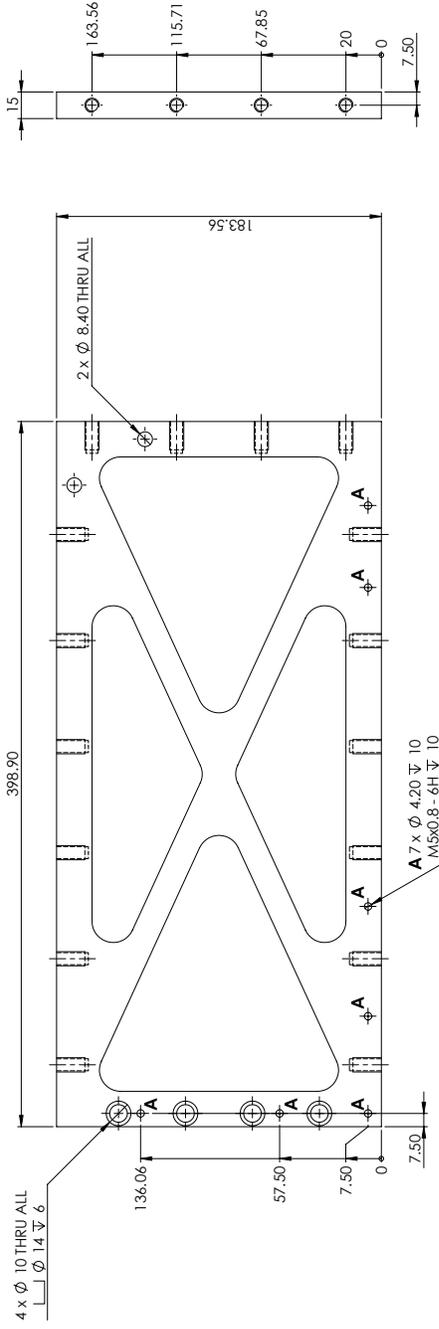
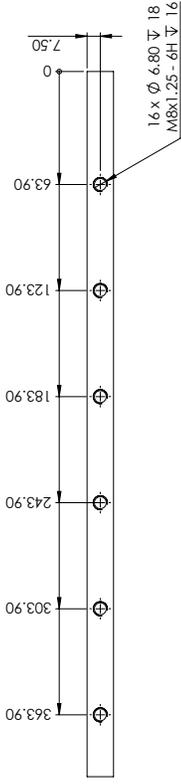
ESCALA 1:2	TOLERANCIA ± 0.050
MATERIAL: Aluminio F500	
DIM: mm	NOM
FECHA	
DISEÑO: AFS 01/01/2022	
DIBUJADO: JDV 01/01/2023	
AUTORIZADO: AFS 19/01/2023	
APROBADO: RL 25/01/2023	
FABRICACIÓN: JR 01/02/2023	
COMENTARIOS: XXXX	



Isometric View
Scale 1:4

Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-unam.

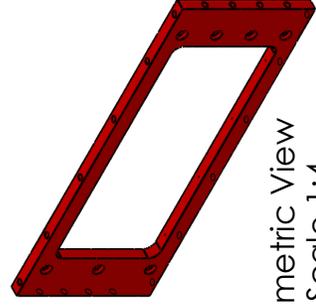
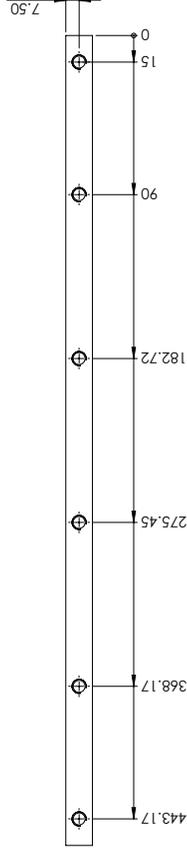
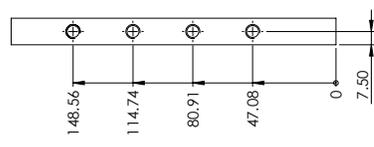
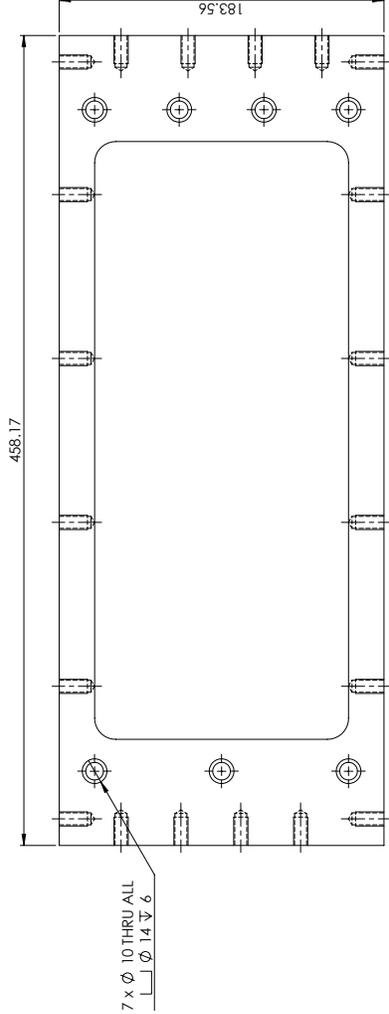
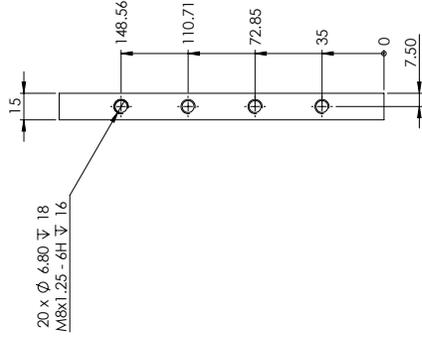
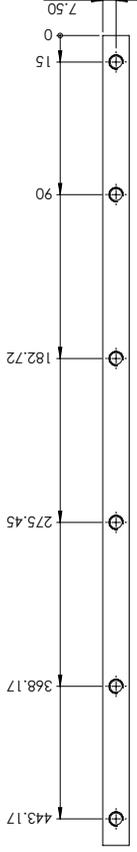
		TMP INSTRUMENTACIÓN - CU			
ESCALA 1:2		TOLERANCIA ± 0.050		NOMBRE: DD-ME-SST-CYSP2	
MATERIAL: Aluminio F500		DIM: mm		PROY: A2	
DISEÑO: AFS		FECHA: 01/01/2022		CANT: 00	
DIBUJADO: JDV		FECHA: 01/01/2023		DDRAGO/Cagire	
AUTORIZADO: AFS		FECHA: 19/01/2023		CÓDIGO: DD-Cg-MESSC	
APROBADO: RL		FECHA: 25/01/2023		HOJA 3	
FABRICACIÓN: JR		FECHA: 01/02/2023		EDICIÓN: 1	
COMENTARIOS: XXXX		PROY: (dele Proy: AW)		V. 0	



Vista Isométrica
Escala 1:4

Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-unam.

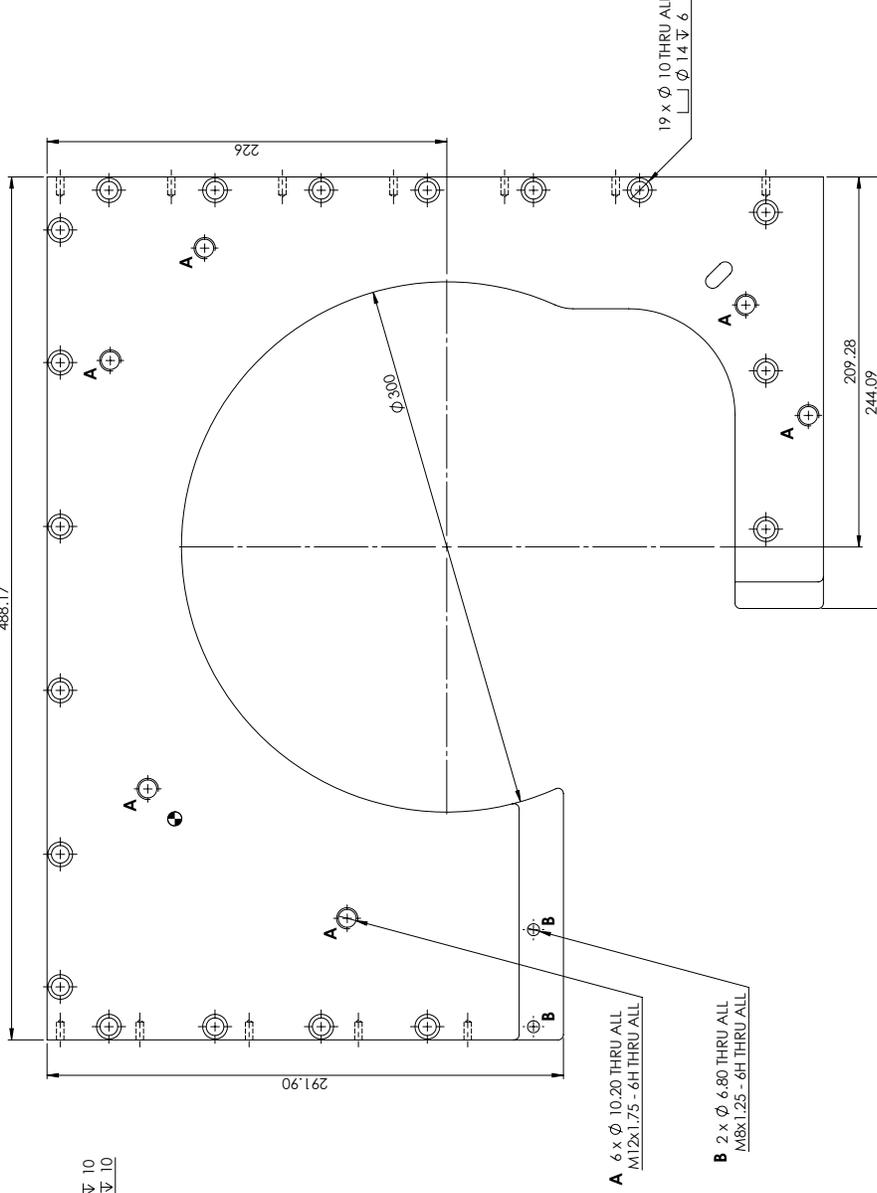
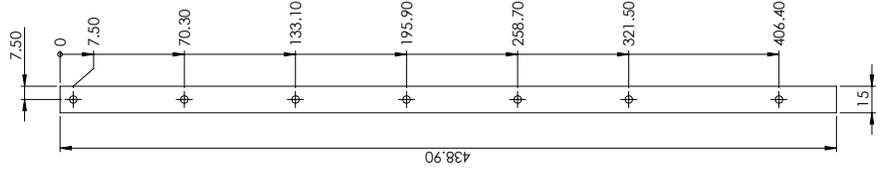
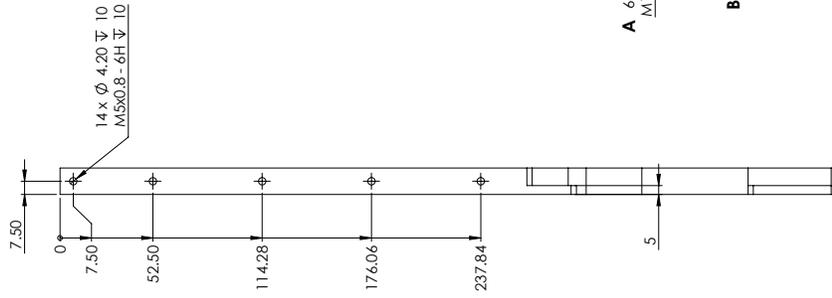
		TMP INSTRUMENTACIÓN - CU			
ESCALA 1:2		TOLERANCIA ± 0.050		COMENTARIOS: XXXX	
MATERIAL: Aluminio F500		DISEÑO: AFS 01/01/2022		PROYECTO: DD-ME-SST-CYSP3	
DIM: mm		NOM: NOM		FECHA: 01/01/2023	
DISEÑADO: AFS		DIBUJADO: JDV		01/01/2023	
AUTORIZADO: AFS		19/01/2023		01/01/2023	
APROBADO: RL		25/01/2023		01/02/2023	
FABRICACIÓN: JR		01/02/2023		CANT: 00	
PROY: A2		DDRAGO/Cagire		HOJA 4	
CÓDIGO: DD-Cg-MESSC		EDICIÓN: 1		V. 0	



Isometric View
Scale 1:4

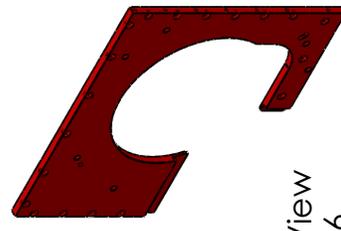
Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-unam.

		TMP INSTRUMENTACIÓN - CU			
ESCALA 1:2		TOLERANCIA ± 0.050		PROY: A2	
MATERIAL: Aluminio F500		DISEÑO: AFS 01/01/2022		COMENTARIOS: XXXX	
DIM: mm		DIBUJADO: JDV 01/01/2023		CANT: 00	
DISEÑO: AFS 01/01/2022		AUTORIZADO: AFS 19/01/2023		NOMBRE: DD-ME-SST-CYSP4	
AUTORIZADO: AFS 19/01/2023		AFROBADO: RL 25/01/2023		HOJA 5 14 EDICIÓN: 1 V. 0	
FABRICACIÓN: JR 01/02/2023		CÓDIGO: DD-Cg-MESSC		DDRAGO/Cagire	



A 6 x Ø 10.20 THRU ALL
M12x1.75 - 6H THRU ALL

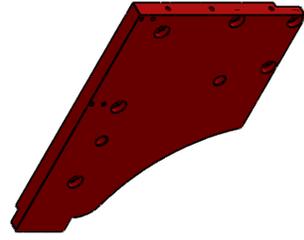
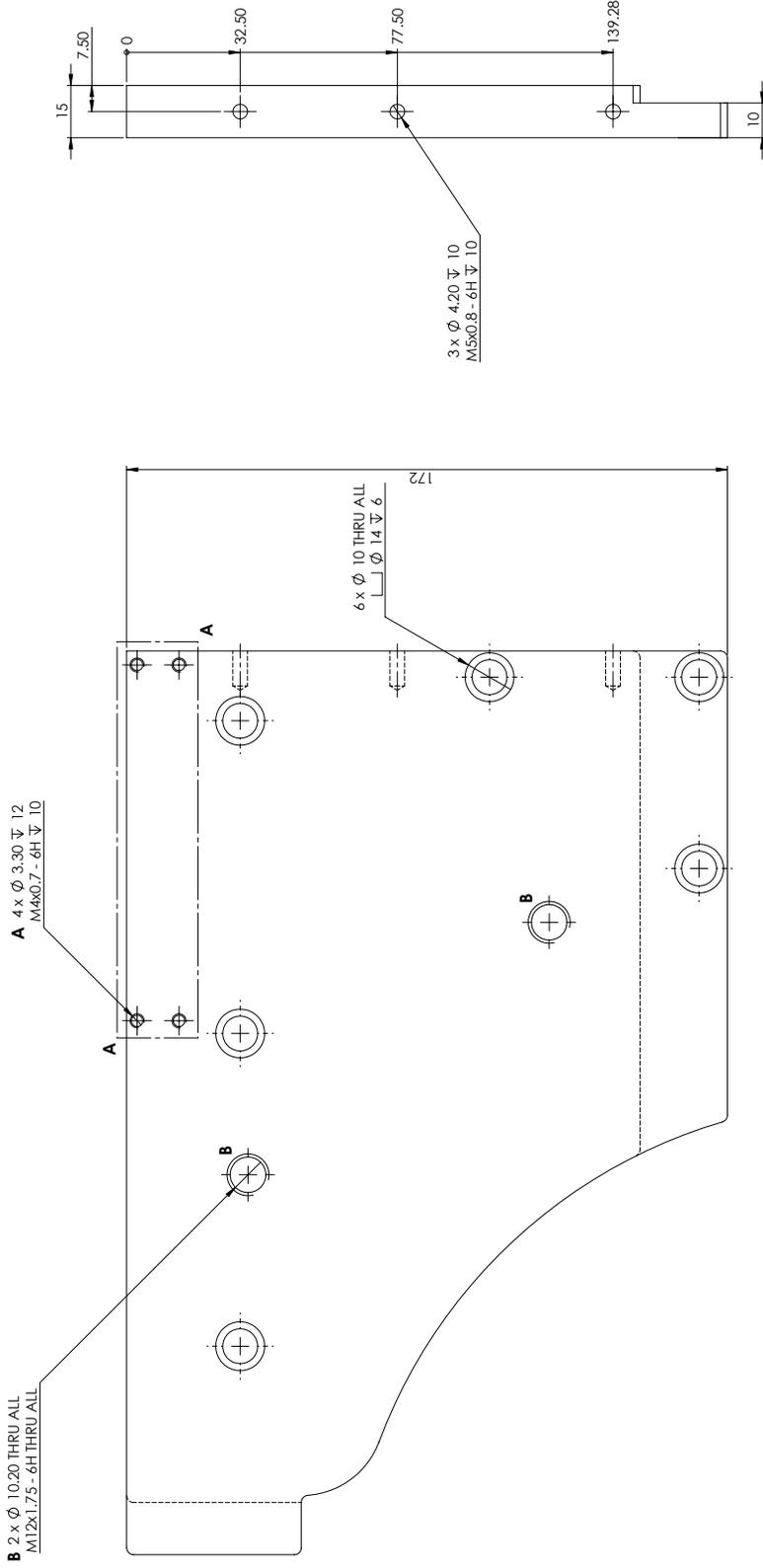
B 2 x Ø 6.80 THRU ALL
M8x1.25 - 6H THRU ALL



Isometric View
Scale 1:6

Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-unam.

		TMP INSTRUMENTACIÓN - CU			
ESCALA 1:2		TOLERANCIA ± 0.050		NOMBRE: DD-ME-SST-CYSP5	
MATERIAL: Aluminio F500		DISEÑO: AFS 01/01/2022		PROY: A2	
DIM: mm		DIBUJADO: JDV 01/01/2023		CANT: 00	
AUTORIZADO: AFS 19/01/2023		AFROBADO: RL 25/01/2023		CÓDIGO: DD-Cp-MESSC	
FABRICACIÓN: JR 01/02/2023		COMENTARIOS: XXXX		HOJA: 6	
COMENTARIOS: XXXX		EDICIÓN: 1		V: 0	

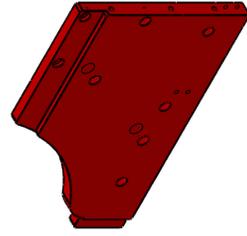
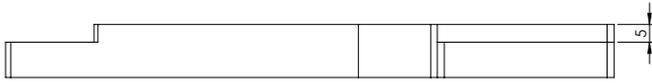
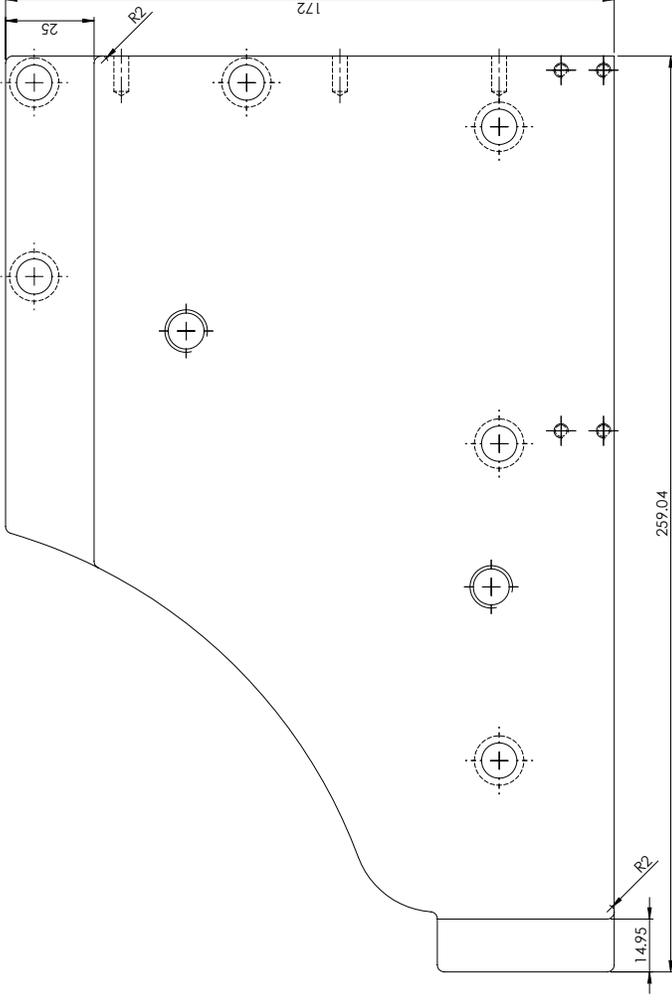


Isometric View
Scale 1:3

Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-unam.

ESCALA 1:1		TOLERANCIA ± 0.050		NOMBRE: DD-ME-SST-CYSP5B	
MATERIAL: Aluminio F500		DISEÑO: AFS 01/01/2022		PROY: A2	
DIM: mm		DIBUJADO: JDV 01/01/2023		CANT: 00	
AUTORIZADO: AFS 19/01/2023		APROBADO: RL 25/01/2023		CÓDIGO: DD-Cp-MESSC	
FABRICACIÓN: JR 01/02/2023		COMENTARIOS: XXXX		HOJA 7	
				EDICIÓN: 1	
				V. 0	

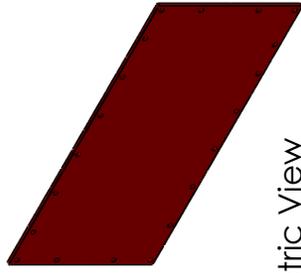
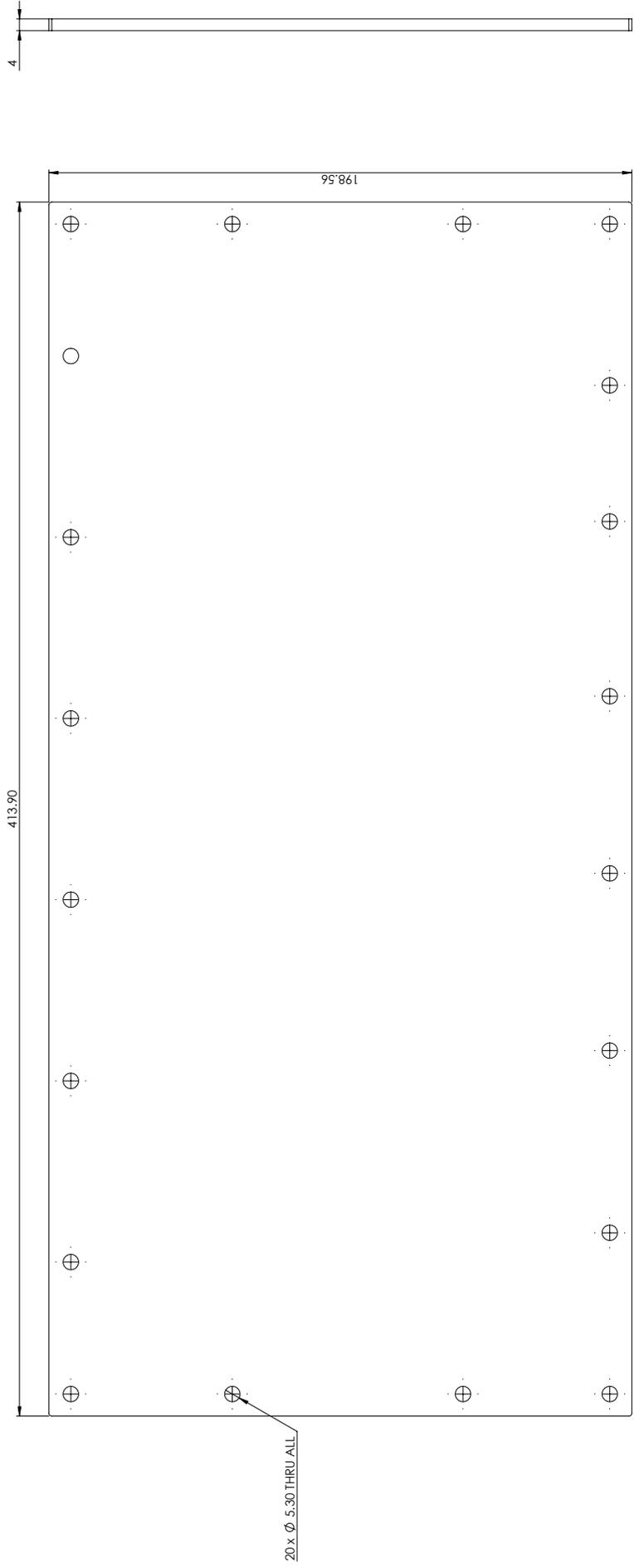
LADO I



Isometric View
Scale 1:3

Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-unam.

				TMP INSTRUMENTACIÓN - CU				DD-ME-SST-CYSP5B		CANT: 00	
ESCALA 1:1		TOLERANCIA ± 0.050		MATERIAL: Aluminio F500		DISEÑO: AFS 01/01/2022		NOMBRE:		PROY: A2	
DIM: mm		NOM:		FECHA:		DISEÑADO: AFS 01/01/2022		DD-ME-SST-CYSP5B		CANT: 00	
DIBUJADO: JDV 01/01/2023		AUTORIZADO: AFS 19/01/2023		APROBADO: RL 25/01/2023		FABRICACIÓN: JR 01/02/2023		COMENTARIOS: XXXX		HOJA: 8	
COMENTARIOS: XXXX		PROY: A2		FECHA:		EDICIÓN: 1		V: 0		HOJA: 8	
CÓDIGO: DD-Cp-MESSC		PROY: A2		FECHA:		EDICIÓN: 1		V: 0		HOJA: 8	

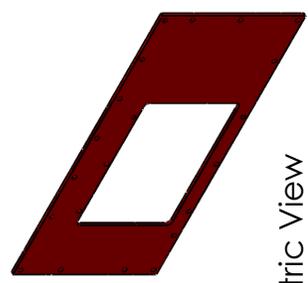
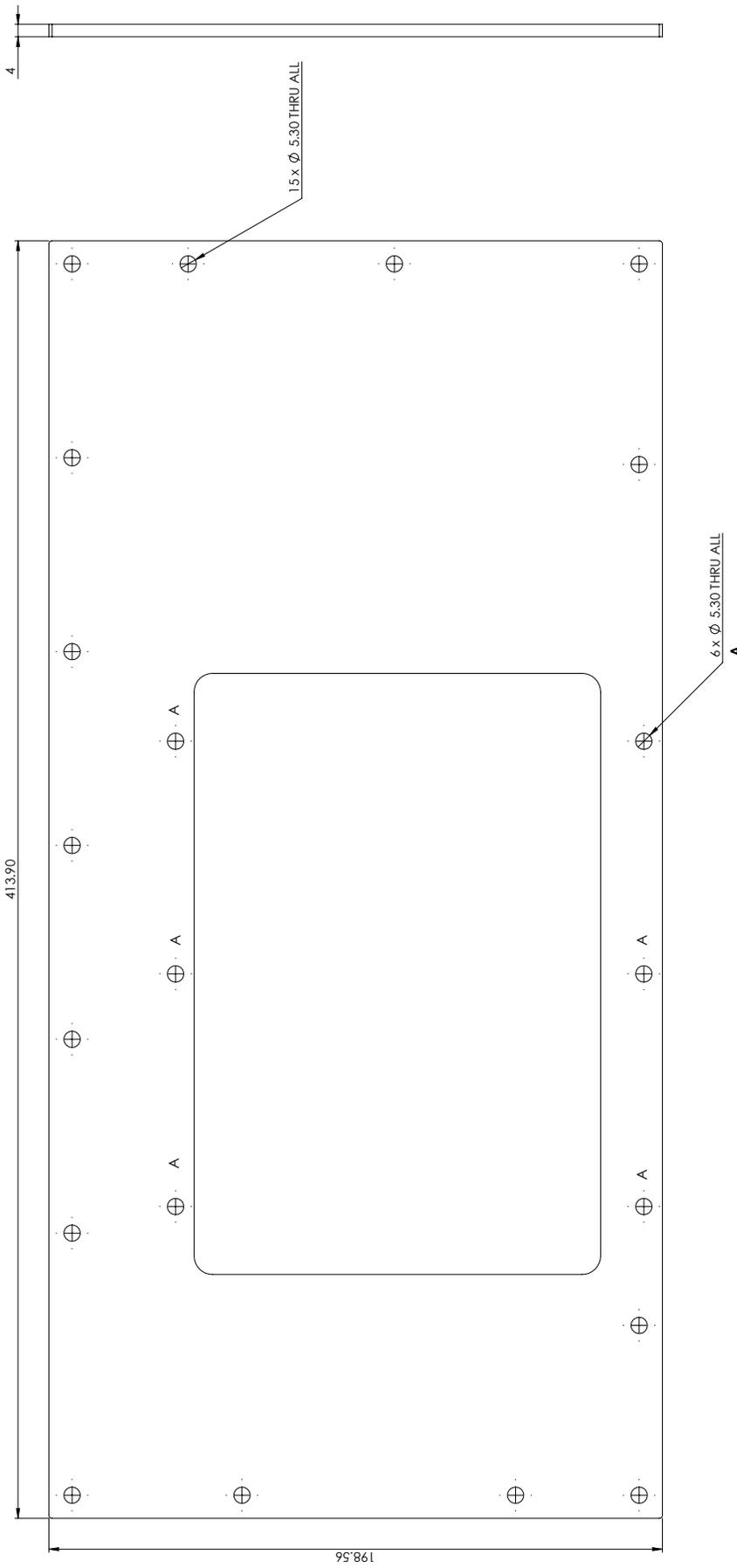


Isometric View
Scale 1:4

Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-unam.

ESCALA 1:1		TOLERANCIA ± 0.050	
MATERIAL: Aluminio F500			
DIM: mm	NOM	FECHA	
DISEÑADO: AFS	01/01/2022		
DIBUJADO: JDV	01/01/2023		
AUTORIZADO: AFS	19/01/2023		
APROBADO: RL	25/01/2023		
FABRICACIÓN: JR	01/02/2023		
COMENTARIOS: XXXX			

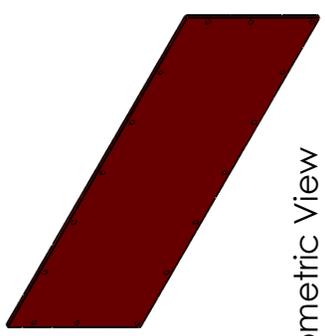
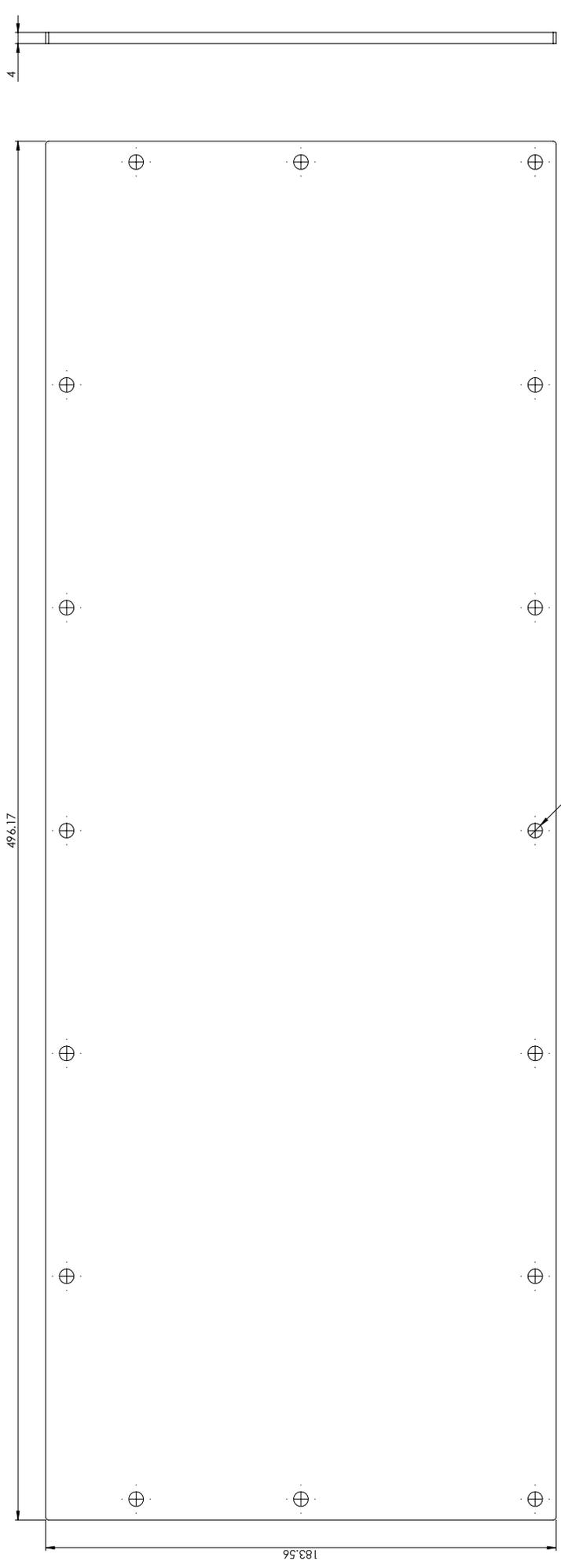
TMP INSTRUMENTACIÓN - CU		NOMBRE: DD-ME-SST-CYSP6	
PROY: DDRAGO/Cagire		CANT: 00	
HOJA 9		EDICIÓN: 1	
CÓDIGO: DD-Cg-MESSC		V. 0	



Isometric View
Scale 1:4

Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-unam.

				TMP INSTRUMENTACIÓN - CU			
ESCALA 1:1		TOLERANCIA ± 0.050		NOMBRE: DD-ME-SST-CYSP7		CANT: 00	
MATERIAL: Aluminio F500		DIM: mm		FECHA		PROY: A2	
DISEÑADO: AFS		NOM:		FECHA: 01/01/2022		HOJA 1	
DIBUJADO: JDV		FECHA: 01/01/2023		FECHA: 01/01/2023		EDICIÓN: 1	
AUTORIZADO: AFS		FECHA: 19/01/2023		FECHA: 25/01/2023		V: 0	
APROBADO: RL		FECHA: 25/01/2023		FECHA: 01/02/2023		CÓDIGO: DD-Cg-MESSC	
FABRICACIÓN: JR		FECHA: 01/02/2023		FECHA:		COMENTARIOS: XXXX	
COMENTARIOS: XXXX		PROY: A2		PROY: (File Proy: AW)		FILE: DD-Cg-MESSC	

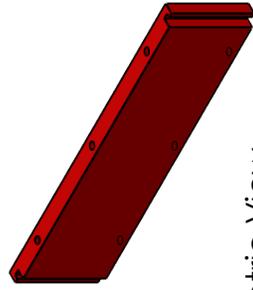
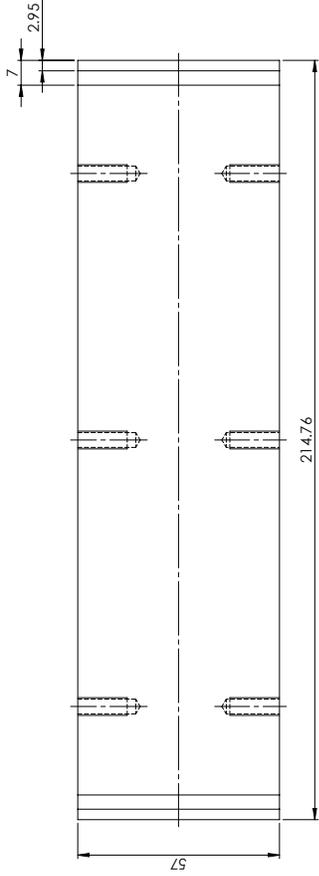
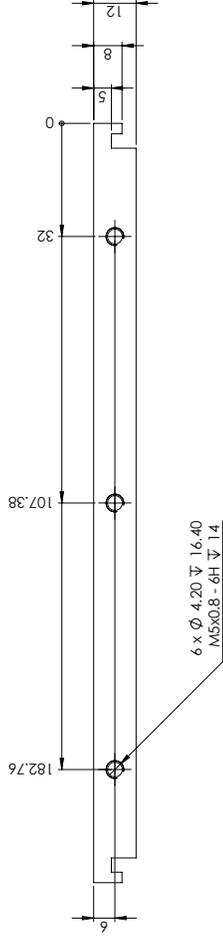


Isometric View
Scale 1:4

Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-unam.

ESCALA 1:1		TOLERANCIA ± 0.050	
MATERIAL: Aluminio F500			
DIM: mm	NOM	FECHA	
DISEÑADO AFS	01/01/2022		
DIBUJADO JDV	01/01/2023		
AUTORIZADO AFS	19/01/2023		
APROBADO RL	25/01/2023		
FABRICACIÓN JR	01/02/2023		
COMENTARIOS: XXXX			

TMP INSTRUMENTACIÓN - CU		INSTRUMENTACIÓN - CU	
NOMBRE: DD-ME-SST-CYSP8		PROY: DDRAGO/Cagire	
CANT: 00		CÓDIGO: DD-Cg-MESSC	
A2		HOJA 1 14	
<small>(dele Proy: AW)</small>		EDICIÓN: 1 V. 0	



Isometric View
Scale 1:2

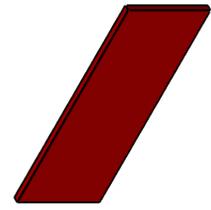
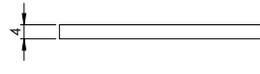
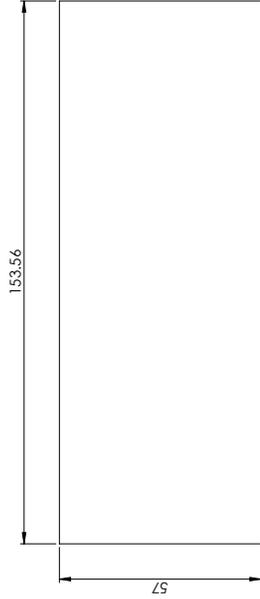
NOTA: DOS PIEZAS

ESCALA 1:1	TOLERANCIA ± 0.050	
MATERIAL: Aluminio F500		
DIM: mm	NOM	FECHA
DISEÑADO AFS	01/01/2022	
DIBUJADO JDV	01/01/2023	
AUTORIZADO AFS	19/01/2023	
APROBADO RL	25/01/2023	
FABRICACIÓN JR	01/02/2023	
COMENTARIOS: XXXX		



NOMBRE: DD-ME-SST-CYSP9
PROY: A2
CANT: 00
HOJA: 1 / 14 EDICIÓN: 1 / V. 0
CÓDIGO: DD-Cg-MESSC
 (dele Proy: AW)

Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-unam.



Isometric View
Scale 1:2

NOTA: DOS PIEZAS

ESCALA 1:1	TOLERANCIA ± 0.050	
MATERIAL: Aluminio F500		
DIM: mm	NOM	FECHA
DISEÑADO AFS	01/01/2022	
DIBUJADO JDV	01/01/2023	
AUTORIZADO AFS	19/01/2023	
APROBADO RL	25/01/2023	
FABRICACIÓN JR	01/02/2023	
COMENTARIOS: XXXX		



TMP
INSTRUMENTACIÓN - CU



Instituto de astronomía

NOMBRE: DD-ME-SST-CYSP10

PROY: A2 **CANT: 00**

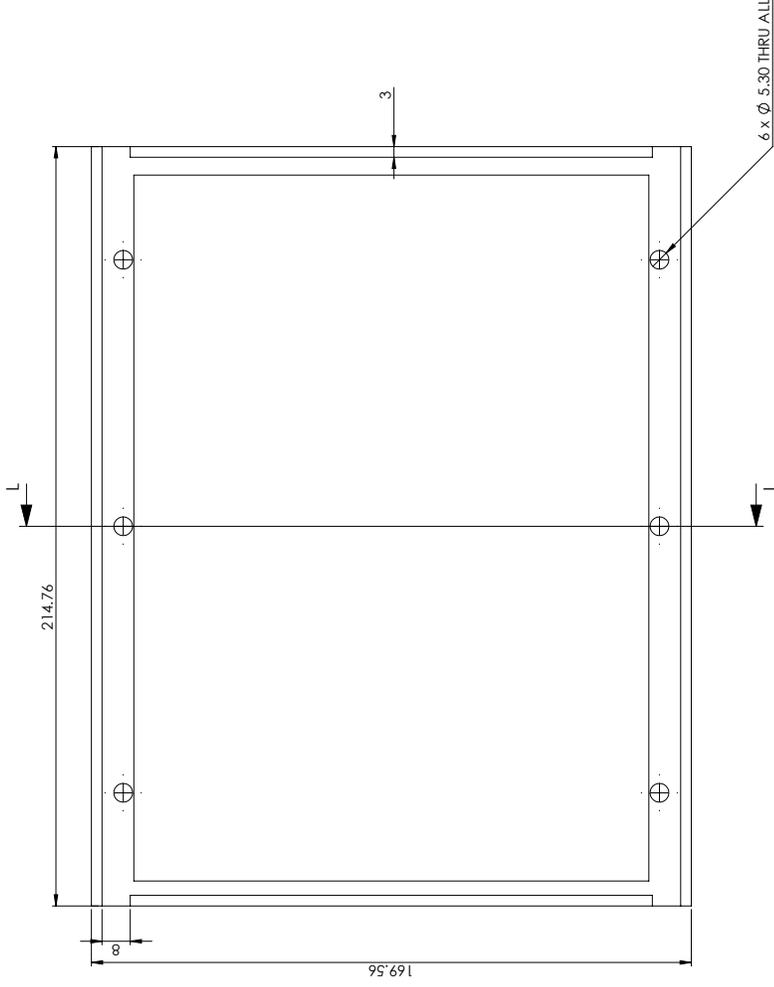
DDRAGO/Cagire

(dele Proy: AW)

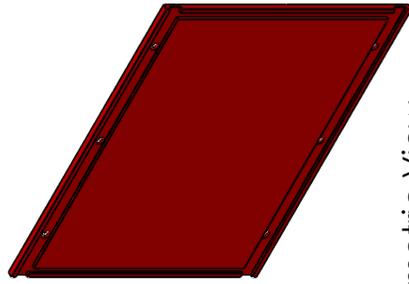
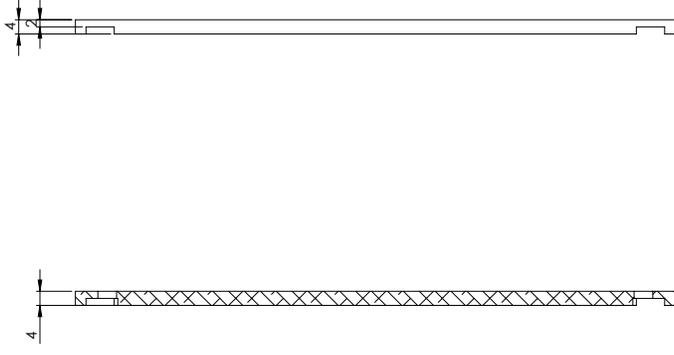
CÓDIGO: DD-Cg-MESSC

HOJA 1 14 EDICIÓN: 1 V. 0

Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-unam.



SECTION L-L
SCALE 1:1



Isometric View
Scale 1:2

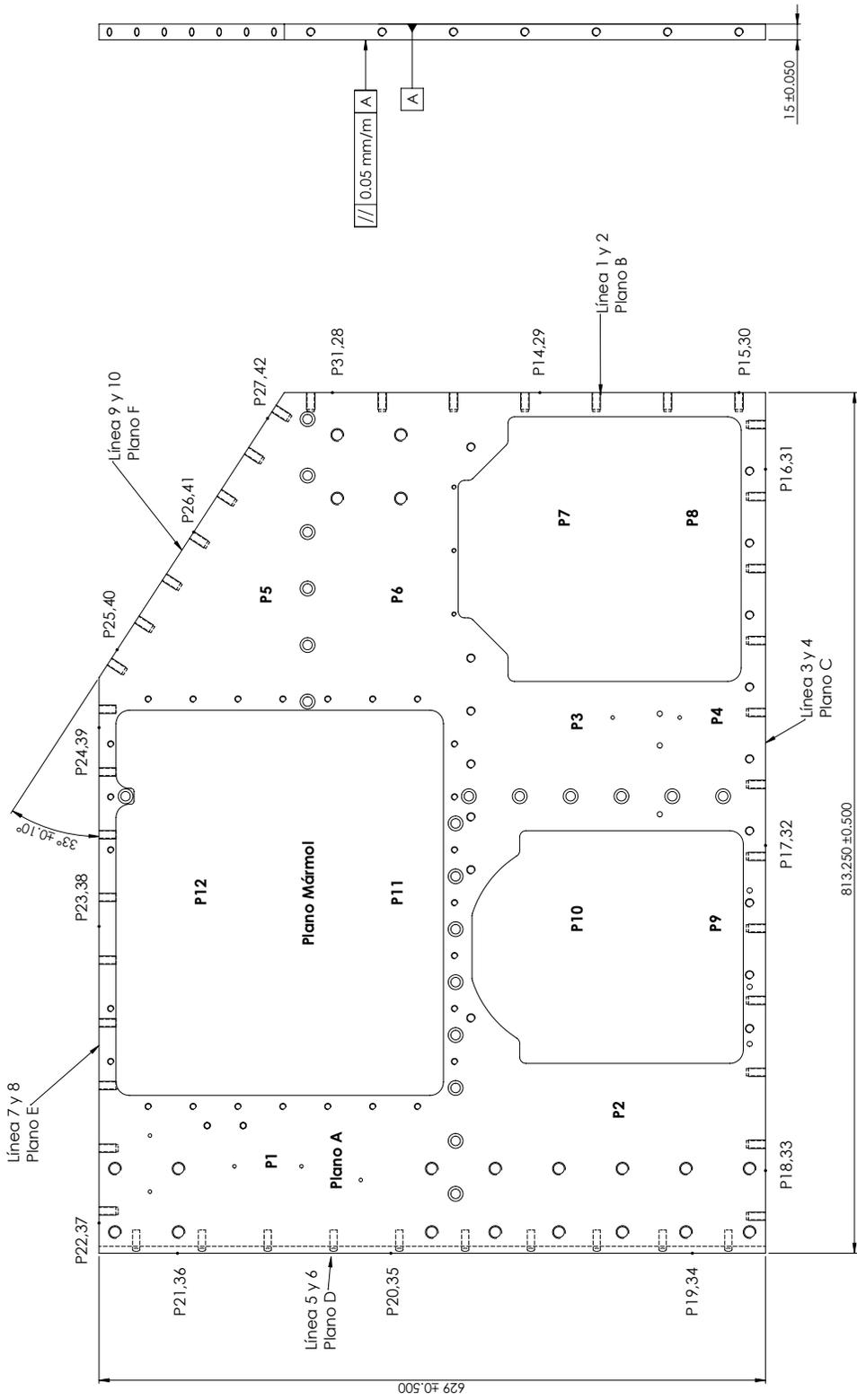
Plano para acabados en el Taller Mecánico de Precisión del ia-unam.

ESCALA 1:1		TOLERANCIA ± 0.050	
MATERIAL: Aluminio F500		NOM	
DISEÑADO: AFS		FECHA: 01/01/2022	
DIBUJADO: JDV		01/01/2023	
AUTORIZADO: AFS		19/01/2023	
APROBADO: RL		25/01/2023	
FABRICACIÓN: JR		01/02/2023	
COMENTARIOS: XXXX			

 TMP INSTRUMENTACIÓN - CU		 Instituto de Instrumentación	
NOMBRE: DD-ME-SST-CYSP11		CANT: 00	
PROY: DDRAGO/Cagire		HOJA: 1 14 EDICIÓN: 1 V. 0	
A2		(dele Proy: AW)	
CÓDIGO: DD-Cg-MESSC			

Apéndice B

Anexo II: Planos de metrología



METROLOGÍA
INSTRUMENTACIÓN - CU

DD-ME-SST-P2

CANT: 1

PROY: **DDRAGO/Cagire**

A2

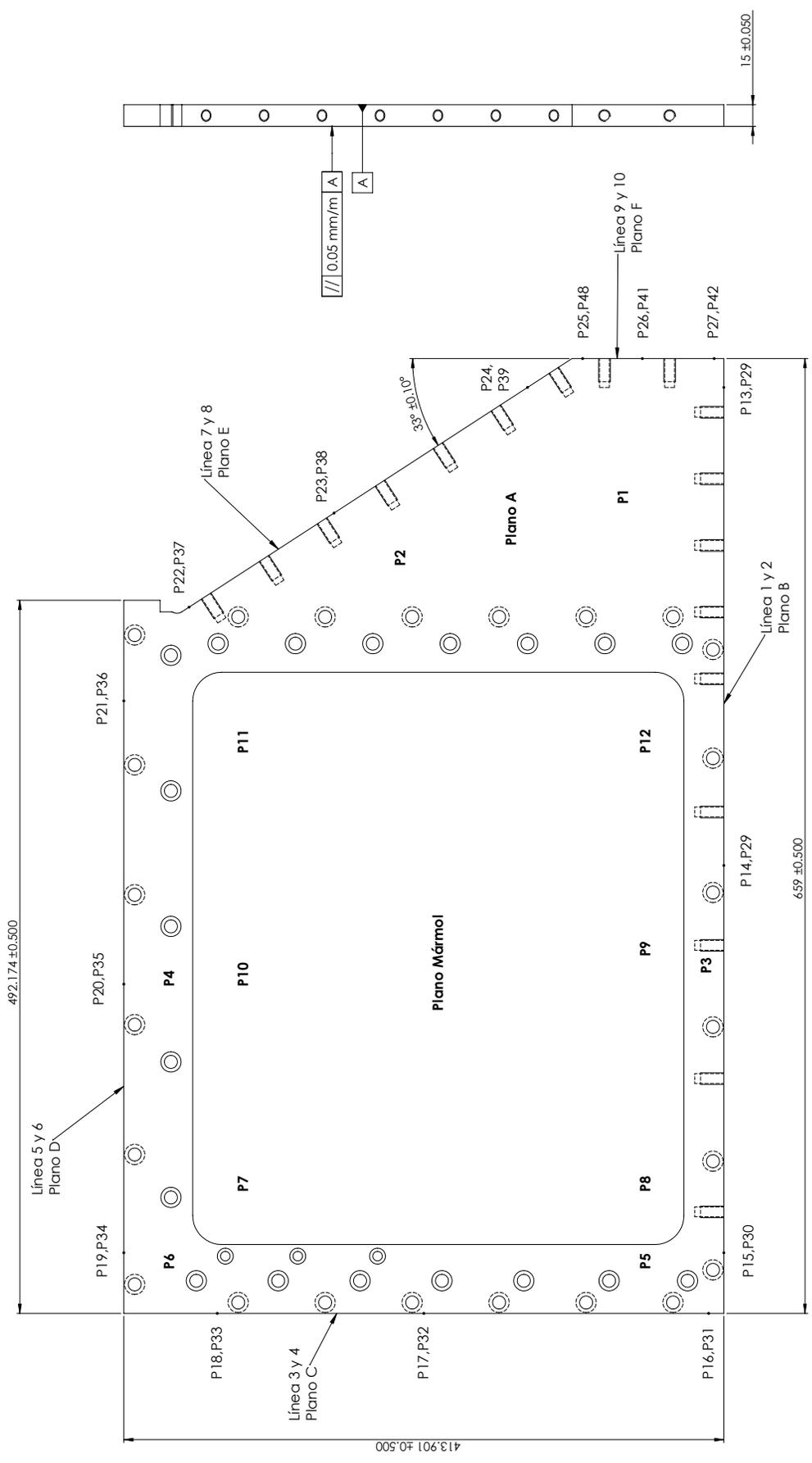
[dele Proy: AW]

CÓDIGO: DD-Cp-MESS-Metrología

HOJA 1 4 EDICIÓN: 1 V. 0

ESCALA	TOLERANCIA
1:3	± 0,500
MATERIAL: Aluminio F500	
DIM: mm	NOM
FECHA	
DISENADO AFS 01/01/2022	
DIBUJADO JDV 01/01/2023	
AUTORIZADO AFS 19/01/2023	
APROBADO RL 25/01/2023	
FABRICACIÓN JR 01/02/2023	
COMENTARIOS:	

Plano para metrología de precisión





METROLOGÍA
INSTRUMENTACIÓN - CU

DD-ME-SST-P4

CANT: 1



METROLOGÍA
INSTRUMENTACIÓN - CU

DD-ME-SST-P4

CANT: 1

ESCALA
1:2

TOLERANCIA
± 0,500

MATERIAL: Aluminio F500

DIM: mm

FECHA

DISEÑO	AFS	01/01/2022
DIBUJADO	JDV	01/01/2023
AUTORIZADO	AFS	19/01/2023
APROBADO	RL	25/01/2023
FABRICACIÓN	JR	01/02/2023

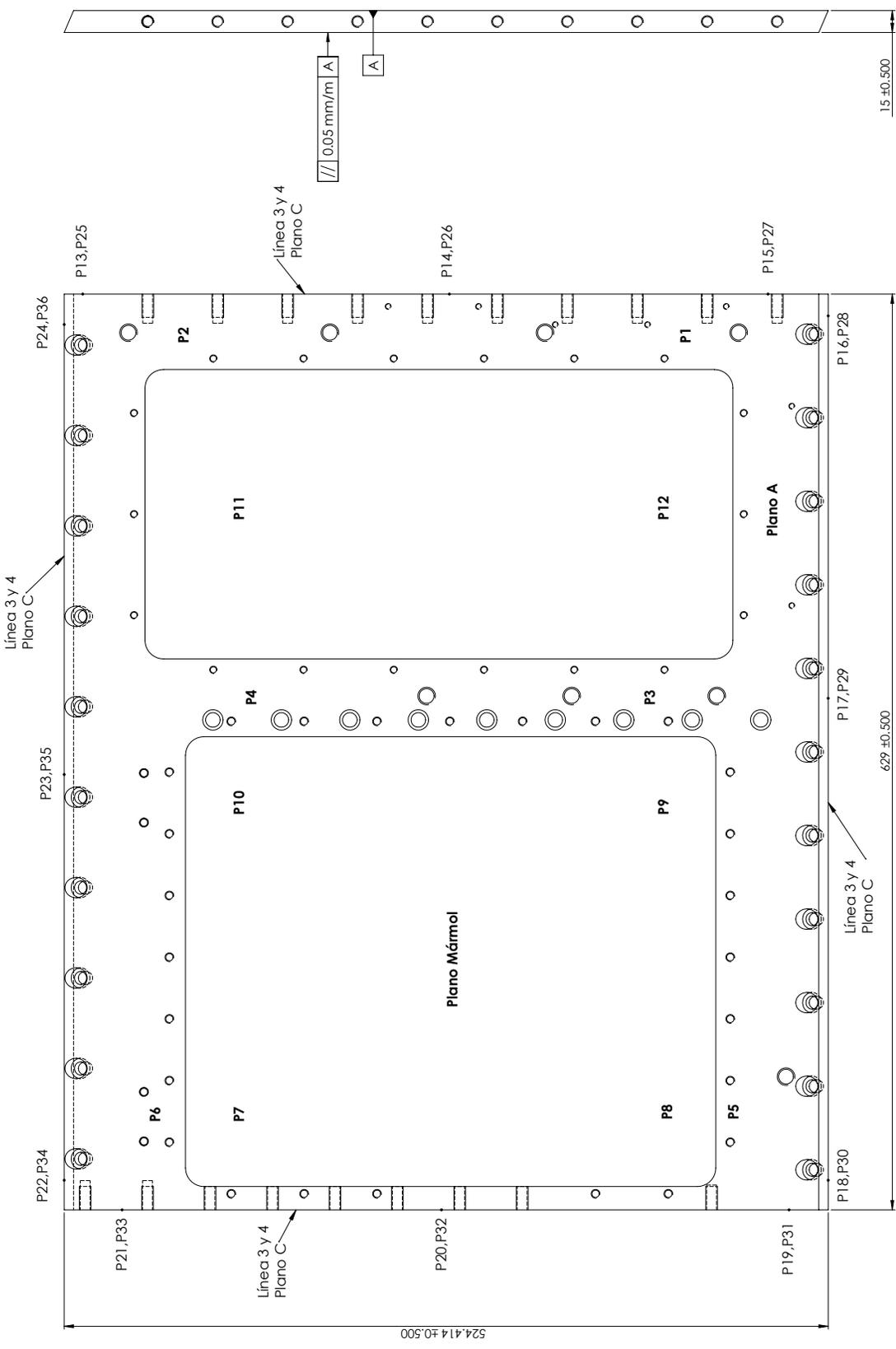
PROY: A2

NOMBRE: DDRAGO/Cagire

CÓDIGO: DD-Cp-MESS-Metrología

HOJA 2 4 EDICIÓN: 1 V. 0

Plano para metrología de precisión





METROLOGÍA
INSTRUMENTACIÓN - CU



DD-ME-SST-P7

CANT: 1

ESCALA
1:2

TOLERANCIA
± 0.500

MATERIAL: Aluminio F500

DIM: mm

FECHA

01/01/2022

DISEÑO	AFS	01/01/2022
DIBUJADO	JDV	01/01/2023
AUTORIZADO	AFS	19/01/2023
APROBADO	RL	25/01/2023
FABRICACIÓN	JR	01/02/2023

PROY: A2

NOMBRE: DD-ME-SST-P7

CANT: 1

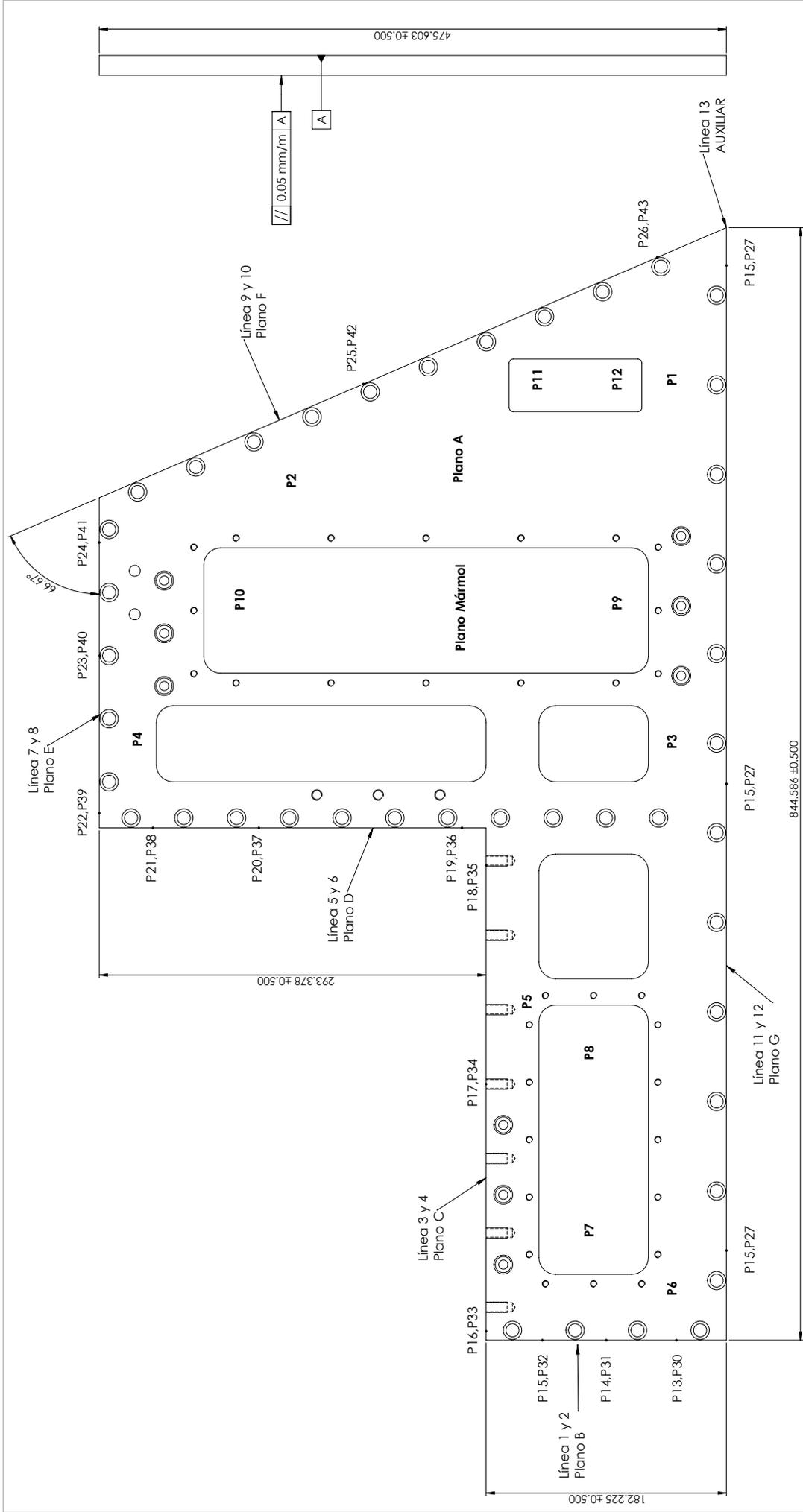
CÓDIGO: DD-Cp-MESS-Metrología

HOJA 3 4 EDICIÓN: 1 V. 0

PROY: DDRAGO/Cagire

COMENTARIOS:

Plano para metrología de precisión





METROLOGÍA
INSTRUMENTACIÓN - CU



DD-ME-SST-P10

CANT: 1



NOMBRE:

PROY: DDRAGO/Cagire

CANT: 1

ESCALA: 1:2

TOLERANCIA: ± 0.500

MATERIAL: Aluminio F500

DIM: mm

NOM: F500

FECHA: 01/01/2022

DISEÑO: AFS

DIBUJADO: JDV

AUTORIZADO: AFS

AFROBADO: RL

FABRICACIÓN: JR

FECHA: 25/01/2023

COMENTARIOS:

CÓDIGO: DD-Cp-MESS-Metrología

HOJA: 4

A2

EDICIÓN: 1

V. 0

Plano para metrología de precisión

