

**UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CÁMARA DE VACÍO PARA
LA IMPLEMENTACIÓN DE UN ESPECTRÓMETRO DE INCIDENCIA
RASANTE TIPO OFF-ROWLAND-CIRCLE CON OBTENCIÓN DE
MEDICIONES ESPECTRALES DE CU, AL Y W EN X-PINCH PARA
EL RANGO DE 5 A 80 [NM].**

EDUARDO ANDRÉS JARA ALFARO

Profesor guía:
Dr. Gonzalo Avaria Saavedra (CCHEN)

Profesor patrocinante:
Dr. Álvaro San Martín (USACH)

Trabajo de titulación para optar al título
de Ingeniero Físico.

Santiago – Chile.
2015

© **Eduardo Andrés Jara Alfaro.**

Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra, con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento, siempre y cuando se incluya la cita bibliográfica del documento.

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CÁMARA DE VACÍO PARA
LA IMPLEMENTACIÓN DE UN ESPECTRÓMETRO DE INCIDENCIA
RASANTE TIPO OFF-ROWLAND-CIRCLE CON OBTENCIÓN DE
MEDICIONES ESPECTRALES DE CU, AL Y W EN X-PINCH PARA
EL RANGO DE 5 a 80 [NM].**

EDUARDO ANDRÉS JARA ALFARO

Este trabajo de Graduación fue elaborado bajo la supervisión del profesor guía Dr. Gonzalo Avaria Saavedra del Departamento de Plasmas Termonucleares (DPTN) de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) y ha sido aprobado por los miembros de la Comisión Calificadora, de, candidato,

.....
Dr. Daniel Serafini Ssa

.....
Dr. Álvaro San Martín Ulloa

.....
Dr. Gonzalo Avaria Saavedra
Profesor guía

.....
Dra. Yolanda Vargas
Directora Departamento de Física

Agradecimientos

Quisiera agradecer a mi familia, por todo el amor brindado durante tantos años y por estar siempre preocupada de mí en el periodo del presente trabajo. A mi hermano menor, Ignacio, por todo su cariño. A Claudia, por su amor y consideración conmigo, además de brindarme inspiración y apoyo.

Quisiera agradecer a Dr. Gonzalo Avaria, por permitirme trabajar con él, su paciencia y por todo lo que aprendí en este periodo de tiempo. Al Dr. Leopoldo Soto, por permitirme realizar el trabajo en el laboratorio. Al Investigador, Dr. Cristian Pavez, por su simpatía y preocupación. A Patricio San Martín, por su tiempo, simpatía y ayuda sin la cual este trabajo no podría haberse realizado. A José Pedreros, por sus consejos, buena onda y preocupación. A Pamela Quintuprai por su preocupación y a todo el equipo que conforma el DPTN.

Quisiera agradecer al Dr. Álvaro San Martín por sus consejos y el apoyo brindado durante mis últimos años de la carrera. Como también a mis compañeros de carrera Cecilia Montero y Nicolás Urrutia, por el gran tiempo que compartimos juntos y que seguiremos compartiendo.

Quisiera agradecer también al Dr. Raúl Aliaga-Rössel por la ayuda brindada durante el periodo de trabajo escrito, además de su enorme simpatía y calidez humana.

Este trabajo fue financiado por CONICYT mediante los proyectos:

FONDECYT de Iniciación N° 11121587

Anillo ACT-1115

Resumen

En el presente trabajo se aborda la implementación del espectrómetro de incidencia rasante off-Rowland-circle *GISVUV1* para Radiación de Extremo Ultravioleta (EUV) en el rango espectral de 5 a 80 [nm] para el estudio y caracterización de descargas pulsadas de plasma en el Departamento de Plasmas Termonucleares (DPTN) de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN). En particular, se trabajó con el Generador Multipropósito (X-Pinch: 1.2 [μF], 47.5 [nH], 30[kV], 500 [J], 0,2 [Ω], 180 [kA], $dI/dt \sim 10^{11}$ [A/s] y T/4= 375 [ns]) de la CCHEN.

Se diseñó y construyó una cámara de vacío en la cual se aloja un espejo de incidencia rasante (2°) para minimizar la absorción de la radiación por parte del espejo y maximizar, gracias al enfoque, la radiación de entrada del espectrómetro. Dicho espejo se montó sobre una plataforma móvil que es desplazada por un micrómetro como actuador lineal desde fuera de la cámara, ayudando así a enfocar la radiación hacia el espectrómetro. Posteriormente, se ensambló todo el montaje experimental, el cual fue alineado con un láser de He-Ne.

Para la calibración del espectrómetro se realizó una calibración geométrica con los parámetros del espectrómetro *GISVUV1* y las distancias de dispersión de la red de difracción. Se utilizó un láser de Nd-YAG (1.06 [μm], 1.2 [J], 8 [ns]) para generar plasma en blancos de cobre, aluminio y silicio como método de obtención de líneas espectrales que puedan ser comparadas con los resultados experimentales del X-Pinch. Con esta información, se generó una calibración para el espectro de Al de 25 [μm] con un tiempo de 84 [ns] desde el inicio de la derivada de la corriente (dI/dt). En el espectro de Al se llegan a observar líneas del ion Al VIII con una energía de ionización de 284,64 [eV].

Finalmente, se obtuvo mediciones espectrales en el Generador Multipropósito de la CCHEN, con uso de alambres de cobre (Cu) de 10 [μm], aluminio (Al) de 25 [μm] y tungsteno (W) de 13 [μm] con una red de difracción de 300 [l/mm] (rango de 25 a 85 [nm]). Además, se obtuvieron mediciones en el rango de mayor energía (5 a 8 [nm]) con el uso de la red de difracción de 1200 [l/mm] para los alambres de Cu de 10 [μm] y Al de 25 [μm].

Tabla de Contenido

Agradecimientos	iv
Resumen.....	vi
1.- INTRODUCCIÓN.....	1
Motivación del trabajo: Espectroscopia EUV en descargas pulsadas de plasma.	4
Objetivos.....	5
Alcance del trabajo	5
2.- ESPECTROSCOPIA EUV.....	6
2.1. Radiación Ultravioleta Extrema (EUV)	6
2.2.- Algunas fuentes de Radiación Ultravioleta Extrema: z-pinch y x-pinch.....	7
2.3.- Óptica para el rango EUV	9
2.4.- El círculo de Rowland	11
2.4.1.- Detección fuera del círculo de Rowland (<i>off-Rowland-circle</i>).....	12
3.- MONTAJE EXPERIMENTAL	14
3.1. Diseño y construcción de la cámara de vacío.....	14
3.1.1. Diseño de cámara de vacío	15
3.1.2.- Diseño para soporte de espejo de incidencia rasante	17
3.1.3.- Diseño de <i>flanges</i> y tapas.....	19
3.1.3. Diseño de actuador, acople y conectores.....	21
3.2. Características del Generador Multipropósito (X-pinch) y montaje experimental de la descarga.....	25

3.3.	Alineación del sistema óptico con de láser He-Ne	30
4.-	CALIBRACIÓN DEL ESPECTRÓMETRO DE INCIDENCIA RASANTE...	33
4.1.	Calibración geométrica y determinación del rango de longitudes de onda (λ).	33
4.2.	Adquisición de espectros de plasma producido por láser para calibración.	38
4.3.	Comparación de espectros: Plasma producido por láser y X-pinch de aluminio de 25 μm (300 [l/mm])	43
5.-	RESULTADOS EXPERIMENTALES	46
5.1.	Obtención de mediciones espectrales en descarga de arreglo de alambres (X-pinch) con red de difracción de 300 [l/mm].	46
5.1.1.-	Adquisición de espectros de Aluminio 25 μm	47
5.1.2.-	Adquisición de espectros de Cu 10 μm	50
5.1.3.-	Adquisición de espectros de W de 13 μm	54
5.2.	Obtención de líneas espectrales en descarga de arreglo de alambres (X-pinch) con red de difracción de 1200 [l/mm]	55
5.2.1.-	Adquisición de espectros de Al de 25 μm	56
5.2.2.-	Adquisición de espectros de Cu de 10 μm	59
6.-	CONCLUSIÓN.....	60
	BIBLIOGRAFÍA	62
	ANEXO	66
A.	Planos para los distintos elementos que componen la cámara de vacío	66

1.- INTRODUCCIÓN.

Si miramos a nuestro alrededor, sólo vemos plasma al encender un tubo fluorescente, ver caer un rayo en una tormenta o al observar una vela. Sin embargo, el plasma se encuentra en una abundancia del 99% en el universo [1]. Nuestro sol, como también las estrellas y la materia intergaláctica se encuentran en estado de plasma.

En el plasma se encuentran portadores de carga libre (átomos ionizados) lo que produce que sea conductor y reaccione ante los campos eléctricos y magnéticos. Sin embargo, la carga total para cualquier parte del sistema al ser sumada colectivamente es cero, es decir, la suma en una porción de volumen para los electrones de carga negativa como iones de carga positiva da un valor neutro de carga. Así, el plasma se podría definir como “un gas cuasineutral de partículas cargadas y neutras que exhibe un comportamiento colectivo” [2].

Entre los tipos de plasmas existentes (y que se pueden producir en condiciones de laboratorio) se encuentra el plasma termonuclear el cual ha tenido gran importancia en las últimas décadas debido a su posible aplicación como recurso energético en procesos de fusión nuclear controlada. En este tipo de plasma, debido a las altas temperaturas (en ordenes de keV), las capas electrónicas de los átomos se encuentran despobladas debido a los continuos procesos de ionización de los elementos. Esta situación, además de la alta densidad producida por las distintas técnicas de compresión, puede dar paso a que algunas partículas superen la barrera de Coulomb entre los núcleos, permitiendo a las interacciones nucleares fuertes manifestarse y producir la fusión nuclear.

El interés en desarrollar tecnologías de energía nuclear como una fuente de energía renovable, limpia y duradera ha estado latente durante todos estos años detrás del estudio de los dispositivos de potencia pulsada y, de manera más general, de la física de plasma. El estudio de las descargas de potencia pulsada

es fundamental en la implementación de nuevas tecnologías y la caracterización de los fenómenos en el plasma. En particular, la descripción espectroscópica de las descargas de plasma es la herramienta esencial para obtener información acerca de los niveles de ionización de los elementos y, con esto, una estimación de las temperaturas y densidades alcanzadas en los experimentos.

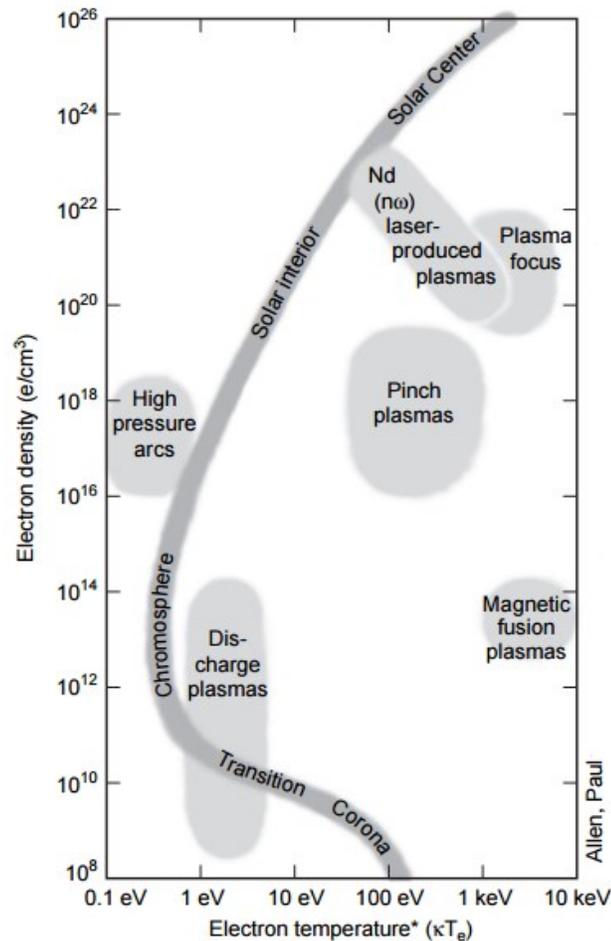


Figura 1. 1: Gráfico de densidad electrónica sobre temperatura para diferentes tipos de plasma [3]. Aparece en el gráfico los distintos plasmas que se pueden encontrar en el Sol desde su parte central hasta la zona coronal (plasma coronal). Se ubica, además, los plasmas por pinzamiento (pinch), el plasma foco y plasmas producidos por láser, que son estudiados en la CCHEN.

En consideración a lo antes mencionado, el presente trabajo de tesis pretende resolver el problema de la implementación de un espectrómetro de incidencia rasante tipo off-Rowland-circle en el rango de Extremo Ultravioleta (EUV) para las mediciones espectrales de diferentes dispositivos y configuraciones de plasma en potencia pulsada. En el segundo capítulo, se abordaron los requerimientos de vacío y óptica para la EUV, como también el funcionamiento de los espectrómetros de redes de difracción cilíndricas del tipo *círculo de Rowland* y la configuración de detectores tipo Microchannel Plate (MCP) fuera del mismo círculo.

En el tercer capítulo, el problema es abordado desde el diseño y creación de una cámara de vacío que aloje la óptica de enfoque en incidencia rasante del espectrómetro con actuadores lineales que permitan movilizar la línea de enfoque, además de la caracterización del Dispositivo Multipropósito utilizado (X-Pinch) y las calibraciones del sistema óptico de enfoque y espectrómetro.

Con el montaje experimental alineado, se pasa a un cuarto capítulo que corresponde a la calibración del espectrómetro que se logra obteniendo una calibración geométrica (rango de longitudes de onda) y con la obtención de líneas espectrales (identificación de líneas) en plasmas producidos por láser (LPP). Con esta información, se calibró un espectro de aluminio con el uso de la red de difracción de 300 [l/mm] (20 – 80 [nm]) y se identificaron iones de este elemento presentes en las descargas.

El quinto capítulo corresponde a la obtención de las líneas espectrales para Aluminio (Al), Cobre (Cu) y Tungsteno (W) en el Generador Multipropósito con el uso de redes de difracción de 300 y 1200 [l/mm] y su respectiva asociación, con pulsos de referencia, a diferentes momentos de iniciada la corriente. Finalmente, se presentan las conclusiones obtenidas del trabajo.

Motivación del trabajo: Espectroscopia EUV en descargas pulsadas de plasma.

El trabajo de titulación se realizó en el Departamento de Plasma Termonuclear (DPTN) de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN), el cual estudia descargas pulsadas de plasma tales como Plasma Foco con energías entre 2[J] y 150 [kJ], descarga de arreglo de alambres (X-pinch) y descargas capilares. Estas descargas producen todo tipo de radiación, ya sea en el espectro visible, EUV, rayos-X blandos, además de partículas cargadas y neutras. En general, el desarrollo actual de los proyectos de investigación en el DPTN necesita de la caracterización de la radiación emitida por estas descargas.

En particular, el proyecto de investigación Fondecyt INICIACIÓN 11121587 requiere de la descripción de la radiación EUV emitida desde las descargas Plasma Foco, por lo cual se requiere la elaboración de un montaje experimental que cumpla con los requisitos para la implementación de técnicas de espectroscopia EUV.

Dentro de estos requisitos, se necesita utilizar un sistema óptico del tipo rasante para lograr minimizar la absorción de la radiación en los materiales. Además, se requiere de un alto grado de vacío (1×10^{-5} [mbar]) para disminuir la absorción de la radiación en el aire para este rango de energía y permitir el funcionamiento de detectores tipo MCP.

Para cumplir con estos requerimientos, se pretende diseñar y construir una cámara de vacío que aloje la óptica necesaria para maximizar la radiación de entrada de un espectrómetro EUV de incidencia rasante y que sea capaz de operar en los rangos de vacío antes mencionado.

La cámara de vacío debe permitir el movimiento y alineación del espejo cilíndrico de incidencia rasante desde afuera de la cámara con un fácil acceso al espejo y a los actuadores que permiten su curvatura, todo esto alineado con el eje óptico de toda la descarga.

Objetivos

Objetivo General

Diseñar y construir una cámara de vacío que permita el uso de un espejo de incidencia rasante como sistema de enfoque para un espectrómetro en el rango Rayos-X blandos / EUV.

Objetivos Específicos

- 1) Diseño de una cámara de vacío que cumpla con parámetros de alineación óptica específicos para los experimentos desarrollados en el DPTN. Esta cámara debe permitir: el alojamiento de un espejo de incidencia rasante; la modificación de la alineación del espejo; la evacuación de gases hasta una presión del orden de 10^{-6} [mbar]
- 2) Construcción de la cámara de vacío y realización de pruebas de vacío.
- 3) Alineación del sistema, comprobando que cumple con los estándares necesarios para la realización de medidas experimentales.
- 4) Obtención de un set de mediciones espectrales en una descarga pulsada de plasma.

Alcance del trabajo

Dentro del alcance del trabajo, se desea obtener mediciones espectrales para descargas X-pinch para diferentes elementos de carga disponible para los alambres (como lo son cobre, aluminio y tungsteno), como herramienta de caracterización espectroscópica de las descargas. En lo posible, se pretende generar una calibración para los espectros obtenidos con la finalidad de establecer el rango de longitudes de onda observados en los canales de la MCP.

2.- ESPECTROSCOPIA EUV

De manera general, la espectroscopia es el estudio de la materia utilizando radiación electromagnética [4]. El espectro de átomos y moléculas consisten a menudo en una serie de líneas espectrales, cada una representando una transición entre dos estados energéticos diferentes.

La descomposición de la radiación electromagnética se realiza a través de un espectrómetro, el cual entrega información en intensidad con respecto a la longitud de onda. Esta descomposición se realiza en una red de difracción que difracta las diferentes longitudes de onda incidentes en direcciones discretas [5], lo cual genera un patrón de difracción.

A partir de las diferentes radiaciones emitidas por las descargas tipo pinch (de arreglos de alambres o X-pinch y Z-pinch), se puede caracterizar la radiación electromagnética emitida por estos dispositivos usando espectroscopia. Esto genera información de los procesos atómicos existentes en las descargas, en particular, del grado de ionización de los elementos constitutivos de las descargas. Es por esto que la espectroscopia para el rango EUV corresponde a un método eficaz de medición de la temperatura, la densidad, y otras características de plasmas de alta densidad.

2.1. Radiación Ultravioleta Extrema (EUV)

Un tipo de radiación emitida por las descargas tipo Plasma Foco [6] y X-pinch [7] es la radiación ultravioleta extrema o de alta energía (o por sus siglas en inglés, EUV o XUV). Este tipo de radiación electromagnética abarca las longitudes de onda desde 105 [nm] hasta los 0,15 [nm], incluyendo los rayos X-blandos (30 a 0,15 nm) [8]. Entre las fuentes de radiación EUV artificiales se encuentra la

radiación emitida por el sincrotrón, láser de electrones libres (FELs), la radiación de Cherenkov, entre otros [9]. Como fuente natural de radiación EUV se encuentra la radiación emitida por la corona solar [10], [11].

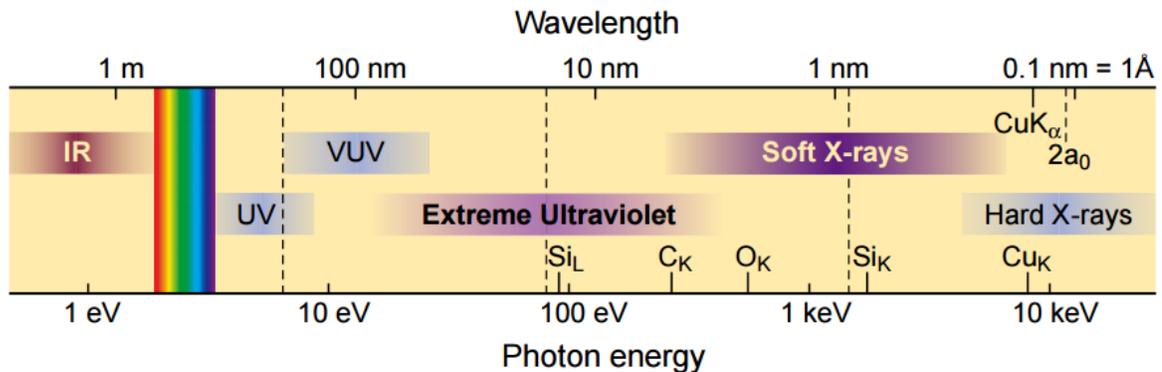


Figura 2. 1: Espectro Electromagnético en el rango de energías de 1 m a 0.1 nm (1 [eV] a 10 [keV] respectivamente). Desglose de la longitud de onda y energía para el rango de radiación EUV [3]

La longitud de penetración para este tipo de radiación es aproximadamente menor a $1 \mu\text{m}$ para casi todos los materiales [12] razón por la cual los fotones de este rango de radiación son absorbidos en la naturaleza rápidamente.

2.2.- Algunas fuentes de Radiación Ultravioleta Extrema: z-pinch y x-pinch

Un tipo particular de plasma creado en laboratorio son las descargas Plasma Foco (Z-pinch) y las descargas pulsadas de plasma (X-pinch) (Véase Figura 1.1). Las descargas Z-pinch consisten en dos electrodos coaxiales separados por un aislante, que son dispuestos en una cámara de vacío que contiene gases de bajo

número atómico. Los electrodos son conectados a un generador capacitivo con carga de los condensadores típicamente en el rango de 10-60 [kV] [13].

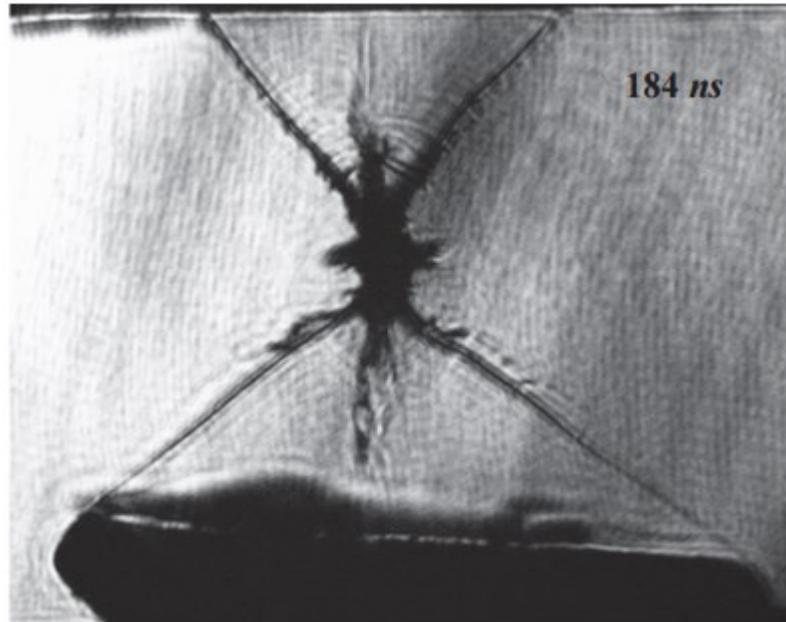


Figura 2.2: *Shadowgrafía imagen-plano de una configuración tipo x-pinch con alambres de W de $13 \mu\text{m}$. [14].*

Por otro lado las descargas X-pinch están formadas por dos o más hilos que se cruzan en un solo punto y son accionados por un gran pulso de corriente ($> 80 \text{ kA}$) desde un dispositivo de potencia pulsada (Véase Figura 2.2). Las corrientes a través de cada uno de los cables de los alambres de un X-pinch se combinan en el punto de cruce y el campo magnético aumenta la presión para dos hilos de X-pinch [15].

El aumento de la presión magnética en ese punto es lo suficientemente fuerte para confinar el plasma en ese punto creando una columna pinch localizada de aproximadamente 100-400 micras de longitud [15] como se ve en la Figura 2.2. Esta columna se somete a las inestabilidades que provocan una implosión del plasma en pequeñas regiones de alta temperatura y densidad.

Tanto las descargas Z-pinch como X-pinch generan radiación en de una amplia gama del espectro electromagnético como luz visible, EUV [6], [16] rayos X-blandos [14] y rayos gamma. Entre las descargas de tipo pinch, el Departamento de Plasmas Termonucleares de la Comisión Chilena de Energía Nuclear trabaja con configuraciones de Z-pinch (PF-400J [17], PF-50J [18], PF-2kJ [19], NF [20], Multipropósito [21], Speed 2 [22]) y X-pinch (Dispositivo Multipropósito, Speed-2).

2.3.- Óptica para el rango EUV

Para implementar un montaje de espectrometría en el rango EUV se desea que la radiación no sea absorbida por los elementos, por lo cual no se utilizan lentes para los montajes experimentales. Sin embargo, se pueden utilizar espejos en incidencia rasante, es decir, con un ángulo mayor a 80° medidos desde la entrada de la radiación al espejo, permitiendo así una mayor reflectividad.

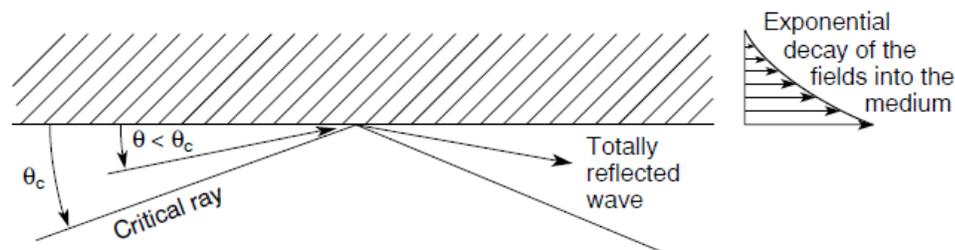


Figura 2. 3: Diagrama para ángulo crítico de incidencia rasante θ_c . Para ángulos $\theta < \theta_c$, se produce una reflexión total de la radiación [3].

En particular, el ángulo crítico de incidencia rasante θ_c para generar una reflexión externa total (Véase Figura 2.3) está dado por $\theta_c \propto \sqrt{2\delta}$ [3], en el cual δ corresponde a la parte real de la corrección en el índice de reflexión ($n(\omega) = 1 - \delta + i\beta$) para la radiación de Extremo Ultravioleta y Rayos X [3]. Para el caso del SiO₂, para una energía de 413 [eV] ($\lambda = 3$ [nm]), la parte real del índice de

refracción llega al valor de $\delta = 2 \times 10^{-3}$ [23], por lo que el ángulo crítico requerido es de $\theta_c = 3,6^\circ$. En la Figura 2.4 se muestra la curva de reflectancia del SiO₂ para incidencia rasante (curva superior) para el rango de longitudes de onda de 0.1 a 100 [nm], en la cual se observa que en el rango de $\lambda \geq 3$ [nm] la reflectancia se mantiene por sobre el 85% de la radiación reflejada.

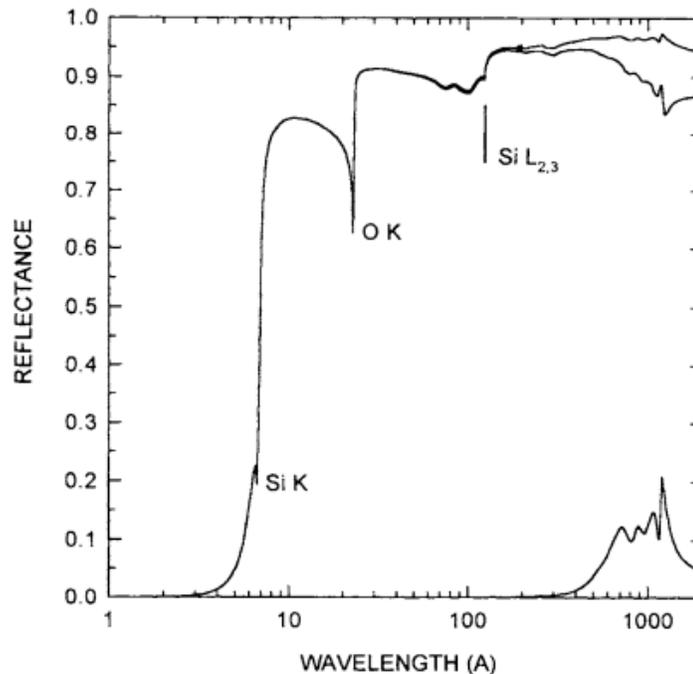


Figura 2. 4: Gráfico de reflectancia sobre longitud de onda para el SiO₂. Este material se comporta mal como reflector en incidencia normal debido a su reflectancia no uniforme y que además cae a cero cerca de los ~200 [Å] (curva inferior derecha). En incidencia rasante (curva superior), la reflectancia mantiene un valor alto hasta los ~25 [Å] en donde cae en el peak de O [24].

Por otra parte, con respecto a las redes de difracción utilizadas en los espectrómetros en la región EUV, se tiene que las redes de reflexión curvas no sólo generan la dispersión para las longitudes de onda, sino también el enfoque de la luz, es decir, la gran ventaja en el uso de estas redes radica en el hecho de que no necesita de una óptica de colimación. Esto es particularmente importante en la región EUV del espectro, para el que no hay buenos materiales reflectores. Por lo

tanto, para longitudes de onda < 110 nm, las redes de difracción cóncavas se usan de manera exclusiva [5]. Las redes de difracción de 600 a 1200 líneas por milímetro son eficaces para la región [5].

2.4.- El círculo de Rowland

Las redes de difracción cilíndricas poseen un radio de curvatura asociado (Véase Figura 2.5) a partir del cual se puede asociar un círculo de enfoque de la red de difracción llamado 'círculo de Rowland' [25] cuyo radio corresponde a la mitad del radio de curvatura de la red de difracción.

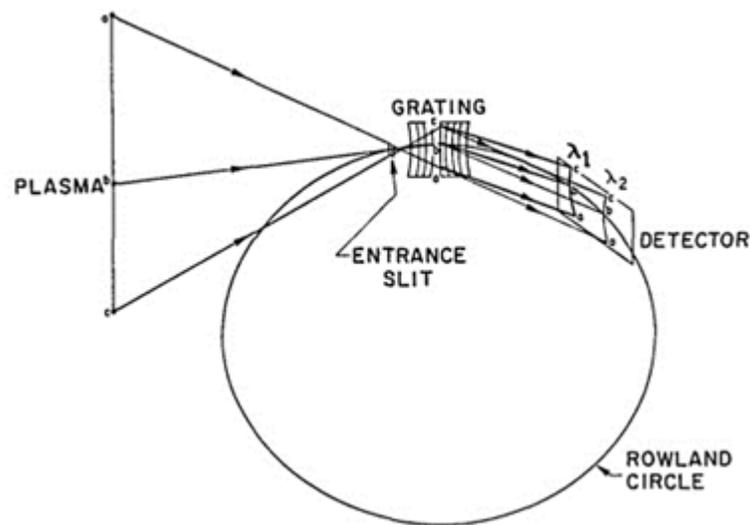


Figura 2. 5: Diagrama de la Geometría del círculo de Rowland con radio R . La luz difusa del plasma entra en la rendija del espectrómetro para llegar a la red de difracción. La red de difracción esférica posee un radio de curvatura $2R$ [25].

Para el caso de una red de difracción con ranuras igualmente espaciadas en donde la rendija de entrada al espectrómetro se encuentra inscrita en el mismo

círculo de Rowland, las diferentes longitudes de onda dispersadas por la red de difracción son enfocadas en el mismo radio del círculo de Rowland ($\lambda_1, \lambda_2, etc.$) como se ve en la Figura 2.5.

2.4.1.- Detección fuera del círculo de Rowland (*off-Rowland-circle*)

En el montaje se utiliza como detector una *Microchannel Plate Camera* (MCP) que corresponde a un arreglo de 10^4 a 10^7 multiplicadores de electrones orientados paralelamente el uno al otro con un tamaño promedio de cada canal de 10 a 100 μm [26] que intensifica la detección de partículas (electrones, iones de H^+ , He^+ , etc.) y la radiación de entrada (desde U.V. hasta Rayos X [8]) por medio de emisión secundaria [26]. La eficiencia de detección de radiación para el rango de 30 a 110 [nm] es del 5 al 15% [26]. Para el caso del uso de una pantalla de fósforo al final de la MCP (fósforo P43 recubriendo una fibra óptica coherente), esta convierte la señal de salida de la MCP en una imagen visible.

Por otra parte, la MCP consta de cuatro canales independientes que pueden ser iniciados por la aplicación de pulsos de activación a diferentes tiempos, lo cual permite adquirir varias imágenes con resolución temporal.

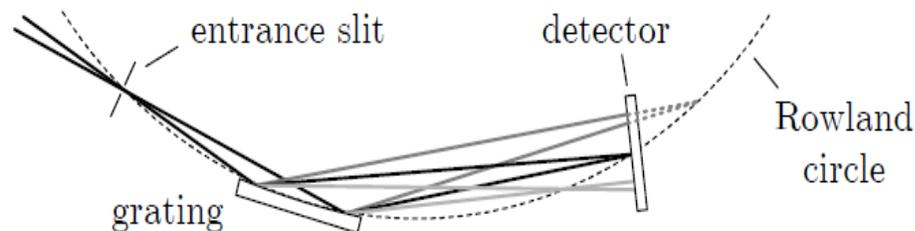


Figura 2. 2: Representación esquemática de un espectrómetro de reflexión de incidencia rasante con un detector (MCP) fuera del círculo de Rowland. Las diferentes longitudes de onda son enfocadas en diferentes localidades del detector plano [9]

En el caso de una MCP, que es plana por definición, es imposible seguir el círculo de Rowland exactamente (Véase Figura 2.5). Para este caso, hay dos configuraciones comúnmente aplicadas: una en la que la superficie del detector es (aproximadamente) tangente a la circunferencia, y otra, en la que la superficie del detector es (aproximadamente) normal a la luz incidente (Véase Figura 2.5).

En el último caso, la luz se enfoca con precisión sólo para una sola longitud de onda, que corresponde al punto donde el círculo de Rowland cruza el plano del detector. No obstante, el uso de ésta configuración sigue siendo bastante utilizada un espectro se puede adquirir en un rango de longitudes de onda relativamente grande para un solo experimento [5]. Además, para garantizar una buena resolución espacial, y para limitar la imagen a la gama de longitud de onda de interés, se pueden utilizar láminas delgadas a manera de filtros de transmisión.

Una vez que las características espectrales detectadas han sido identificadas, los resultados de la espectrometría EUV pueden ser utilizados para estudiar los iones presentes de un elemento en un momento dado del plasma. Sin embargo, una interpretación más elaborada de los resultados requiere tanto la información sobre la sensibilidad (absoluta o relativa) del espectrómetro en el rango de longitud de onda estudiado y un modelo teórico sobre la emisión del plasma en función de sus parámetros básicos.

3.- MONTAJE EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe del montaje experimental para la implementación del espectrómetro de incidencia rasante. En particular se abordaron cuatro puntos importantes para la puesta a punto del sistema de detección espectroscópica de incidencia rasante. En el primer punto se comenzó con el diseño y la construcción de la cámara de vacío que alojará el sistema de enfoque para el espectrómetro, con sus respectivos conectores, acoples y requerimientos para operar en el rango EUV. En una segunda parte se describe el Generador Multipropósito [21] (CCHEN) al cual se montó el espectrómetro para obtener líneas de emisión de los diferentes alambres utilizados en configuración X-pinch. Por último, en una tercera parte, se expone el trabajo de alineación del sistema óptico de incidencia rasante para la puesta en marcha del espectrómetro.

3.1. Diseño y construcción de la cámara de vacío

Para la construcción y diseño de una cámara de vacío para aplicaciones de espectroscopia EUV y VUV y debido a que este tipo radiación no se propaga a través del aire, ésta debe ser transmitida en un ambiente de vacío (Se propaga el 50% de la radiación entre longitudes de onda de 20 a 80 [nm] con una presión de $6 * 10^{-3}$ mbar en una distancia de metro y medio a temperatura ambiente [23]).

En general, para el trabajo en estos rangos de operación, existen requisitos estrictos de vacío. Para la propia cámara, los materiales correspondientes a su fabricación son el acero inoxidable tipo 304L, 316L, 316LN, además de aluminio (series 5000 y 6000) y cobre (OFHC). Además las superficies al interior de la cámara deben ser 'desgasificados' para lograr obtener un valor mayor de vacío. Por otra parte, cada elemento nuevo agregado en la cámara produce una disminución considerable del nivel de vacío de la cámara debido a la humedad

que posee, por lo cual, para cada implementación de elementos nuevos, estos también deben ser 'desgasificados', es decir, introducir estos elementos en la cámara (ya sea actuadores, espejos, soportes, etc.) y aplicar en ellos un vacío por un tiempo no menor a 24 a 48 horas. Otro punto necesario, por tanto, es el uso de guantes para la manipulación de los elementos y así evitar contaminación agregada al sistema.

Para obtener el vacío necesario en los experimentos, se utilizaron dos tipos de bombas: una bomba mecánica seca (que bombea hasta el rango de 10^{-3} [mbar]) y una segunda bomba turbo-molecular Leybold Turbovac 50 (que llega hasta el orden de 10^6 mbar). Para la optimización experimental, se diseñó la cámara de tal manera que la bomba de vacío quede conectada directamente a la cámara, logrando así que el bombeo sea más eficiente.

3.1.1. Diseño de cámara de vacío

Para la cámara de vacío se utilizó un tubo de acero inoxidable 304 de 6" de diámetro SCH 40 (es decir, 7,11 [mm] de espesor) para dar estabilidad estructural al sistema para el trabajo en vacío, además de la compatibilidad de los diferentes elementos de la cámara al momento de soldar. La geometría de la cámara es escogida en simetría cilíndrica por la facilidad de obtención del material además de lograr obtener distancias equidistantes de reflexión del espejo y facilidad de operación. Se diseñaron unos pequeños desgastes en los bordes exteriores de la cámara para reducir el espesor y lograr empotrar dos anillos que fueron usados como flanges de la cámara. (Véase Fig. VI, Anexo). Estos desgastes fueron utilizados al momento de soldar la cámara a los flanges como material a soldar.

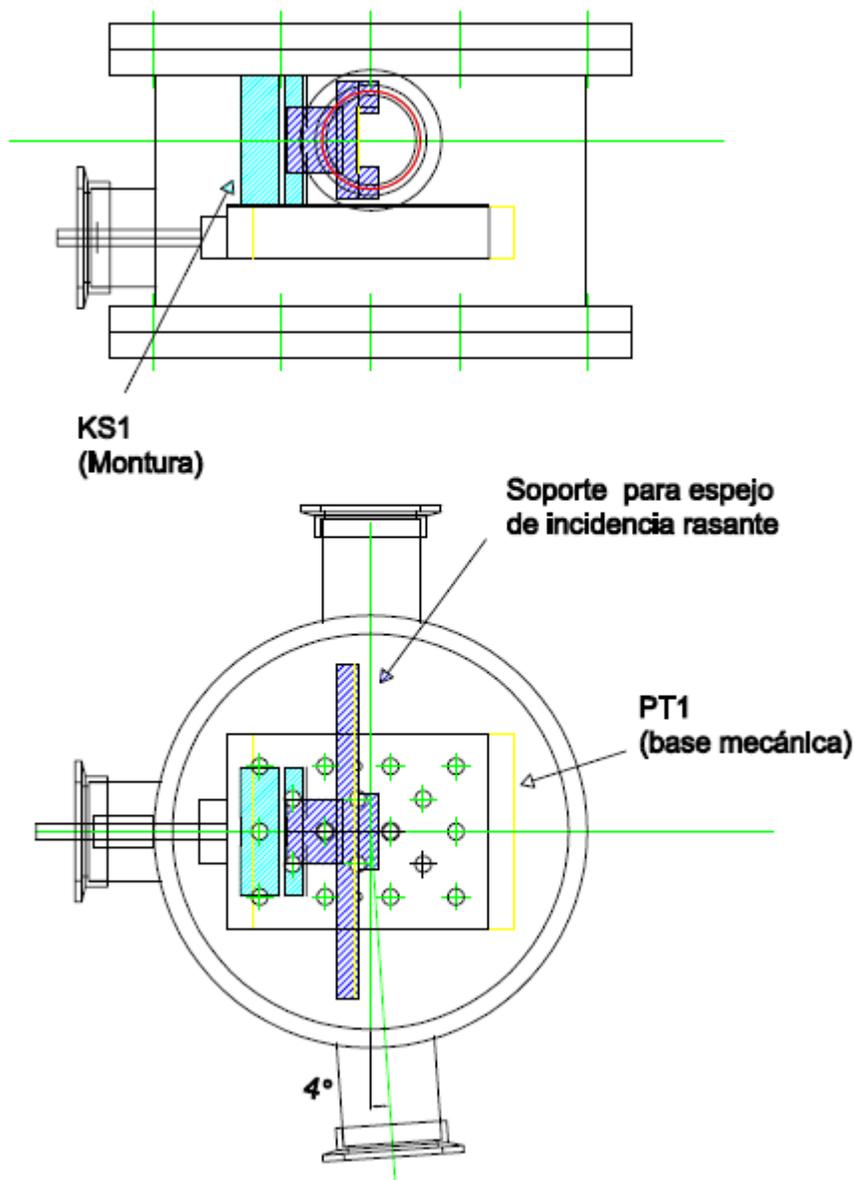


Figura 3. 1: Esquema de la cámara de vacío. La dirección horizontal (horizontal a la cámara) del eje óptico es desplazada por la reflexión (2θ) en un ángulo de 4° . La dirección vertical del eje óptico se mantiene con respecto a la altura de la descarga.

Además, es importante que la radiación emitida por la descarga coincida directamente con la rendija de entrada del espectrómetro, por lo cual se realizó el diseño considerando que la localización del espejo coincida con el eje óptico de la

descarga de plasma, además de que la salida de la cámara corresponda al ángulo de reflexión dado por el espejo de incidencia rasante (2θ) ubicado al centro de la cámara (Véase Fig. 3.1 y Fig. I, Anexo). El ángulo de incidencia rasante a utilizar en el espejo corresponde a 2° , por lo cual la salida de la cámara se desplazó en 4° con respecto al eje óptico (Véase Fig. 3.1). Por otra parte, una tercera salida de la cámara se calculó y diseñó para la implementación de un actuador que trabaje sobre la plataforma del espejo de incidencia rasante (PT1, Véase Figura 3.1). Este actuador, que en este caso se trató de un micrómetro Mitutoyo 150-811ST de 1" de viaje (con una sensibilidad de $1''/1000$ para un ajuste fino), trabajó desplazando la base del soporte del espejo para la correcta alineación del sistema descarga-espectrómetro.

3.1.2.- Diseño para soporte de espejo de incidencia rasante

Por otra parte, se diseñaron los planos para la montura de espejo y componentes al interior de la cámara con sus respectivos ajustadores. El diseño del soporte para el espejo tuvo en consideración que la radiación emitida por la descarga (eje óptico) coincida exactamente con el centro del espejo. El uso de un espejo de enfoque en incidencia rasante se encuentra dado por la necesidad de aumentar la intensidad de la radiación que es llevada al espectrómetro.

La medida del soporte del espejo están hechas para añadir un espejo de 1 [mm] de espesor, con 5" x 1" de tamaño. Para el caso de incidencia rasante, la ganancia obtenida por el enfoque del espejo está dada directamente por el área que este cubre y es capaz de curvar de manera efectiva. Por otro lado, el espejo es soportado por dos apoyos simples en la cara posterior. Estos apoyos son hechos con el mismo material del soporte (de Al, por la facilidad de trabajo mecánico) y son colocados justo a la mitad del largo del espejo (Véase Figura 3.2). Son creados en forma de cuña para minimizar el contacto con el espejo (1

[mm]) y, así, lograr una curvatura con una menor tensión aplicada en los bordes (Véase Fig. III, Anexo).

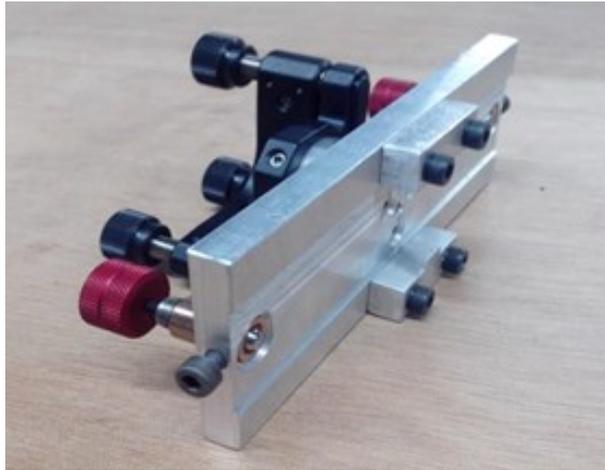


Figura 3. 2: *Fotografía del montaje en Al para el espejo de incidencia rasante. Los actuadores marrones curvan el espejo en la esquina mientras que en el medio se sostiene con la ayuda de las dos barras metálicas con una cuña. Atrás se encuentra soportado por la kinematic mount SK1, la cual aumenta los grados de libertad del espejo.*

En cuanto a la curvatura del espejo, se utilizaron tornillos de $\frac{1}{4}$ "-80, lo que asegura que el paso de ajuste sea lo suficientemente fino para curvar el espejo y lograr generar semi-focos en el espejo, que son enfocados en la rendija del espectrómetro (Véase Fig. III, Anexo).

También se diseñó un 'vástago' que sirviera de apoyo para la base del espejo. Este apoyo fue fijado con pernos cónicos para que no afecten al espejo y logren, en una pequeña sección, fijar el soporte del espejo (Véase Fig. II y IV, Anexo). Se utilizó una barra de diámetro 1" para que pudiera ser montada en una *montura cinemática KS1 Thorlabs*, con 3 ajustadores para mover la orientación del sistema (Véase Fig. 3.1). Este sistema es añadido para lograr generar más grados de libertad en el montaje (en el mismo plano de la rendija del espectrómetro) y así enfocar el espejo de incidencia rasante en el espectrómetro.

Se utilizó de soporte mecánico de todo el sistema (espejo, soporte de espejo y montura KS1 para enfoque) otro montaje que añadiera un grado más de libertad al sistema, en particular, que pudiera barrer en el plano transversal, perpendicular a la dirección de la descarga. Se usó para esto un módulo de *plataforma de traslación* de 1" de viaje modelo PT1 de Thorlabs en el cual se montó todo lo anteriormente nombrado (Véase Fig. 3.1 y 3.6).

Debido a que el espejo de incidencia rasante se curva ligeramente, la luz que proviene de la descarga no puede llegar al espejo directamente en uno de sus extremos (parte de la radiación llegaría en la zona deflectada y generaría sombra en gran parte del espejo), por lo cual fue necesario desplazar el sistema a lo largo de su eje horizontal para lograr que toda la radiación de la descarga logre llegar al espejo. Este corrimiento del eje óptico del sistema es compensado con el uso de la montura KS1, para lograr que la radiación entre en la rendija.

3.1.3.- Diseño de *flanges* y tapas

Se diseñaron las conexiones, tapas y *flanges* que mantienen el vacío en la cámara. Estas partes son importantes en el sistema, ya que su correcto diseño y construcción logran mantener el montaje experimental en condiciones operativas.

Se construyeron dos anillos que fueron utilizados como *flanges* para la parte superior e inferior de la cámara (Véase Fig. VI, Anexo). Se diseñó en ellos el hilo para la unión con las tapas para tuercas M6x8. Se dejó con hilo y no pasante (como la mayoría de los *flanges* de cámaras de vacío) para obtener una mejor manipulación al momento de cerrar y abrir la cámara. Se crearon en cada *flange* dos canales los cuales corresponden al canal para o-ring 2-126 a utilizar y un segundo canal para la soldadura. El canal del o'ring se construyó a partir de las especificaciones técnicas del proveedor.

El segundo canal se realizó al borde interior del anillo (Véase Fig. VI, Anexo) para dejar un pequeño canto de 3 [mm] que posee una altura menor que la altura general del *flange* en 1,5 [mm]. Este canto se dejó para que sea soldado a la cámara y no sea necesario agregar masa para soldar, por lo cual su profundidad es mayor al canal para el o'ring (4,5 [mm]).

Se diseñó además las tapas de cada lado de la cámara. En la parte superior de la cámara se agregó un medidor de presión, por lo cual se añadió en el diseño de la cámara una cavidad para un conector tipo NW40 (Véase Fig. VII, Anexo). Se hicieron los agujeros correspondientes para que quede 'pasante' el perno en la tapa y pueda ser atornillado al *flange*.



Figura 3. 3: Imagen de la parte inferior de la cámara con su respectiva conexión a la bomba turbo-molecular (a la derecha). Se puede apreciar en la conexión el canal hecho para sellar el vacío con un gasket.

La tapa inferior de la cámara se diseñó para una conexión directa de la bomba de vacío turbo-molecular (conexión tipo CF60) al sistema para así obtener una mejor calidad del vacío generado (Véase Fig. 3.3 y Fig. VIII, Anexo). En este caso, se utilizó un gasket de *Viton*© para la unión entre la tapa y la salida de la bomba. Al no ser posible crear una cuña para ‘morder’ los gasket y asegurar el correcto sello del sistema, se diseñó un sistema alternativo de cierre del sistema y mantención del vacío. Puesto que la conexión de la bomba CF60 ya posee la cuña que aprisiona al gasket, se diseñó en la tapa inferior un pequeño canal de profundidad $w = 0,5 [mm]$ y ancho $3,25 [mm]$, ligeramente más ancho que el ancho del gasket para lograr que este se expanda en el canal y la cuña logre sellar el sistema (Véase Fig. VIII, Anexo). De esta manera, el sello sólo lo realiza la cuña de la conexión CF60 de la bomba, mientras que la tapa se diseña estimando la expansión del gasket en el apriete para lograr que quede absolutamente sellada la unión.

3.1.3. Diseño de actuador, acople y conectores.

Se diseñaron además los terminales de la cámara de vacío que serán del tipo NW40 (Véase Fig. V, Anexo). Estos terminales fueron utilizados para unir diferentes partes de la cámara.

Por otra parte, se diseñó el soporte para el micrómetro que sirve de actuador sobre el soporte del sistema del espejo (Véase Fig. 3.4 y 3.5). El objetivo fue desplazar desde fuera de la cámara de vacío, el espejo de incidencia rasante y, con esto, los diferentes elementos al interior de la cámara que soportan al espejo sin pérdida de vacío. Para lograr extender el micrómetro hasta la plataforma de traslado se utilizó un vástago de aluminio que se conectó al micrómetro y actuó sobre la plataforma. Para trabajar en vacío en el rango dinámico se usó la técnica

de doble o'ring en el micrómetro, para así lograr un doble sello entre el ambiente y la cámara.



Figura 3. 4: Imagen del soporte fabricado para el micrómetro. El micrómetro se encuentra fijo gracias al uso de tres prisioneros radiales sobre su base de sujeción. El vástago del micrómetro actúa libremente en la cámara.

Se diseñó un soporte mecánico para el micrómetro con diseño de tapa de conector NW40. Este modelo exige el uso de un o-ring para ese terminal y las dimensiones correspondientes. Además, se agregó una abertura que cambia de diámetro, en el cual, el diámetro mayor corresponde a la sección de sujeción mecánica del micrómetro (que es aprisionado con tres prisioneros radiales M4 como se ve en la Figura 3.5), mientras que el diámetro menor corresponde al vástago mismo del micrómetro que es móvil. Dentro de la misma pieza se crearon dos canales para o-ring 2-008 que sellan el vacío. El uso de doble o-ring es usado para el caso de régimen dinámico donde, al mover el micrómetro, había pérdidas de vacío en el sistema. Un segundo o-ring actúa asegurando el vacío del interior y estableciendo una sección intermedia entre la presión atmosférica y el vacío, asegurando de esta manera, si hubiesen pérdidas de vacío en el movimiento, éstas no sean entre la misma cámara y el exterior.

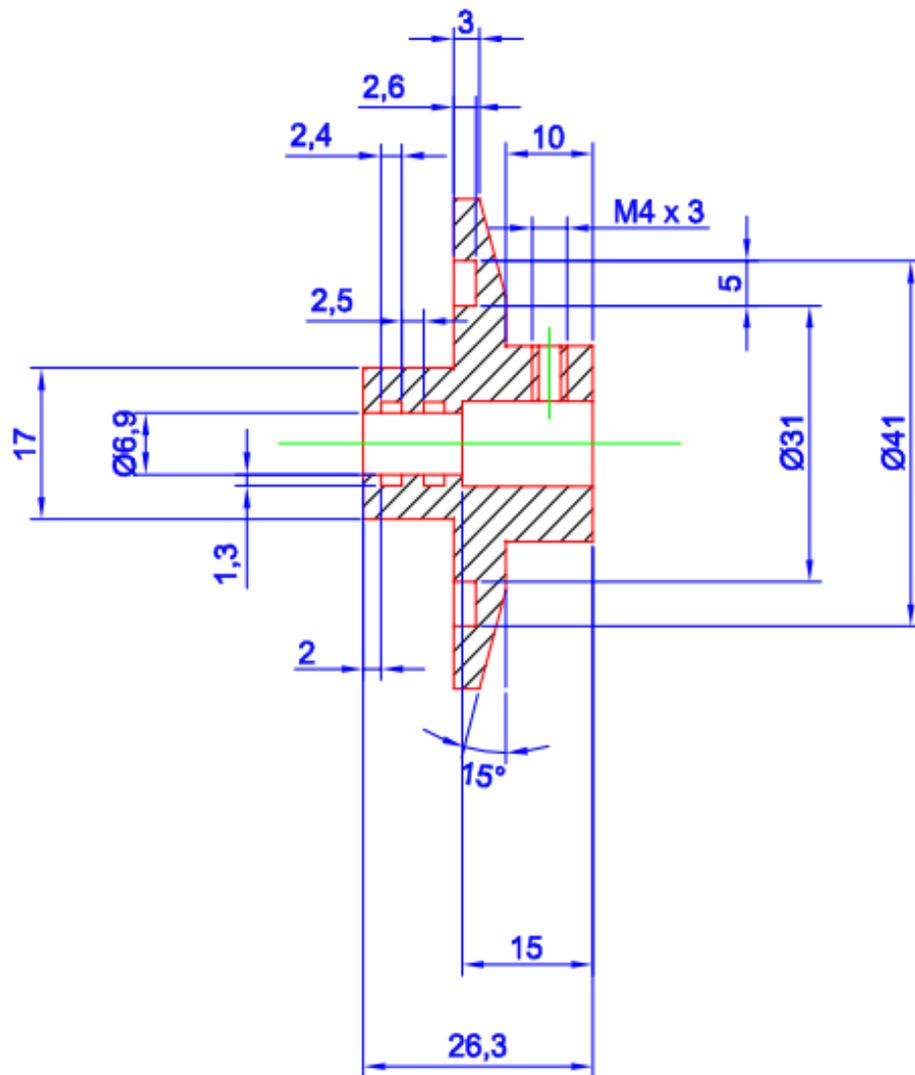


Figura 3. 5: Extracto del plano para el soporte del micrómetro. Se estima los valores necesarios para usar o-rings en forma de anillo a través del micrómetro como se ve en la figura. Se diseña la pieza conservando los valores estándar para los terminales NW40

Se diseñó además un soporte para la base PT1, que se fijó con la ayuda de pilares a la misma cámara y funciona haciendo una contrafuerza a la fuerza aplicada por el micrómetro y que desplaza el sistema PT1. Sin base, el sistema no volvería a restituirse y, por su peso, sería incapaz de lograr sostenerse sólo por el uso del micrómetro (Véase Fig. X, Anexo). Es importante en este diseño de la

parte superior de este soporte tipo mesa quede plano para que así la parte móvil del PT1 pueda avanzar y retroceder en la cámara.

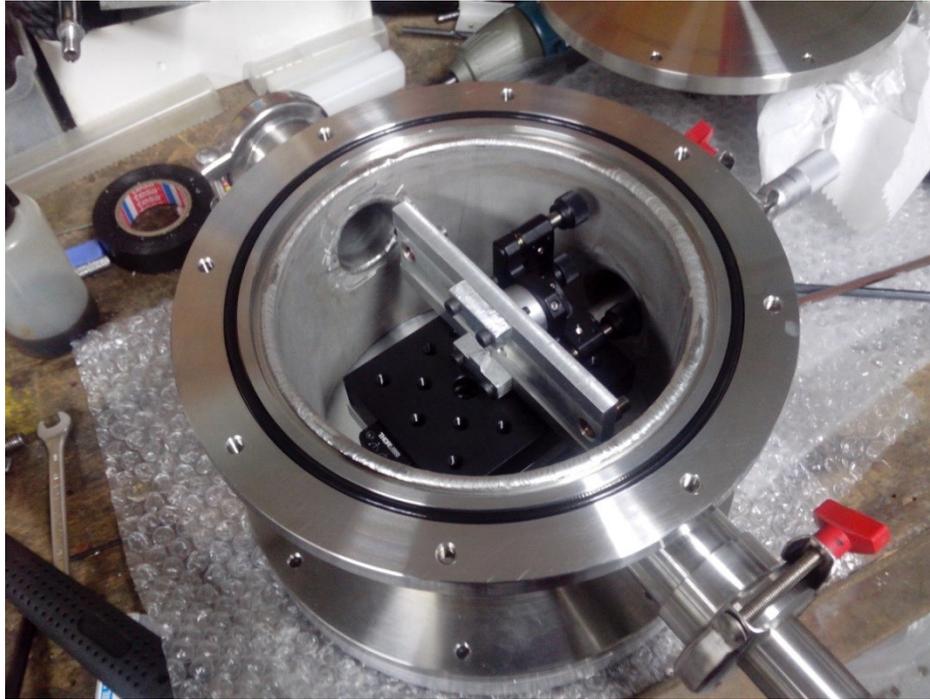


Figura 3. 6: Fotografía del montaje experimental para el espejo dentro de la cámara de vacío. La salida de la cámara de vacío se dispone a 4° con respecto a la entrada. El soporte KS1 ayuda a dar dirección al espejo, mientras que el soporte PT1 trabaja como actuador lineal desplazando todo el montaje al interior con la ayuda del micrómetro.

Este soporte fue fijado a la cámara mediante cuatro barras de aluminio, las cuales en su parte interior fueron adosadas con un prisionero para ser fijadas la cámara. La parte superior de las barras fueron fijadas mediante el uso de pernos cónicos, puestos en el mismo soporte (Véase Fig. X, Anexo). La entrada del espectrómetro posee un flange sin medida estándar, por lo cual se construyó un acople entre la salida de la cámara de vacío (NW40) y la entrada del espectrómetro (Véase Fig. XI, Anexo). El acople debía ser lo más corto posible para poder mirar, a través de

la cámara de vacío, la rendija del espectrómetro al momento de alinear el sistema. En el momento de enfocar todo el sistema, la línea de enfoque que genera el espejo de incidencia rasante debía coincidir con la rendija de 10 μm del espectrómetro.

Esta alineación debía ser “visual” y se realizó con un láser de He-Ne (Véase sección 3.3, Calibración del sistema óptico), por lo cual, el hecho de poder mirar aunque sea por la parte superior de la cámara la rendija del espectrómetro es vital para poder realizar la alineación.

3.2. Características del Generador Multipropósito (X-pinch) y montaje experimental de la descarga

Para comenzar el estudio y caracterización del espectro EUV de descargas de plasma en la CCHEN, se montó el sistema de la cámara de vacío (en conjunto con el espectrómetro) en el Generador Multipropósito del DPTN [21] que se puede ver en la Figura 3.7.

Las características eléctricas principales del generador son:

- Capacidad $C = 1.2 [\mu F]$,
- Inductancia $L = 47.5 [nH]$,
- Voltaje de carga $V = 30[kV]$,
- Energía almacenada $E = 500 [J]$,
- Impedancia $Z = 0.2 \Omega$,
- Corriente peak $I = 180 [kA]$ y
- $dI/dt \sim 10^{11} A/s$ con un cuarto de periodo de $T/4 = 375 [ns]$.

El dispositivo cuenta con cuatro condensadores dispuestos paralelamente (Véase Fig. 3.7) y que son descargados mediante el uso de un *spark-gap* (o *interruptor de alto voltaje*) [27] que se utiliza con una presión de 0.8 [bar] para las descargas. La tapa superior de la cámara de descarga (Véase Fig. 3.7) cuenta con una bomba turbo-molecular, por lo cual el sistema completo (incluido el espectrómetro y la cámara del espejo) consta de dos bombas turbo más sus respectivas bombas mecánicas.

Se detectó en este dispositivo, con la ayuda de una cámara pinhole filtrada, la emisión de rayos x blandos para arreglos de alambres de W (7,5 μm) y Al (25 μm) para energías mayores que 3 [keV], es decir, longitudes menores a 0.4 [nm] [14] y, en otro trabajo con un filtro de Mylar de 1 [μm], energías mayores a 0.9 [keV] [27] (es decir, $\lambda < 1,4$ [nm]), por lo cual se plantea como buen candidato para la emisión de radiación en regiones de alta energía. Con un voltaje de carga de 24kV, se observaron corrientes de hasta 122kA en 450 [ns] desde el comienzo de la descarga [27].

Se montó entre la cámara de descarga (Véase Fig. 3.8) y la cámara de vacío una válvula que separa dichas cámaras con el fin de no perder el vacío al momento de cargar alambres en la cámara de descarga.

Al final de la válvula se conectó una “tee” NW40, que une la válvula con el sistema de cámara para el espejo (Véase Fig. 3.8). Esta tee fue utilizada para añadir filtros entre la descarga y el espejo y lograr filtrar parte de la radiación emitida (para su estudio en alguna región de interés) como también para proteger la MCP y la red de difracción del daño que se puede generar por la vaporización de los alambres. Luego de la cámara, se instaló el acople reductor desde el espectrómetro a la cámara (NW40) y, por último, el espectrómetro de incidencia rasante off-Rowland-circle GISVUV1 con radio de Rowland de 0,5 [m], ángulo de incidencia rasante de 4 grados, rango espectral de 30 - 800 Å y resolución espectral $\lambda/\Delta\lambda = 100$ lo cual indica la capacidad de distinguir entre dos longitudes de onda diferentes: λ y $\lambda + \Delta\lambda$. En el espectrómetro se instaló un segundo medidor de presión para

monitorear el vacío en el sistema cámara de vacío-espectrómetro para el caso de uso de válvula.



Figura 3. 7: Fotografía del Generador Multipropósito del departamento de plasmas termonucleares (DPTN) de la CCHEN. Se observa la disposición horizontal de los cuatro condensadores de $0,3 \text{ } [\mu\text{F}]$ alrededor de la cámara de descarga.

Por último, se instaló a la salida del espectrómetro una MCP con cuatro *strip* o canales (Véase Figura 3.9) que es usado para la adquisición de espectros en diferentes momentos de la descarga, con un tiempo de integración para cada

canal de 5 [ns] [27]. El tiempo de demora (delay) para la MCP entre los strips está dado por la longitud de cables coaxiales que llegan a la MCP. Puesto que en cada 1 metro de cable, la señal es retardada en 5 [ns], los cuatros canales de la MCP que salen desde el *Gating Pulse Generator* poseen diferentes longitudes que aumentan en 3 [m] cada uno con respecto al otro, logrando así un retardo en cada canal de 15 [ns] con respecto al canal anterior y un rango total de [60 ns] de rango temporal total por descarga.

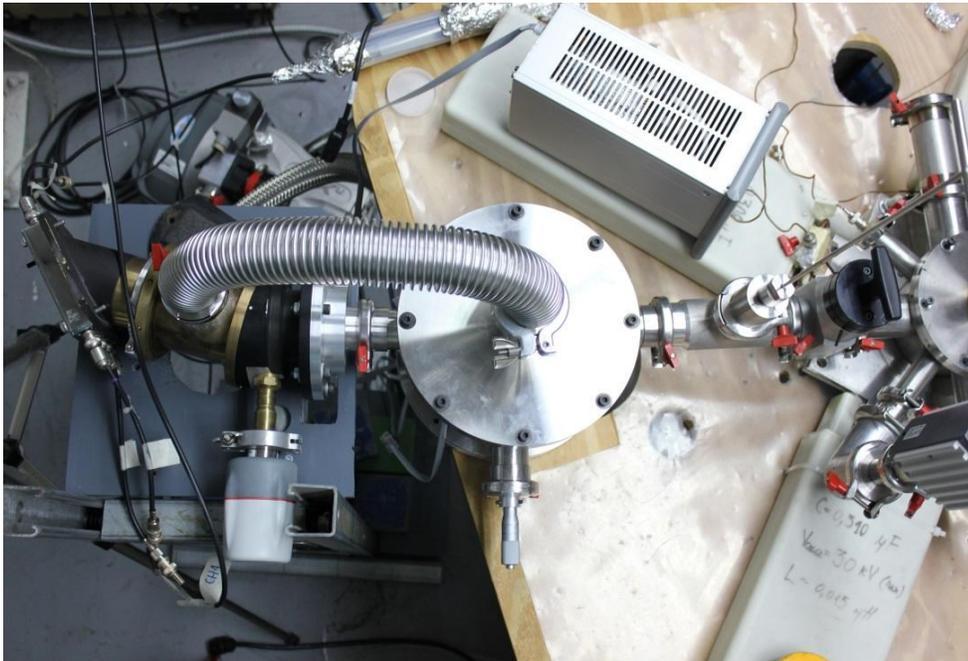


Figura 3. 8: *Fotografía del montaje de la cámara de vacío que aloja el espejo de incidencia rasante con respecto a la cámara de vacío de descarga. Se instala entre las cámaras una válvula para separar los ambientes (manilla negra a la derecha) y una tee con un filtro (manilla metálica delgada) que puede ser bajada y acomodada en el camino óptico de la descarga hacia el espejo.*

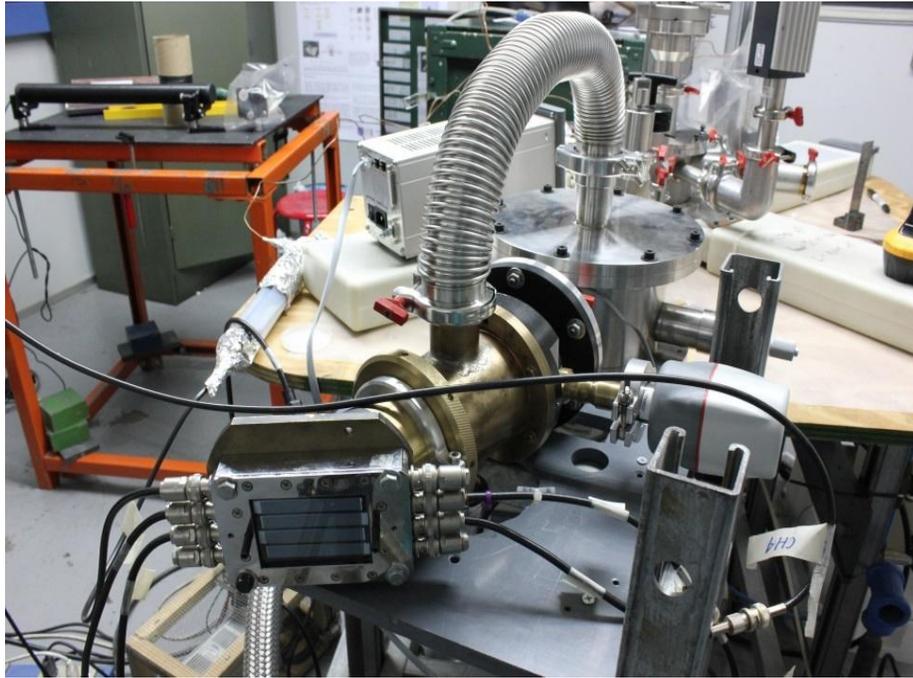


Figura 3. 9: *Fotografía de la conexión del espectrómetro a la cámara de vacío. Se conectan los cuatro strip de la MCP con distinto delay. Además se conecta un medidor de vacío directamente en el espectrómetro.*

El retraso o *delay* del strip o canal 1 (CH1) está dado por la *unidad de delay*, que entrega un retardo de la señal con respecto al inicio de la descarga [27]. El *delay* posee un contador que multiplica por $\times 50$ [ns] la señal de trigger de inicio de la descarga y la envía al generador de pulso que emite las cuatro señales para cada canal de la MCP. Por ejemplo, se puede usar un delay de 120 [ns] de inicio de la descarga para que el generador de pulso envíe las señales correspondientes a la MCP. Cada canal de la MCP tiene un delay con respecto a su canal antecesor de 15 [ns], por lo cual, en el rango temporal para cada canal es este caso fue de 120 [ns] para el CH1, 135 [ns] para el CH2, 150 [ns] para el CH3 y 175 [ns] para el Ch4 con respecto al inicio de la descarga.

Luego, a la salida del CH1 de la MCP se conectó a un divisor resistivo que es conectado a uno de los canales del osciloscopio. Con esto, se puede verificar el momento de observación de la MCP (para el CH1) con respecto a la evolución de la descarga. En general, este valor es distinto al valor de retraso impuesto en la *unidad de delay* debido a la incerteza en el inicio de los pulsos al utilizar un spark-gap como interruptor, además del retraso de la señal de la caja de trigger debido a la electrónica. A esta incerteza se le denomina jitter [27],
Por esto, se toma como referencia la señal del pulso desde el CH1 de la MCP al osciloscopio como dato de observación temporal de los espectros.

3.3. Alineación del sistema óptico con de láser He-Ne

Para lograr que la radiación emitida por la descarga de alambres se enfocara adecuadamente en la rendija del espectrómetro de 10 [μm], se debió alinear todo el sistema óptico que va dentro del sistema de vacío con el uso de un láser de He-Ne. Se montó el láser en una mesa óptica (como muestra la Figura 3.11) con la ayuda de dos espejos a la salida del láser y un tercer espejo a la entrada de la cámara de descarga, se alineó el láser con respecto al eje óptico de la cámara (que corresponde al centro de arreglo de alambres, donde se forma la 'equis' al cruzarse). Luego de que el láser logró pasar por dicho eje, se hizo incidir el láser en el espejo y fue ajustado para que la salida del espejo tenga los 4° de incidencia rasante requeridos por la geometría de la cámara.

Se procedió a curvar el espejo logrando una curvatura que permitiera el enfoque de la luz sobre el plano de la rendija. La curvatura debía ser mínima en el espejo, ya que un mayor valor de curvatura entrega que los dos semi-focos o área que comprende el área de reflexión del espejo comiencen a alejarse el uno al otro. Cuando se ha maximizado el enfoque, las dos líneas de reflexión del espejo coinciden en sólo una línea, obteniendo una ganancia de radiación por la luz

acumulada en el área del espejo. Además, la emisión de luz que viaja por el eje óptico de la cámara debe estar alineada con el espejo para lograr, con la ayuda de su curvatura, una mayor ganancia de intensidad en el área de enfoque del espejo (Véase Fig. 3.10).

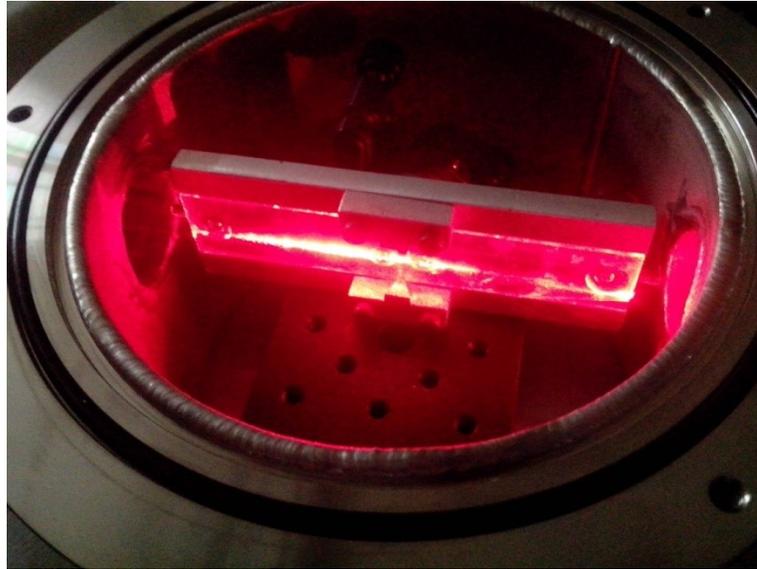


Figura 3. 10: Fotografía de la alineación del espejo de incidencia rasante con láser de He-Ne. La mayor intensidad del láser queda en el centro del espejo para adquirir mayor ganancia en intensidad.

Cuando se logró encontrar la curvatura exacta para la cual el sistema se enfoca se procedió a posicionar la línea de enfoque del espejo de incidencia rasante en la rendija del espectrómetro. Es este caso, se hizo coincidir la línea de enfoque justo en la posición de la rendija.

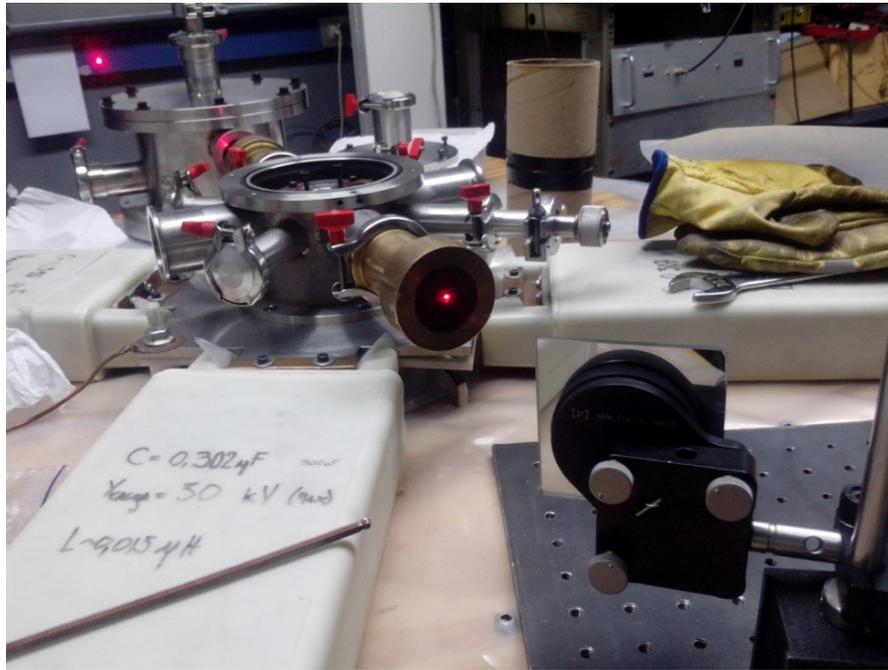


Figura 3. 11: Fotografía de la alineación de la óptica del sistema usando un láser de He-Ne. La luz que entra a la cámara de descarga debe mantener el eje óptico de descarga y salir por el espectrómetro.

Posteriormente, con la ayuda del micrómetro, se pudo desplazar la línea de enfoque en el plano de la rendija para lograr que entre el máximo de radiación posible y la razón señal/ruido sea maximizada en los canales de la MCP.

4.- CALIBRACIÓN DEL ESPECTRÓMETRO DE INCIDENCIA RASANTE

En este capítulo, se establece una calibración para los resultados experimentales obtenidos, es decir, la conversión a longitudes de onda de los espectros obtenidos con la configuración del espectrómetro. Este capítulo consta de tres partes. En una primera parte, con los valores de dispersión de las radiación difractada y usando la ecuación para la dispersión en un círculo de Rowland, se determina el rango de longitudes de observación para cada red del espectrómetro. Una segunda sección trata del uso de un láser de Nd-YAG (1064 [nm], 1,2J, 8[ns]) para generar plasma en blancos de Cu y Al como método de obtención de líneas espectrales que puedan ser utilizadas como referencia para los elementos de carga del X-Pinch. En una tercera parte, se establece la calibración definitiva para el espectrómetro usando un espectro de Al de 25 μm (X-Pinch) en el cual se identifican, además, los iones de aluminio presentes para un tiempo particular una vez iniciada la descarga.

4.1. Calibración geométrica y determinación del rango de longitudes de onda (λ).

Se realizó una estimación de la dispersión lineal de la red de difracción del espectrómetro de incidencia rasante, a partir de la geometría del sistema dada por la fuente de luz difusa (X-PINCH en el momento de ablación de los alambres) que

proviene de la descarga. Se puede determinar a partir de la distancia de la rendija (que se encuentra inscrita en el círculo de Rowland) a la red de difracción y desde la red de difracción la distancia de la proyección de la dispersión de la luz en la cual llega al plano de la MCP. Para esto se tomaron las mediciones completas del espectrómetro, además de las dimensiones y posiciones de la red de difracción (Véase Fig. 4.1).

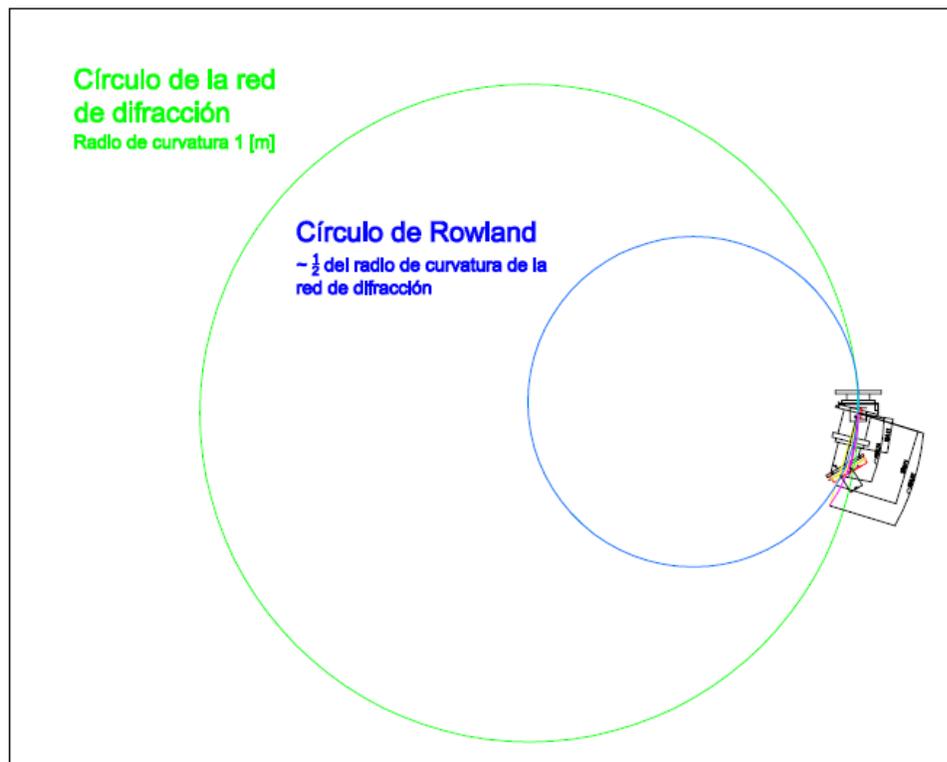


Figura 4.1: *Proyecciones a partir de la red de difracción del espectrómetro de su radio de curvatura (verde) y correspondiente círculo de Rowland (azul).*

En la Figura 4.2. se muestra las proyecciones de la longitud de los arcos a partir de los puntos en donde aparecen líneas espectrales en la MCP. Los bordes rojos corresponden a las dimensiones de la MCP adherida al espectrómetro (de borde

negro). La red de difracción de 30x40x10 [mm] aparece también en rojo en el diagrama (Véase Fig. 4.2). Esta posee el ángulo de incidencia de 4°

Tanto el radio de curvatura de la red de difracción (1 [m]), como su círculo de Rowland (0,5 [m]) aparecen en el diagrama como círculos centrados en la red de difracción de color verde (Véase Fig. 4.1 y 4.2). Puesto que las longitudes de onda y la dispersión son circunscritas en el propio círculo de Rowland y la MCP se encuentra en 45° con respecto al círculo, es necesario proyectar las longitudes de onda que llegan fuera del mismo círculo (Off-Rowland-Circle). Esto se realiza proyectando directamente las zonas donde se ubica el sensor de la MCP hacia la red de difracción (líneas amarillas) y tomando la intersección con el círculo de Rowland (círculo verde menor) como la distancia recorrida de dispersión del sistema.

La zona azul en la MCP (Véase Fig. 4.2) corresponde a las distancias, medidas experimentalmente, en donde aparecen líneas espectrales en los *strips* de la MCP. Por lo cual se tomaron como referencias las proyecciones de la red de difracción (líneas magentas) a la profundidad de los sensores de la MCP (línea roja). Se midieron las longitudes de difracción que corresponden a las intersecciones de las proyección de la luz de la red de difracción (líneas magentas) con respecto al círculo de Rowland (amarillo) usando un software de diseño numérico. Estas distancias son de $l_1 = 130,77 [mm]$ hasta los $l_2 = 229,71 [mm]$ (Véase Fig. 4.2).

Usando la ecuación de dispersión para una red de difracción clásica, con modificación a los parámetros para un espectrómetro de incidencia rasante [28], se tiene que las longitudes de onda para el primer orden de difracción están dadas por:

$$\lambda [A] = \frac{10^7}{D} * [\sin(\alpha) + \sin(\beta)]$$

$$= \frac{10^7}{D} * [\sin(\delta_{gr.inc.}) - \sin(\cos^{-1}(l_n/D_{Rowland}))]$$

Luego, reemplazando los valores en la ecuación, con $D = 300 [l/mm]$ (el espectrómetro consta de tres redes de difracción de 300, 600 y 1200 $[l/mm]$), $\delta_{gr.inc.} = 86^\circ$ (el ángulo de incidencia rasante con respecto a la normal), $D_{Rowland} = 1[m]$ el diámetro del círculo de Rowland y l_n las longitudes de arco de dispersión de la red de difracción (Véase Figura 4.2), se tiene que la región de observación de la MCP en longitudes de onda para las tres diferentes redes de difracción son:

$$20,5 [nm] < \lambda_{(300 \frac{l}{mm})} < 81,2 [nm]$$

$$10,3 [nm] < \lambda_{(600 \frac{l}{mm})} < 40,5 [nm]$$

$$5,1 [nm] < \lambda_{(1200 \frac{l}{mm})} < 20,3 [nm]$$

Esta calibración geométrica se utilizó para obtener el rango de longitudes de onda en la región de trabajo de la MCP para las distintas redes de difracción. Cabe notar que para la red de 300 l/mm , el rango espectral obtenido con la calibración se asemeja a los valores entregados por el fabricante (20 a 80 $[nm]$).

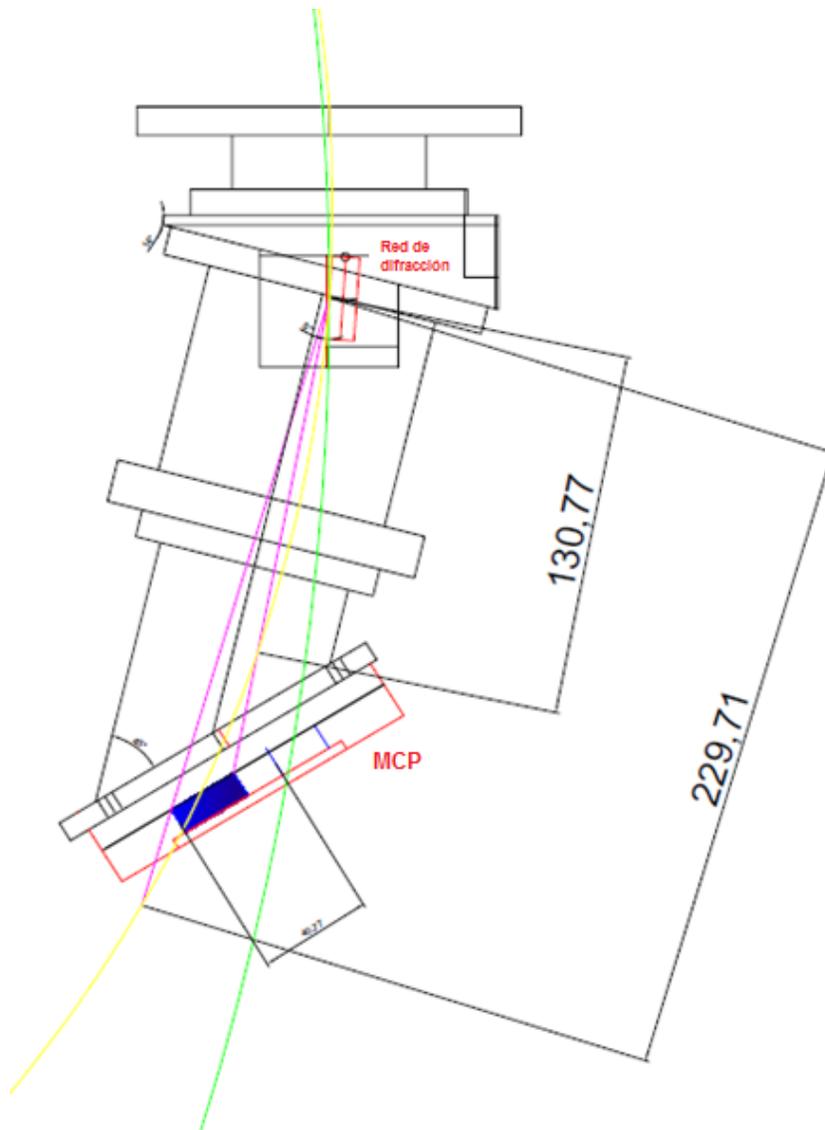


Figura 4.2: Proyecciones de los haces de difracción que llegan a la MCP (líneas amarillas) con respecto a su círculo de Rowland (línea verde). Estas longitudes corresponden a las distancias de difracción de la radiación con respecto a la red de difracción y muestran la dispersión que posee las longitudes de onda.

4.2. Adquisición de espectros de plasma producido por láser para calibración.

Para lograr encontrar una calibración de los espectros, se diseñó un experimento con la ayuda de un láser de Nd-YAG (1.06 μm , 1.2 [J], 8 [ns]) en el cual son ablacionados blancos de Cu y de Al dispuestos en la zona de X-pinch en la cámara de descarga (Véase Fig. 4.3) para generar plasma. Este láser emite radiación en el infrarrojo con una longitud de onda de 1064 [nm], mientras que, con la ayuda de un cristal doblador de frecuencia emite su segundo armónico de 532 [nm] el cual puede servir para alinear el láser. La energía del láser para la longitud de onda de 1064[nm] es de 1,2 Joule.

Estos blancos fueron ubicados en el mismo lugar donde estaban los alambres para el X-pinch, con un ángulo de 45° respecto a la entrada de espectrómetro, de tal forma que la emisión del plasma producido por el láser, fuera emitido en la dirección del espectrómetro. Se tuvo la precaución de que el ángulo entre la entrada del láser y la salida hacia la cámara no sea exactamente los 45° para que parte de la propagación del láser que puede ser reflejada no llegue al espejo.



Figura 4.3: Blancos utilizados con el láser de Nd-YAG. A la izquierda, target de Cu con una oblea de Silicio. A la derecha, target de Al. Se puede observar en qué punto golpea el láser y ablaciona el material.

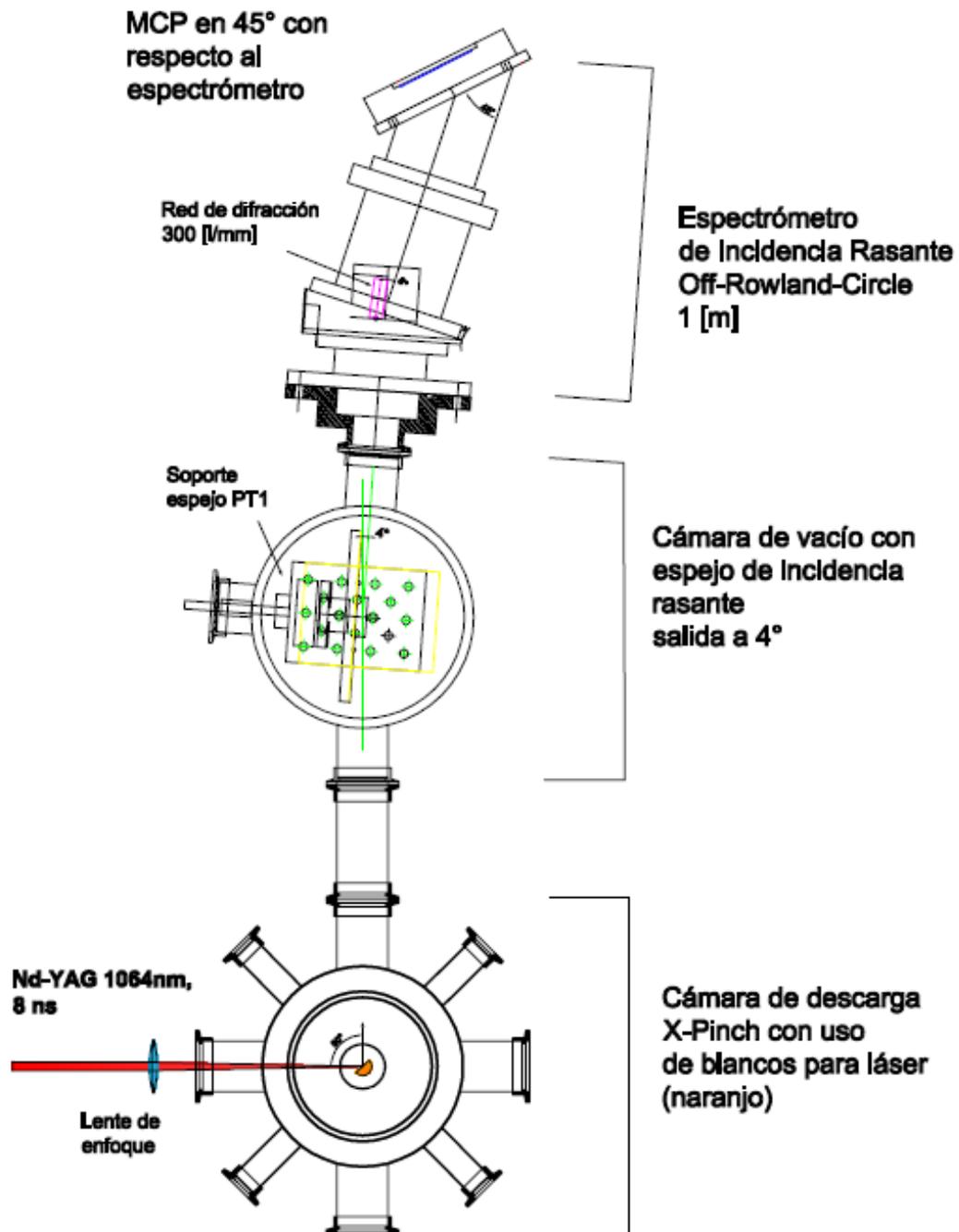


Figura 4. 4: Esquema del experimento al usar el láser de Nd-YAG (1064 [nm], 8 [ns]) para generar plasma en los blancos de cobre y aluminio dispuestos en la zona central de la cámara de descarga.

El láser fue direccionado a la cámara de descarga y enfocado justo en el target. (Véase Fig. 4.4). La potencia del láser es 1,2 J por nanosegundo. El área de enfoque del láser es $\sim 1 [mm^2]$, por lo cual la irradiancia I (potencia transmitida al target en un área) para los pulsos de 8 [ns] con los cuales se golpea al target es de $\sim 15 \frac{GW}{cm^2}$.

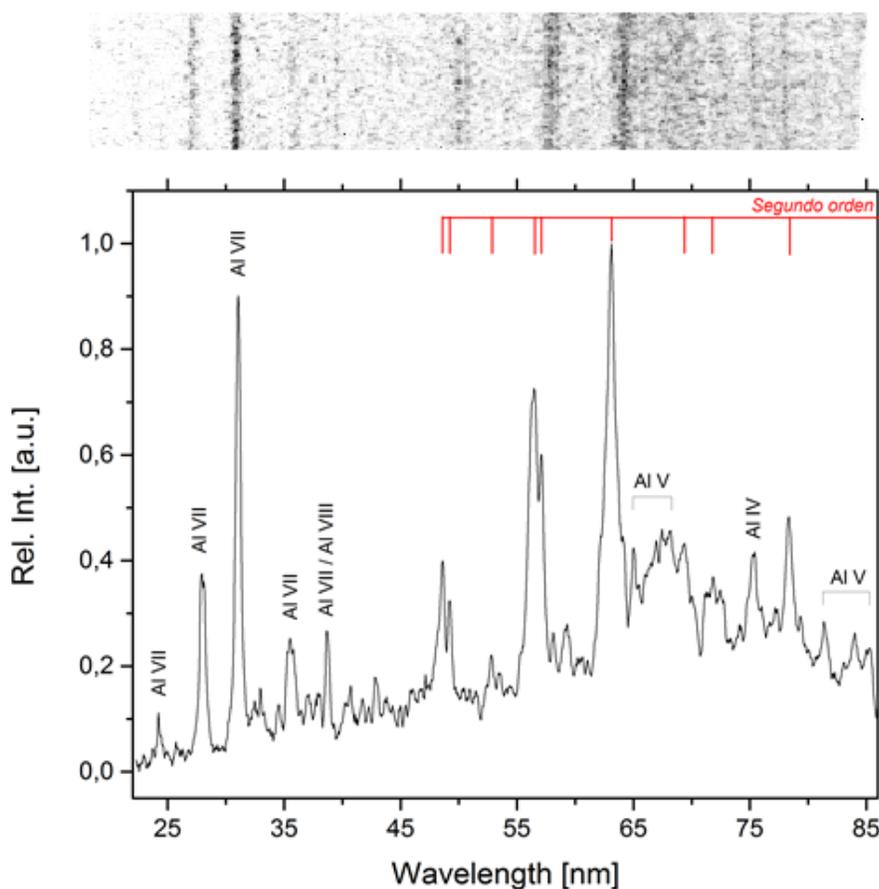


Figura 4. 5: *Especro obtenido con target de Al. En la parte superior, imagen del primer strip de la MCP para el plasma producido con el láser de Nd-YAG sobre el blanco de aluminio. En la parte inferior, perfil de intensidad del strip con su respectiva calibración.*

Los blancos fueron dispuestos en la cámara y, luego de alinear correctamente el sistema óptico y generar vacío en la cámara de descarga, se procedió a disparar los pulsos de láser. Se dispone de la MCP a la salida del espectrómetro y, usando una cámara fotográfica con el obturador abierto, se obtuvieron los espectros para disparos de targets de Cu y Al.

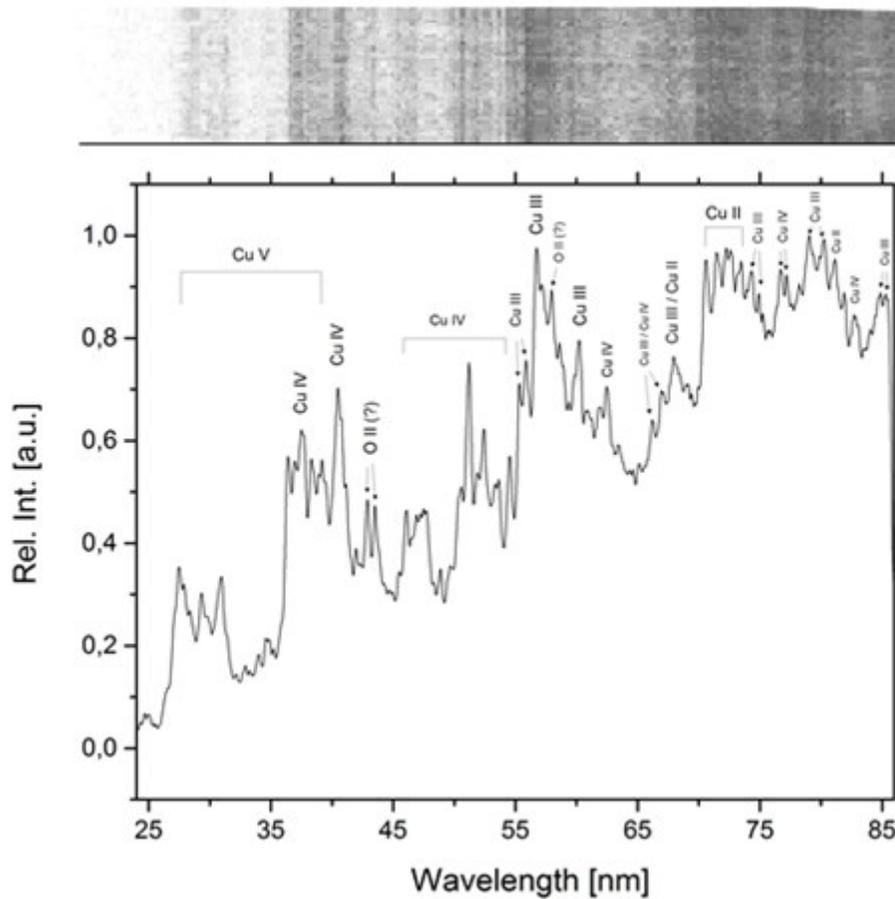


Figura 4. 6: Espectro obtenido con target de Cu. En la parte superior, imagen del primer strip de la MCP. En la parte inferior, perfil de intensidad del strip con su respectiva calibración

En el caso del target de Al, el espectro obtenido para el Ch1 se muestra en la Figura 4.5 con su respectivo perfil de intensidad. En el espectro aparecen líneas de emisión que pertenecen a la ablación del target de Al.

Se buscó en los espectros líneas que correspondan a los elementos para lograr discriminar entre líneas constituyentes de las cargas de X-pinch (Cu y Al) de otras líneas de emisión recibidas por la MCP que pueden provenir de excitación y posterior emisión de otros elementos que pueda contener la cámara de descarga.

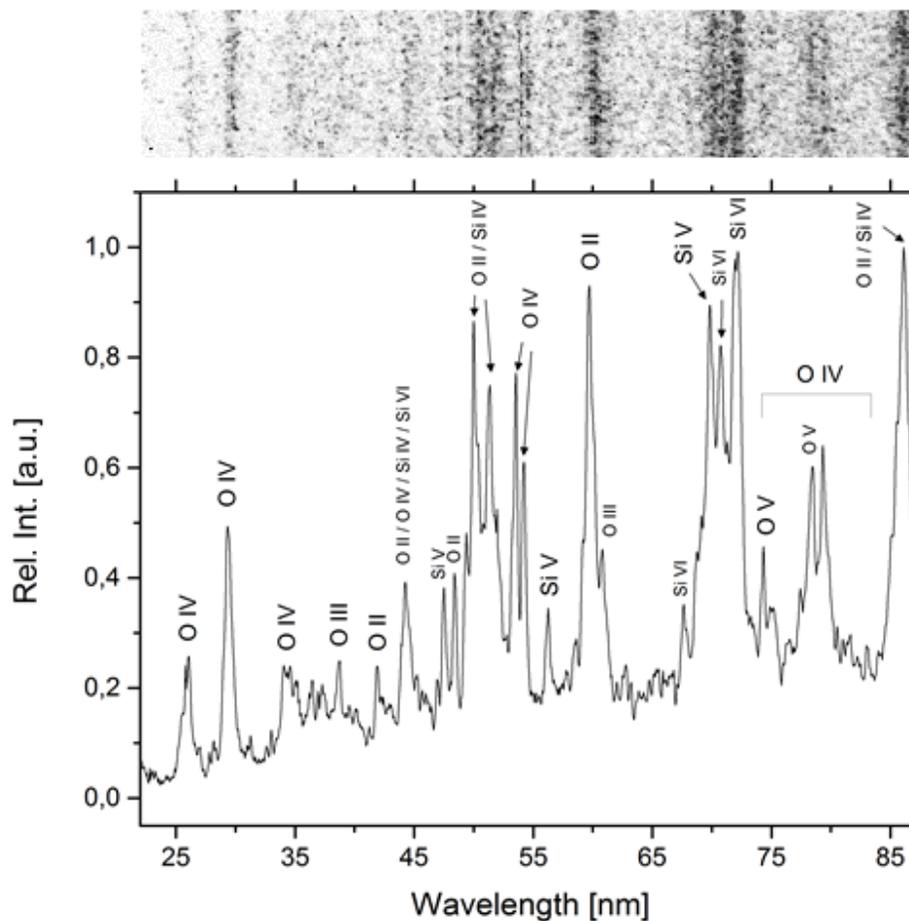


Figura 4. 7: *Espectro obtenido con target de Si monocristalino. En la parte superior, imagen del primer strip de la MCP. En la parte inferior, perfil de intensidad del strip obtenido con ImageJ.*

Luego, se utilizó el target de Cu para realizar las mediciones. Debe considerarse que una pequeña variación en el enfoque del láser (desplazamiento del lente que enfoca el láser en el blanco) sobre el blanco produce que existan líneas de emisión. Además, como todo el sistema fue alineado con el segundo armónico del láser en 532 [nm], la posición de enfoque establecida sobre el target debe ser desplazada debido a que para el caso de la emisión en el infrarrojo, el punto de enfoque se encontrará levemente desplazado.

Para el caso del espectro obtenido con el target de Cu, este es casi idéntico al obtenido experimentalmente con el X-pinch (Véase Fig. 4.6). Con esto se logra ver que casi todas las líneas experimentales corresponden a emisiones de transiciones energéticas en el cobre-

Se agregó al target de Cu una película de silicio monocristalino para estudiar un espectro 'puro' y lograr distinguir líneas espectrales. Se realizó el montaje manteniendo toda la superficie del target con la oblea de silicio como se ve en la Figura 4.3. El espectro obtenido se puede ver en la Figura 4.7 en donde se puede apreciar que la forma del espectro es diferente.

4.3. Comparación de espectros: Plasma producido por láser y X-pinch de aluminio de 25 μm (300 [I/mm])

Para lograr calibrar los espectros se utilizó como primer recurso el programa *SPECTRA ANALYSIS SOFTWARE* de Fernando Tomasel, de Colorado State University. Este programa consta de dos grandes bases de datos de espectros tabulados. La primera base de datos proviene del *Atomic Emission Lines Below 2000 Angstroms: Hydrogen through Krypton* de Kelly, R. L. y Palumbo, L. J., la cual contiene todas las líneas espectrales de libro, mientras que la segunda corresponde a todas las líneas de referencia que se encuentran en el NIST [29] hasta los 2000 [nm].

El programa funciona cargando los archivos de las intensidades de los espectros como base de datos ASCII, por lo cual, se cargaron los espectros como base de datos de una columna en '.txt' a partir de la transformación en intensidad de los pixeles hecha en *ImageJ*.

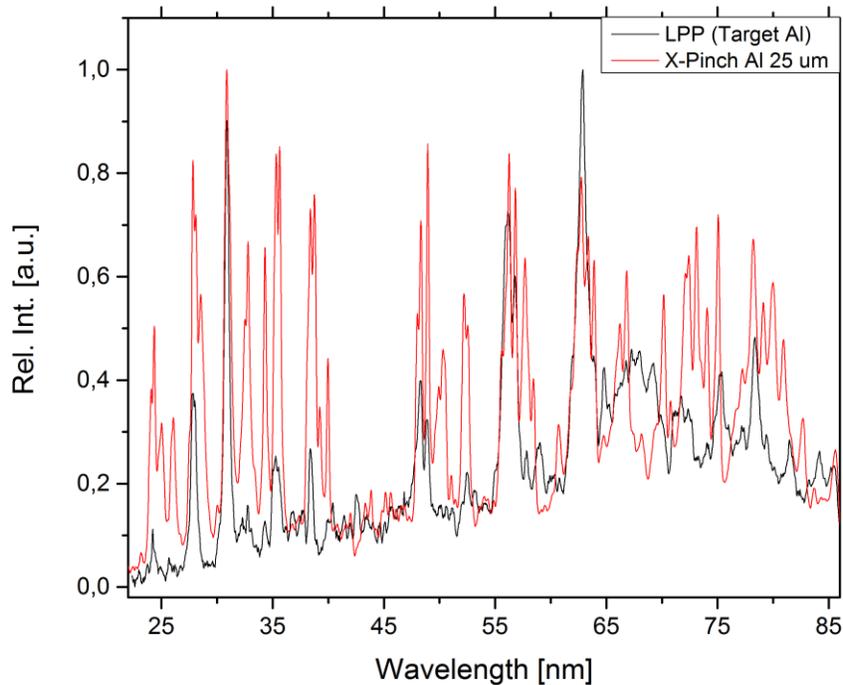


Figura 4. 8: Comparación de espectros de plasma generado por láser (LPP) y X-Pinch de Al de 25 μm .

Usando el rango espectral obtenido en la calibración geométrica del espectrómetro, además de la observación de líneas de aluminio obtenidas con el método de generación de plasma con láser, se calibró el espectro de Al de 25 μm obtenido en el X-Pinch. Primero, se identificaron líneas de una alta intensidad relativa en la región (a partir de la información del NIST [29]) correspondientes a un mismo ion y que posean la distribución de las líneas que aparecen en el plasma generado por láser (LPP). Se encuentra que el ion de aluminio VII posee

cinco peaks identificables (véase Figura 4.8) al igual que poseen una distribución parecida a la obtenida con el LPP por lo cual estos peaks son utilizados para la calibración.

Posteriormente, se identificaron también líneas correspondientes al ion de Al VIII como se ve en la Figura 4.9. La calibración obtenida muestra iones de Al VI (con una energía de ionización de $E_{ion} = 190,5 [eV]$), Al VII ($E_{ion} = 241,8 [eV]$) y Al VIII ($E_{ion} = 284,6 [eV]$) en la región de 20 a 85 [nm] para el espectro de Al de 25 μm con un tiempo de 84[ns] después del inicio de la corriente (di/dt).

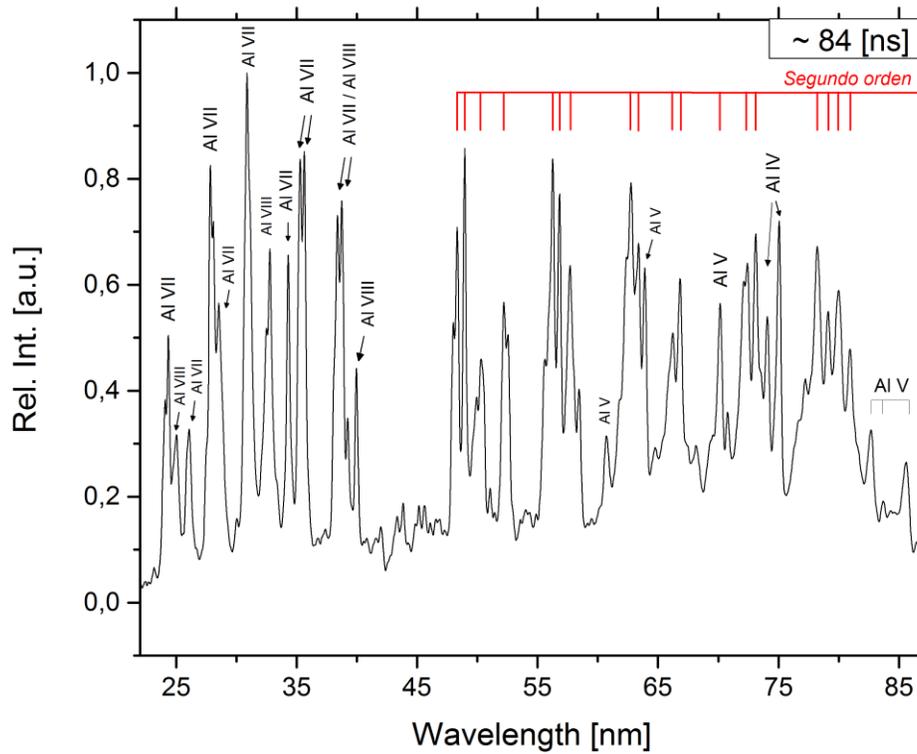


Figura 4. 9: *Espectro experimental calibrado usando los peaks de Al vii y Al viii.*

5.- RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se exponen diferentes espectros obtenidos con el espectrómetro de incidencia rasante, además de su configuración y puesta en marcha con la cámara de vacío. Los resultados experimentales se muestran en dos secciones diferentes que corresponden a regiones diferentes de energía. En la primera sección se muestran los resultados obtenidos usando una red de difracción de 300 [l/mm] (20 a 80 [nm]) y que serán desglosados en subsecciones a partir de los alambres utilizados en el X-pinch (Al, Cu y W), además de una última subsección donde se comparan estos elementos entre sí para lograr identificar líneas comunes para los espectros. En la segunda sección se muestra la región de mayor energía del espectrómetro con el uso de la red de difracción de 1200 [l/mm], con subsecciones para los elementos cobre (Cu) y aluminio (Al).

5.1. Obtención de mediciones espectrales en descarga de arreglo de alambres (X-pinch) con red de difracción de 300 [l/mm].

Dentro del estudio de descargas de alambres (X-pinch) de la Comisión Chilena de Energía Nuclear, se utilizan tres elementos como base para los experimentos de descarga de plasma. Los materiales usados como carga corresponden a alambres de Al de 25 [μm], Cu de 10 [μm] y W de 13 [μm] [27], por lo cual se procede a realizar disparos con estos elementos para así lograr estudiar la evolución en transiciones energéticas (iones excitados) a lo largo de la duración de la descarga como una herramienta para la caracterización de los procesos en el plasma.

5.1.1.- Adquisición de espectros de Aluminio 25 μm

Los primeros espectros obtenidos de las descargas de X-pinch son los de aluminio de 25 μm . Se usó una cámara fotográfica en la cual se deja el obturador abierto en el momento de la descarga y, por lo cual, integra toda la luz proveniente de la MCP (Véase Fig. 5.1).

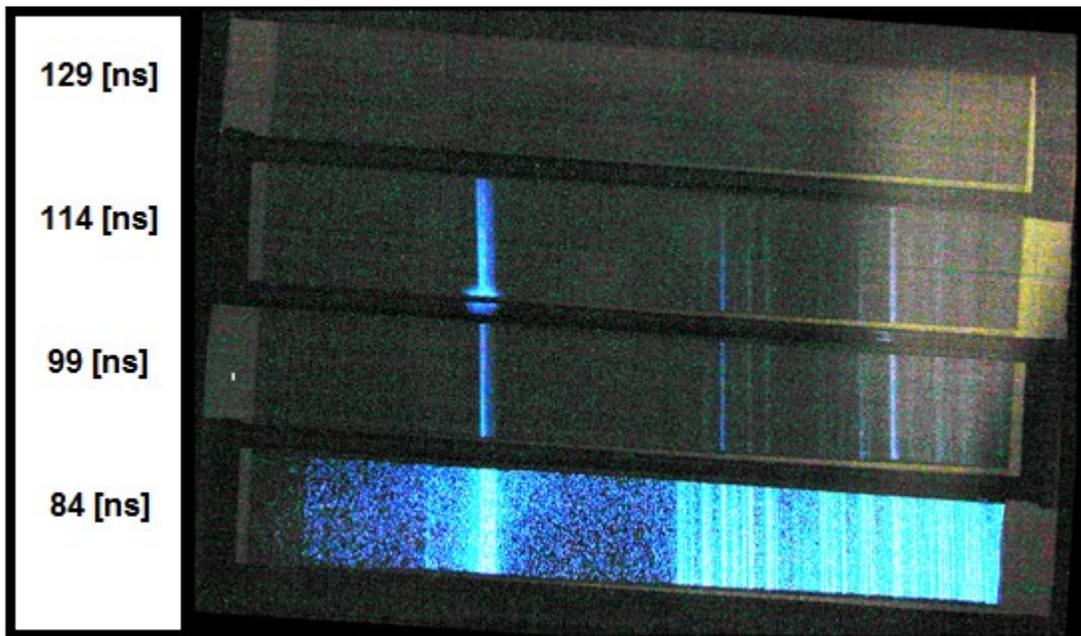


Figura 5. 1: *Fotografía aumentada en brillo y contraste en X-pinch de Al 25 μm para una mejor visualización de las líneas espectrales en los diferentes strips de la MCP.*

La señal de referencia de la MCP se encuentra a aproximadamente ~ 84 [ns] del inicio de la corriente como se puede ver en la Fig. 5.2 que corresponde a los datos de captura de osciloscopio. El canal 1 (amarillo) corresponde a la señal de la derivada de la corriente di/dt . Las señales 2 y 3 corresponden a un dispositivo fotoconductor de diamante (PCD) y un diodo PIN respectivamente conectados en diferentes partes de la cámara de descarga (Véase Fig. 5.2). Estos diagnósticos son filtrados con distintos materiales y espesores para que sólo la radiación de

rayos X, procedente del X-Pinch, llegue al detector [27]. Por último, la señal del canal 4 (verde) corresponde al pulso de salida que se recibe (después de pasar por un divisor resistivo) del primer strip o canal (CH1) de la MCP.

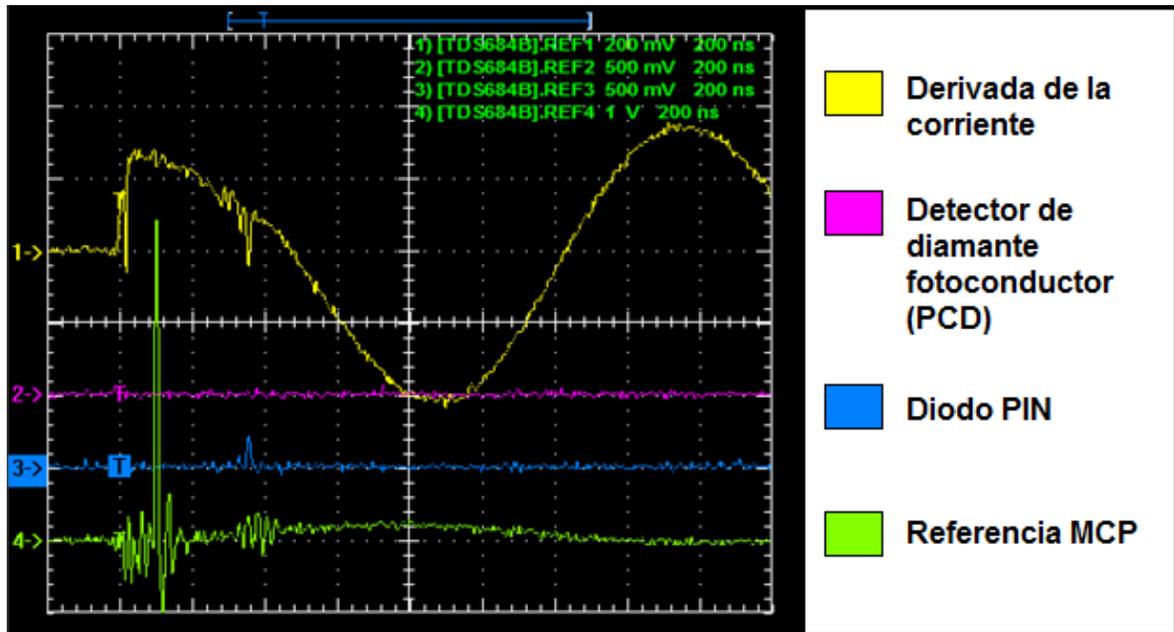


Figura 5. 2: *Imagen con datos relativos a la descarga de Al 25 [μm] (300 [l/mm]) en el osciloscopio. En la imagen se muestran los diferentes canales en los cuales, el canal #4 (verde) corresponde al momento donde inicializa la MCP con respecto al inicio de la corriente (canal 1 en amarillo).*

Con este dato, se puede obtener con mayor precisión la medida del momento que inicializa el CH1 de la MCP con respecto al inicio de la corriente y los pulsos de rayos X emitidos. Con esto se procede a obtener los perfiles de intensidad, integrados a lo largo del eje vertical, de los primeros tres strips como se ve en la Fig. 5.3. Para el caso del espectro de aluminio, la mayor parte de las líneas de emisión aparecen en el primer canal, mientras que para los siguientes canales pareciera haber una pérdida de ganancia del sistema. En el último canal no

existen espectros ni orden cero para ningún disparo, independientemente del tiempo de inicio de la corriente.

Los niveles de ionización encontrados para la descarga de Al de 25 μm , son de Al VIII (siete veces ionizado) y Al VII (seis veces ionizado), como se puede ver en la Fig. 5.3.

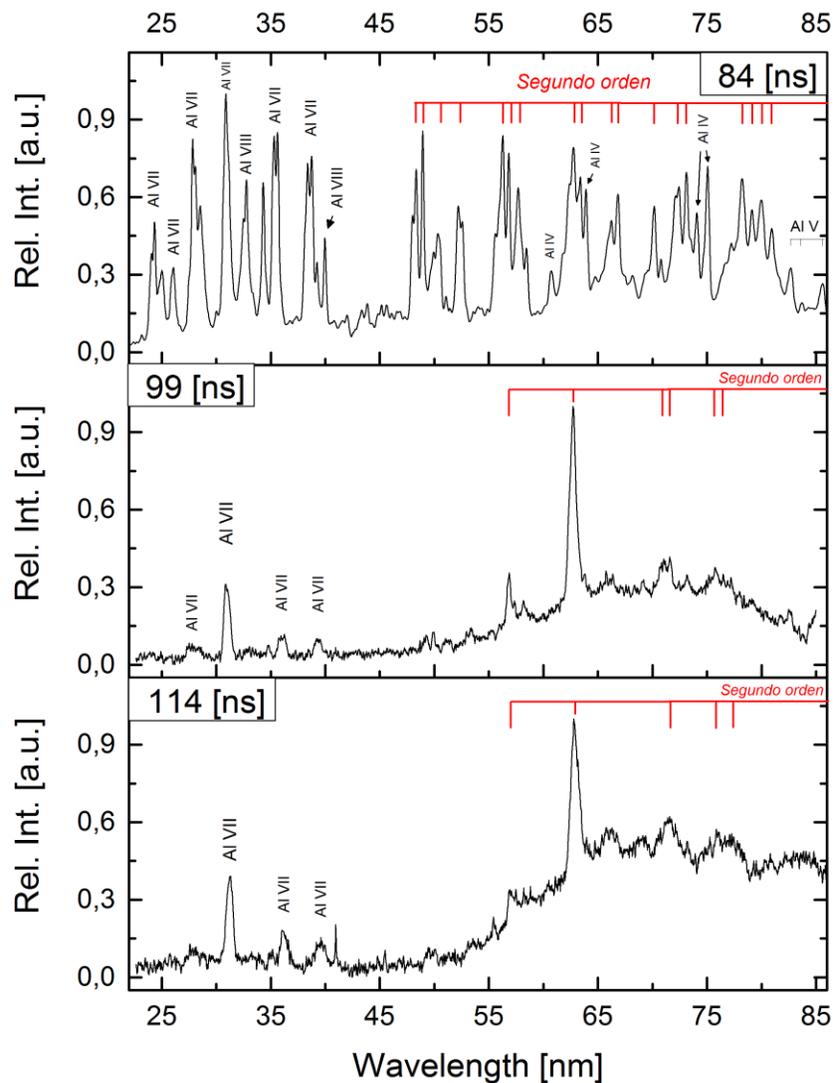


Figura 5. 3: Imagen con los primeros tres canales obtenidos en la MCP para Al 25 μm (300 l/mm). Cada canal de la MCP posee un retraso con respecto al anterior de 15 ns .

5.1.2.- Adquisición de espectros de Cu 10 μm

Ahora, se procederá a estudiar el caso de arreglo de alambres (X-pinch) para Cu de 10 μm . El primer espectro obtenido corresponde a un tiempo de referencia para la señal de Ch1 de la MCP (Véase Fig. 5.4., Strip inferior) de ~ 120 [ns] desde el inicio de la derivada de la corriente (di/dt).

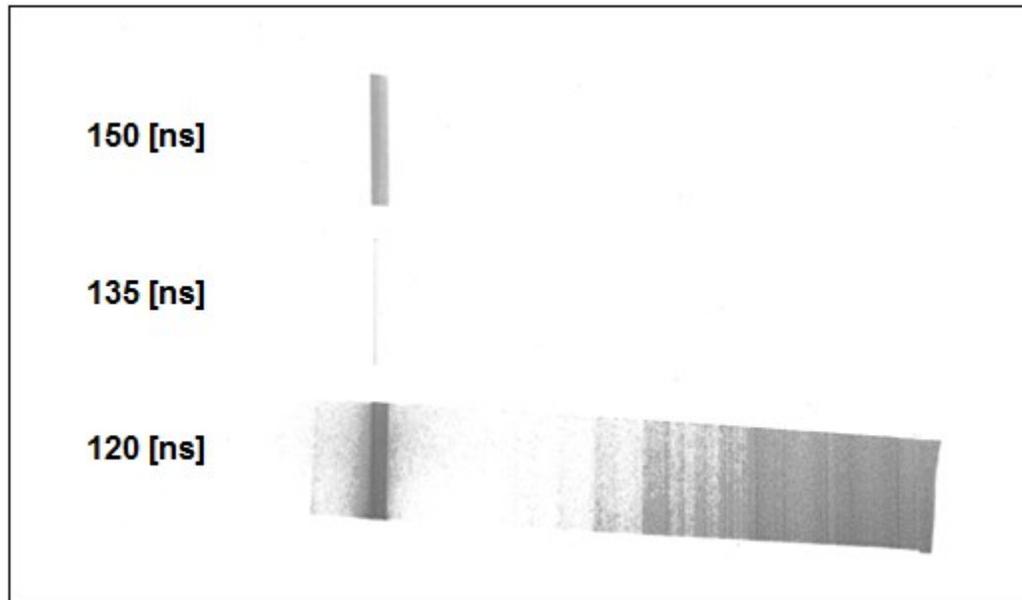


Figura 5. 4: *Negativo de fotografía tomada de los primeros tres strips de la MCP para el espectro de Cu 10 $[\mu\text{m}]$ (300 $[/\text{mm}]$). A diferencia del caso del Al, en este espectro sólo aparecen líneas en el canal 1 (Ch1) de la MCP. El orden cero es visto en los primeros tres canales (línea azul ancha de la derecha).*

Se realizó un segundo experimento con Cu 10 $[\mu\text{m}]$ con las mismas condiciones anteriores y mismo delay. Debido al *jitter*, en general, se obtienen diferentes puntos de observación a partir del valor de tiempo de inicio de la descarga. El espectro obtenido puede verse en la Figura 5.5. El tiempo de referencia tomado en el osciloscopio es de ~ 44 [ns] desde el inicio de la corriente (di/dt). Cabe notar

que para el canal #4 de la MCP no aparece intensidad de luz en el orden cero ni tampoco para la zona de aparición de espectros en el strip para todos los experimentos realizados con diferentes elementos y diferentes tiempos de iniciada la derivada de la corriente.

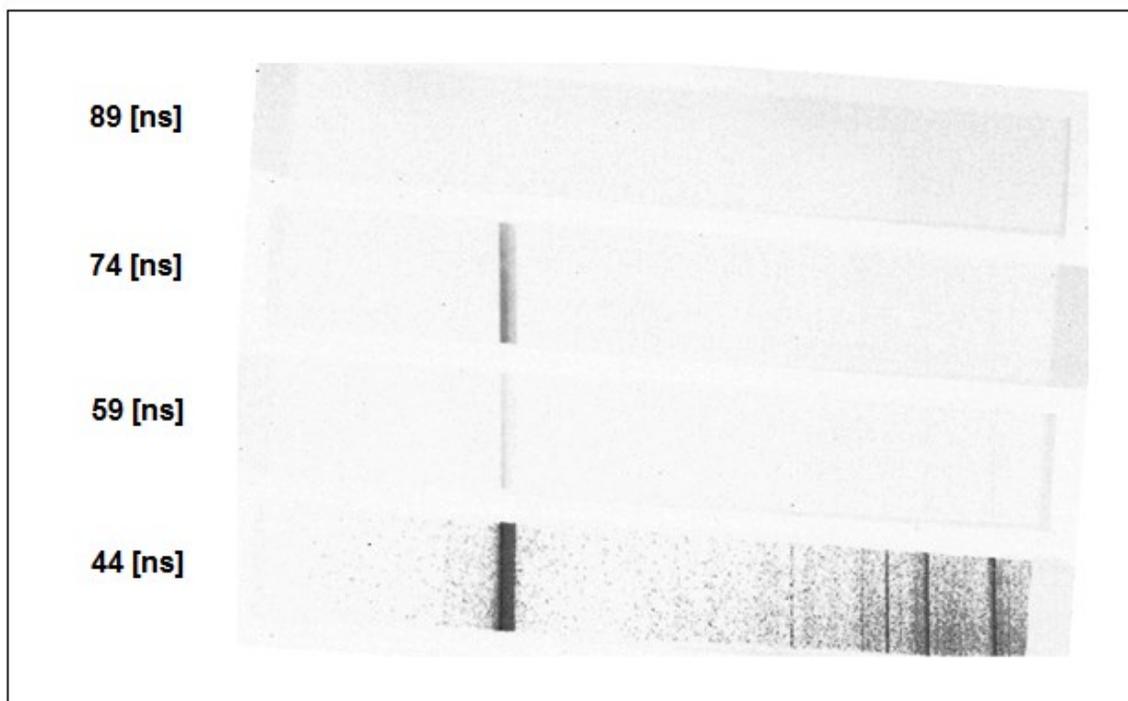


Figura 5. 5: *Fotografía tomada de un segundo espectro de Cu 10 [μm] (300 [l/mm]). Estos espectros son obtenidos a un tiempo anterior que el caso anterior.*

Para ambos primeros canales mostrados en las fotografías (Véase Fig. 5.4 y 5.5), se realizó un gráfico de intensidad relativa sobre la longitud de onda encontrada en la calibración (Véase Figura 5.6). Como se puede ver en la Figura 5.6., los peaks de mayor intensidad para el caso del espectro de 44 [ns] aparecen también en el espectro de 120 [ns]. Para el caso del espectro de 44 [ns], se observa una menor (hasta Cu III) que para el caso de los 120 [ns] desde el inicio de la derivada

de la corriente (donde se observa una región en la que aparecen iones de Cu V, con energía de ionización de 79,8 [eV]).

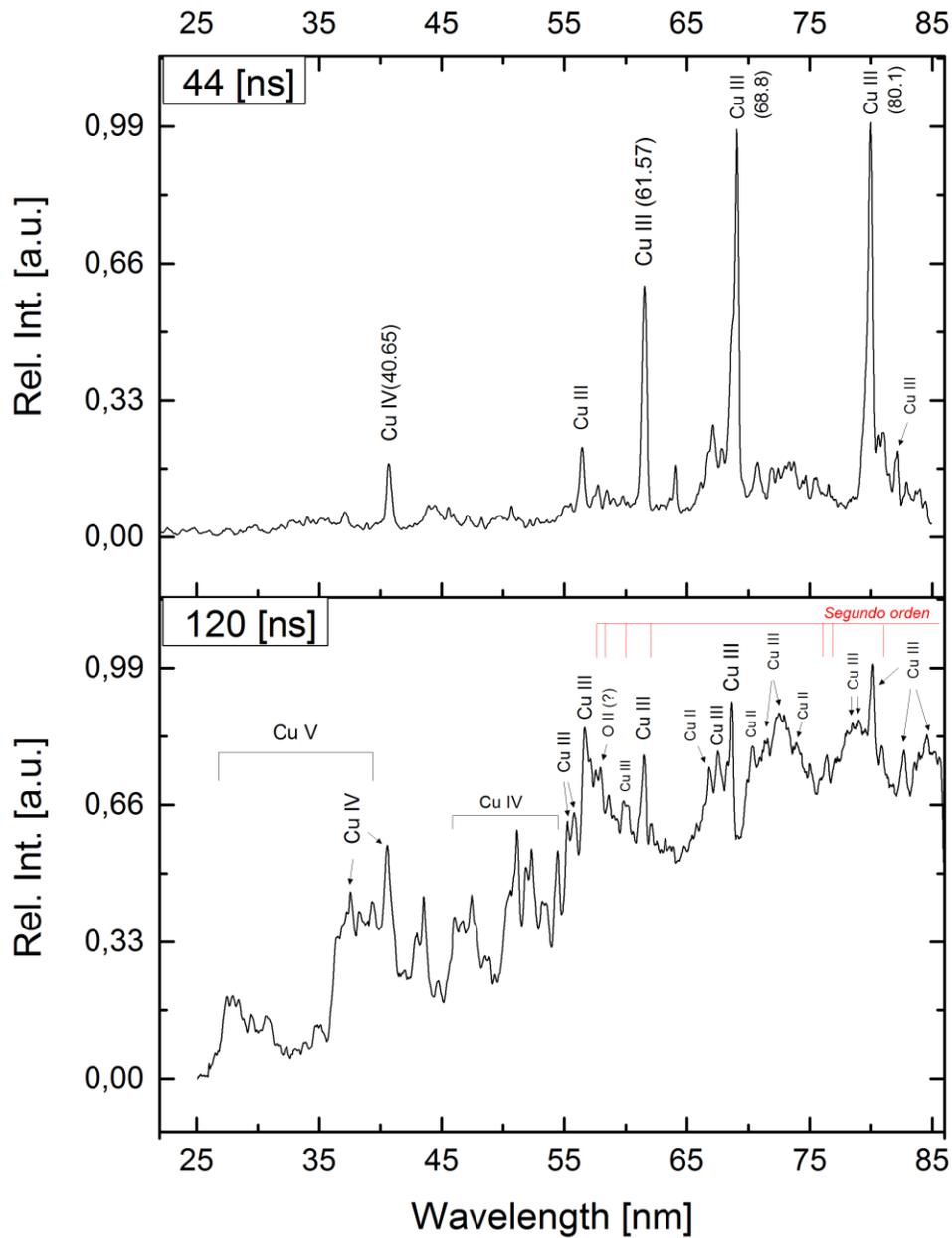


Figura 5. 6: Espectro de Cu 10 [μm] (300 [l/mm]) para 44 [ns] y 120 [ns] desde el inicio de la corriente. Para el caso de los 44 [ns] se observa la aparición de tres líneas espectrales muy definidas.

Posteriormente se graficó distintas descargas de Cu de 10 μm a diferentes tiempos de inicio de la derivada de la corriente (di/dt) en un mismo gráfico como se observa en la Figura 5.7. Se observa que tanto la forma de la señal, como también los peaks de mayor intensidad, se conservan en los espectros.

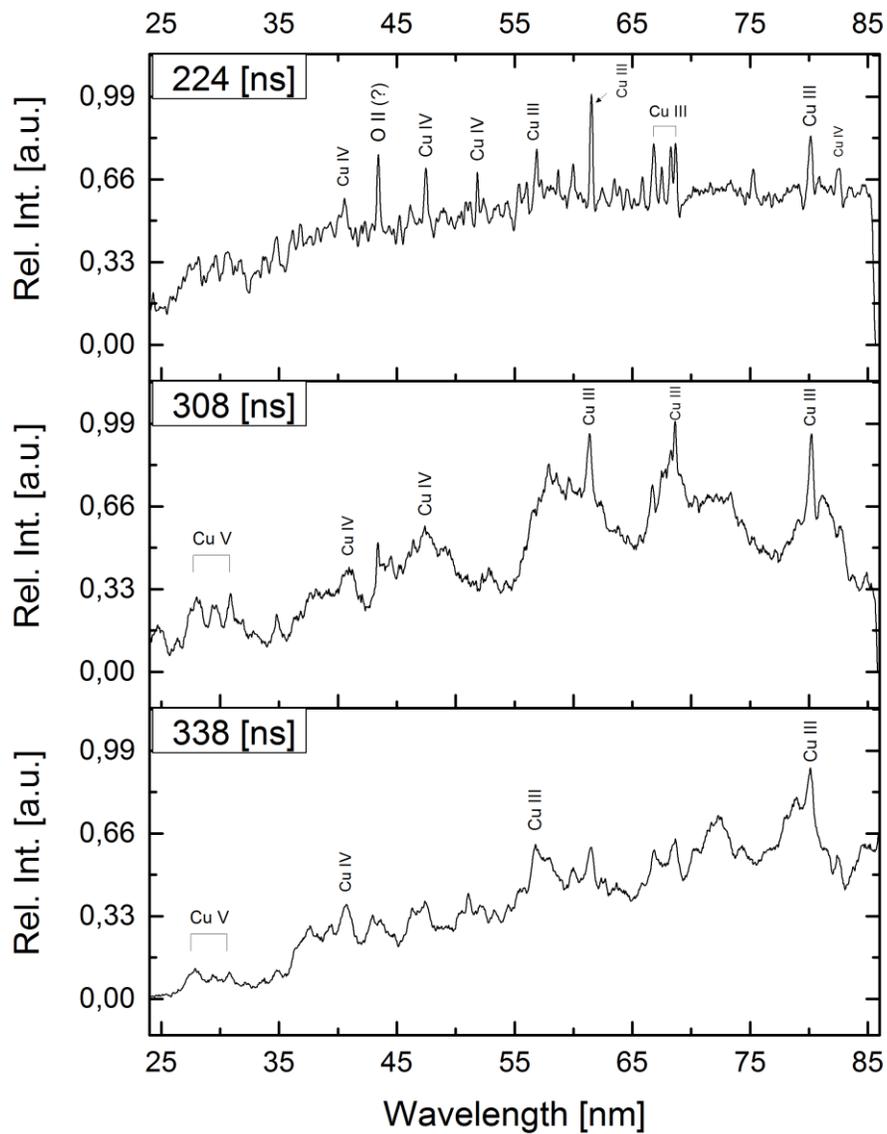


Figura 5. 7: Espectros obtenidos para cargas de Cu de 10 μm a diferentes tiempos del inicio de la corriente (di/dt).

5.1.3.- Adquisición de espectros de W de 13 μm

Por último, se estudiará el espectro asociado a cargas de tungsteno de 13 μm . A diferencia de los casos anteriores no existe un buen contraste de líneas de tungsteno para el primer canal de la MCP como se puede ver en la Figura 5.8.

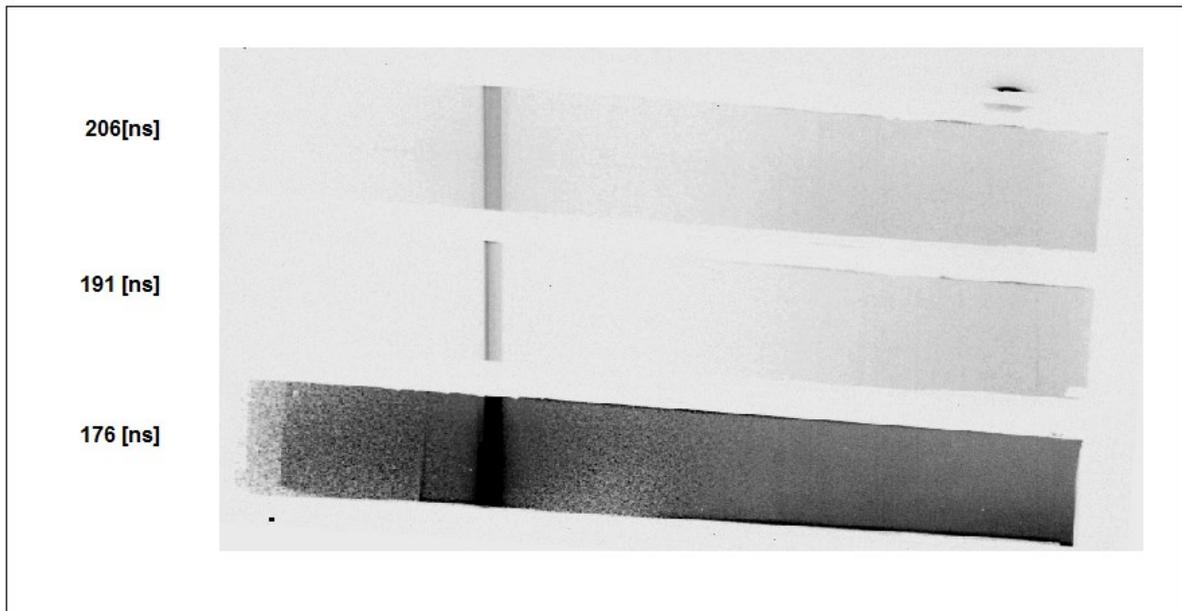


Figura 5. 8: *Fotografía del espectro de W de 13 μm con red de 300 l/mm en la MCP. A simple vista, no hay líneas espectrales distinguibles en la imagen.*

Al generar el perfil de intensidad, se puede distinguir líneas de emisión sobre un gradiente de intensidad que aumenta con la longitud de onda. Usando el rango de longitudes obtenida para la calibración, aparecen peaks de W VII con una intensidad relativa alta (>2000) que coinciden con los peaks encontrados experimentalmente (75,98 y 54,34 [nm]). Además, son observados peaks de W IV superpuestos en el espectro. La energía de ionización para el ion de W VII es de $E_{ion} = 122,01$ [eV].

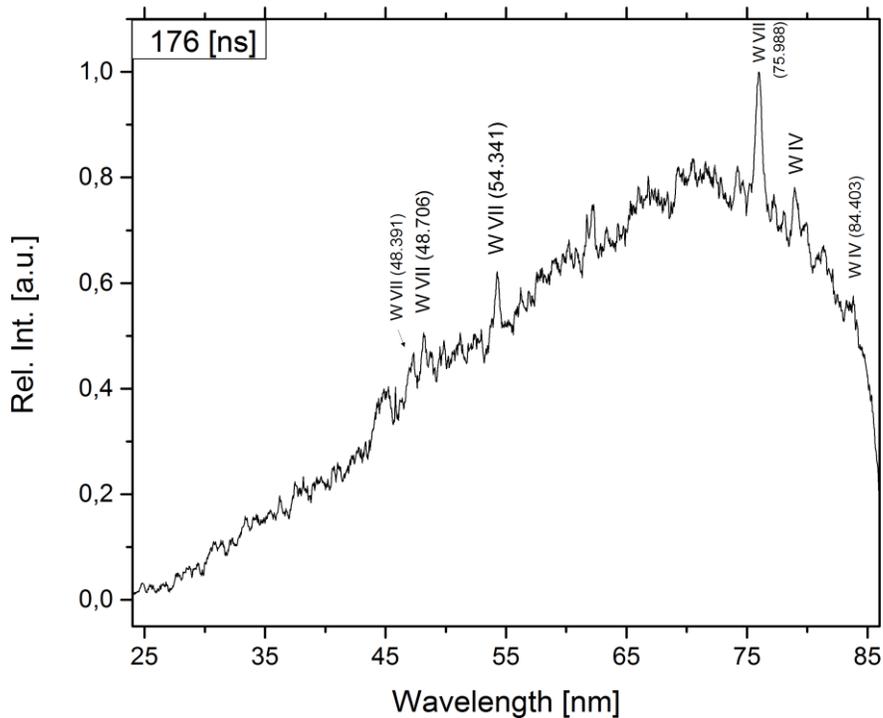


Figura 5. 9: Espectro para carga de $W\ 13\ [\mu\text{m}]$ en X-Pinch ($300\ [\text{l}/\text{mm}]$).

5.2. Obtención de líneas espectrales en descarga de arreglo de alambres (X-pinch) con red de difracción de $1200\ [\text{l}/\text{mm}]$

Para este segundo caso, se configuró el espectrómetro para la región de más alta energía usando la red de difracción de $1200\ [\text{l}/\text{mm}]$. Según la información suministrada por el fabricante, esta red posee un rango espectral entre los 3 a 7 [nm]. Según la información de la calibración geométrica, esta se establece en el

rango de 5,1 a 20,3 [nm] (Véase Sección 3.4). Por el momento, no es clara la inconsistencia entre estos rangos.

5.2.1.- Adquisición de espectros de Al de 25 μm

Se consideraron alambres de Al de 25 μm dispuestos en el dispositivo multipropósito. Experimentalmente, se usó la misma configuración para el caso anterior. La Figura 5.10 muestra el espectro obtenido con el uso de Al de 25 μm y la red de difracción de 1200 [1/mm]. Existe poca intensidad de luz en la imagen, posiblemente por una menor eficiencia de la red de 1200 [1/mm] o bien líneas de poca intensidad relativa en la región.

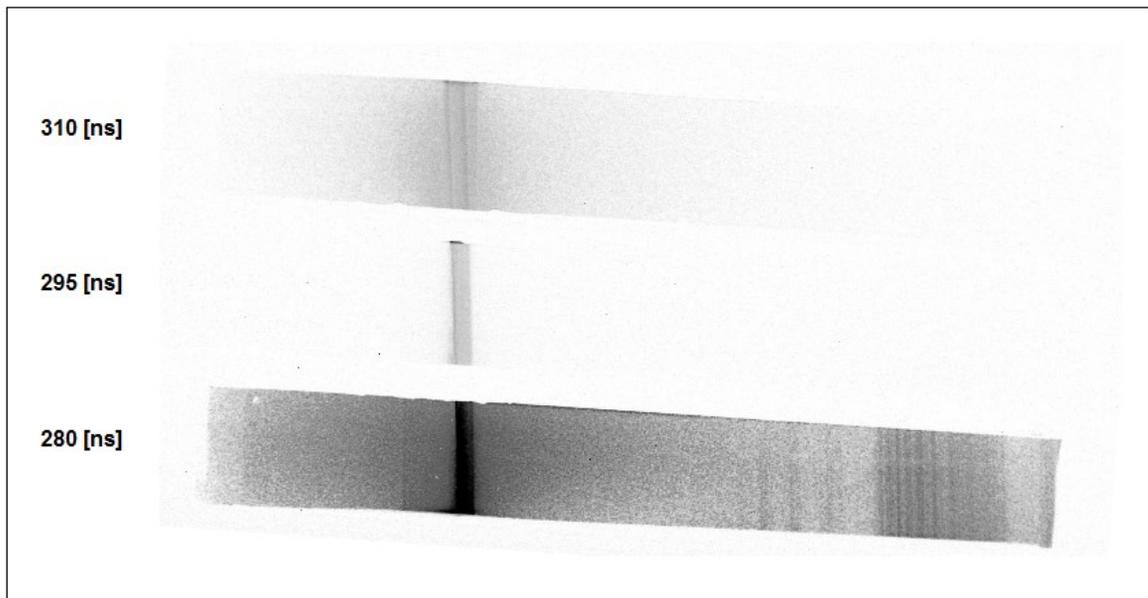


Figura 5. 10: *Fotografía tomada de los cuatro strips de la MCP para el espectro de Cu de 10 μm con red de difracción de 1200 [1/mm].*

La señal de referencia de la MCP (canal 4, color verde en la Figura 5.12) aparece a los 236 [ns] del inicio de la corriente (di/dt, canal 1, color amarillo). Es este caso

existe un pequeño pulso de rayos X emitido luego de 236 [ns] de la señal de referencia (Véase Figura 5.11). Este pulso al parecer no afecta los strips siguientes en los cuales no hay indicio de aparición extra de líneas de emisión.

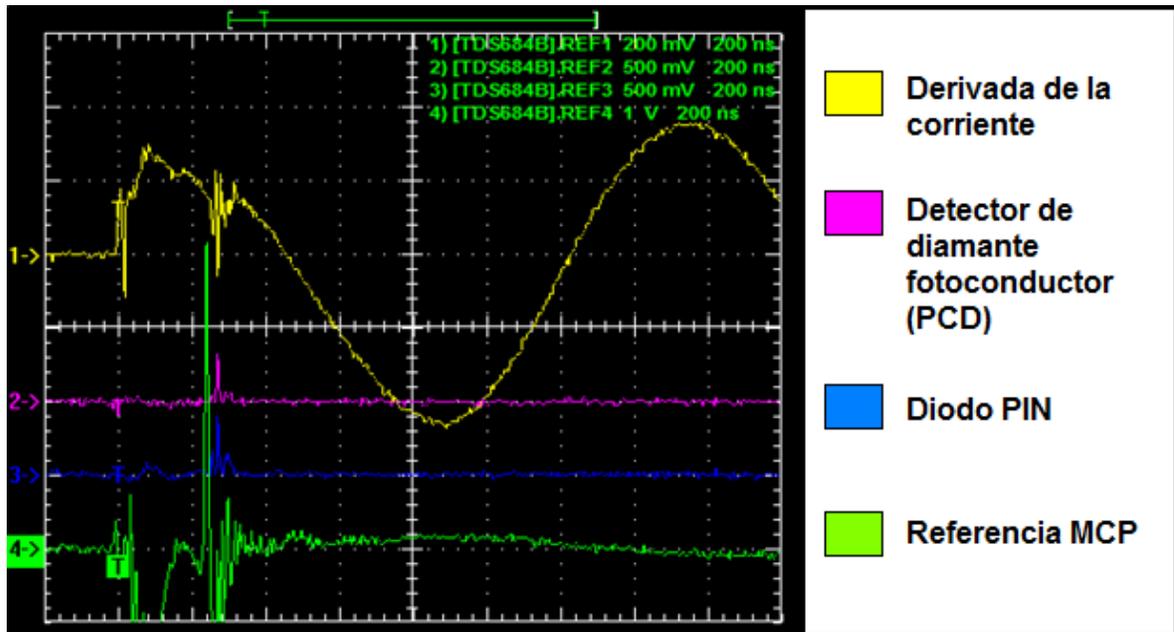


Figura 5. 11: Datos de la descarga de Al de 25 μ m (1200 [I/mm]). En este caso, el pulso de referencia de la MCP se encuentra a un tiempo de 236 [ns] del inicio de la derivada de la corriente

Para el caso de esta región de observación, existen publicaciones de espectros en X-Pinch. En particular, Qi et al. obtiene un espectro en alta resolución de aluminio para el rango de 4,6 a 6,8 [nm] [30]. Parte del espectro obtenido por Qi et, al. coincide con la forma de líneas experimentales obtenidas (Véase Figura 5.12), por lo cual se procede a utilizar los peaks de mayor intensidad de Al VIII y Al IX para la calibración. Con esto se obtiene un rango de observación que va de los 5,7 [nm] hasta los 8 [nm]. Sin embargo, son necesarias más mediciones para comprobar y corroborar la calibración y asignación de líneas.

6.- CONCLUSIÓN

En el presente trabajo se logró diseñar y construir una cámara de vacío que contiene un espejo de incidencia rasante que permitió aumentar la sensibilidad del espectrómetro de incidencia rasante off-Rowland-circle GISVUV1 para la obtención de radiación EUV de una fuente de emisión tipo X-Pinch. El diseño y construcción de todos los elementos que componen la cámara de vacío que aloja el espejo de incidencia rasante (para maximizar la radiación de entrada del espectrómetro), además de su posterior alineación al espectrómetro, se convierten en una herramienta útil para la determinación, a partir de un análisis espectroscópico, de los niveles de ionización procedente de la descarga X-Pinch.

Por otra parte, a partir de una correcta alineación óptica y puesta a punto del montaje experimental, se logró establecer una calibración geométrica del espectrómetro con su respectivo rango de longitudes de onda para los canales de la MCP con distintas redes de difracción (Véase sección 4.1). Este rango de longitudes de onda, para el caso de la red de 300 [l/mm], coincide con respecto al rango espectral entregado por el fabricante (20 a 80 [nm]). Para el caso de la red de 1200 [l/mm], la calibración geométrica coincide sólo en un rango acotado de longitudes de onda para el rango de calibración encontrado vía comparación de espectros. Por el momento, no se conoce la razón de esta inconsistencia, por lo cual es necesario obtener más mediciones para comprobar esta última calibración y corroborar la información.

Otra técnica usada para la calibración es el plasma producido por láser (o en sus siglas en inglés, LPP) que corresponde a un método robusto de obtención de líneas espectrales debido a su repetitividad y control sobre la generación de plasma. Para este caso en particular, se utilizó para comparar dichos espectros con respecto a los espectros experimentales obtenidos en el Generador Multipropósito (X-Pinch).

Entre los resultados experimentales del presente trabajo, se logró obtener espectros de emisión para diferentes elementos de carga de X-Pinch (Cu 10 [μm], Al 25 [μm], W 13 [μm]) usando una red de difracción de 300 líneas por milímetro. En una segunda instancia, se cambió a una red de difracción de 1200 [l/mm] (Véase sección 5.2) con la finalidad de obtener más fácilmente referencias de espectros en descargas pulsadas de plasma en publicaciones y lograr comparar los resultados experimentales, debido a que existe una gran cantidad de información y caracterización de emisiones de más alta energía (sobre todo en rayos-x blandos y duros) para X-pinch.

No obstante, se obtienen iones pertenecientes a los elementos de carga del X-pinch para la red de 300 [l/mm]. Para el caso del aluminio, se obtiene una ionización de hasta Al VIII con una energía de ionización de 284,64 [eV] a 84 [ns] después del inicio de la corriente. Para el caso del cobre, se observan peaks de hasta Cu V ($E_{ion} = 79,8$ [eV]) que aparecen en los espectros obtenidos con la red de difracción de 300 [l/mm] con un tiempo de 120 [ns] desde el inicio de la corriente. Para el caso del tungsteno (W), se obtienen iones de hasta W VII ($E_{ion} = 122,01$ [eV]) en un tiempo de 176 [ns] desde el inicio de la corriente.

Para el caso de la red de 1200 [l/mm] se obtienen ionizaciones para el aluminio de hasta Al X ($E_{ion} = 368.95$ [eV]) para 236 [ns] desde el inicio de la corriente, mientras que para el caso de cobre se observa hasta el Cu XIV ($E_{ion} = 436,0$ [eV]) a 280 [ns] del inicio de la corriente.

A partir del estudio del estado del arte de la caracterización espectral para los elementos de carga utilizados, no se encontraron espectros en la región de 20 a 80 [nm] (300 l/mm) para X-Pinch. Sin embargo, existen publicaciones de espectros de plasma producido por láser (LPP) [31] para Cu y W, pero sin una resolución razonable en la región para lograr comparar los datos experimentales.

Considerando lo anterior, el trabajo se plantea como aporte y antecedente para futuras investigaciones para el rango de longitudes de onda trabajado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. I. Boulos, P. Fauchais, E. Pfender, *Thermal Plasmas*, Volumen 1, Plenum press, 1994
- [2] F. Chen, *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*. Plenum Press, 1984
- [3] D. Attwood, *Soft X-Rays and Extreme Ultraviolet Radiation: Principles and Applications*. Cambridge University press, 1999
- [4] D. W. Ball, *The Basics of Spectroscopy*, SPIE Press, Washington, USA, 2001
- [5] C. Palmer, E. Loewen, *Diffraction Grating Handbook*. Newport Corporation, New York, USA, 2005
- [6] I. V. Fomenkov, N. Böring, C. L. Rettig, S. T. Melnychuk, I. R. Oliver, J. R. Hoffman, O. V. Khodykin, R. M. Ness, W. N. Partlo, *EUV discharge light source based on a dense plasma focus operated with positive and negative polarity*. Journal of Physics D: Applied Physics, 37(23):3266–3276, (2004)
- [7] E. Wyndham, R. Aliaga-Rössel, H. Chuaqui, M. Favre, I. H. Mitchell, P. Choi, *X-ray and plasma dynamics of an intermediate size capillary discharge*. IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 30, no. 1, (2002)
- [8] H-J. Kunze, *Introduction to Plasma Spectroscopy*. Springer Series on Atomic, Optical and Plasma Physics, ISSN 1615-5653, (2009)
- [9] E. Kieft, *Transient behavior of EUV emitting discharge plasmas: a study by optical methods*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, Proefschrift, 2005.
- [10] J.L. Culhane, L. K. Harra, A. M. James, K. Al-Janabi, L. J. Bradley, R. A. Chaudry, K. Rees, J. A. Tandy, P. Thomas, M. C. R. Whillock, B. Winter, G. A. Doschek, C. M. Korendyke, C. M. Brown, S. Myers, J. Mariska, J. Seely,

- J. Lang, B. J. Kent, B. M. Shaughnessy, P. R. Young, G. M. Simnett, C. M. Castelli, S. Mahmoud, H. Mapson-Menard, B. J. Probyn, R. J. Thomas, J. Davila, K. Dere, D. Windt, J. Shea, R. Hagood, R. Moye, H. Hara, T. Watanabe, K. Matsuzaki, T. Kosugi, V. Hansteen, *The EUV Imaging Spectrometer for Hinode*. Springer Solar Phys 243: 19–61. (2007)
- [11] G. Del Zanna, *Extreme Ultraviolet Spectroscopy of the Solar Corona*. Centre for Astrophysics University of Central Lancashire, 1999
- [12] G. Simi A, *Spectroscopic studies of laser plasmas for EUV sources*. College of Sciences at the University of Central Florida, Orlando, Florida, 2004
- [13] A. Tarifeño, *Estudio experimental de una Descarga Plasma Focus Rápida Operada en el Rango de Decenas de Joules Emitiendo Neutrones*, Tesis PHD, (Universidad de Concepción 2011)
- [14] N. Cabrini, C. Pavez, G. Avaria, J. Pedreros, P. San Martín, F. Veloso, B. Zúñiga, A. Sepúlveda, L. Soto, *Dynamics of an X-Pinch Conducted in a Small Capacitive Generator of Low Impedance*. Journal of Physics: Conference Series 591 (2015) 012026
- [15] M. D. Mitchell, *X-pinch plasma dynamics studied with high temporal resolution diagnostics*. Cornell University, 2007
- [16] K. Bergmann, G. Schriever, O. Rosier, M. Müller, W. Neff, L. Rainer, *Highly repetitive, extreme-ultraviolet radiation source based on a gas-discharge plasma*. Appl. Opt., 38(25):5413–5417, (1999).
- [17] P. Silva, J. Moreno, L. Soto, L. Birstein, R. Mayer and W. Kies, *Neutron emission from a fast plasma focus of 400 Joules*, Appl. Phys. Lett. 83 3269 (2003)
- [18] L. Soto, P. Silva, J. Moreno, M. Zambra, W. Kies, R. E. Mayer, A. Clause, L. Altamirano, C. Pavez and L. Huerta, *Demonstration of neutron production in a table-top pinch plasma focus device operating at only tens of joules*, J. Phys. D: Appl. Phys. 41 205215 (2008)

- [19] J. Moreno, D. Morales, G. Avaria, O. Cuadrado, and L. Soto, *Ion emission study using visible spectroscopy and ToF method in a plasma focus device of two kilojoules*, Journal of Physics: Conference Series 591 012023 (2015)
- [20] L. Soto, C. Pavez, J. Moreno, M. and A. Clause, *Nanofocus: an ultra-miniature dense pinch plasma focus device with submillimetric anode operating at 0.1 J*, Plasma Sources Sci. Technol. 18 015007 (2009)
- [21] A. Tarifeño, C. Pavez, L. Soto, *Design and characterization of a small multipurpose capacitor bank for plasma physics and pulsed power experiment*. Phys. Scr. T131 (2008)
- [22] L. Soto, *New trends and future perspectives on plasma focus research*, Plasma Phys. Control Fusion 47 A361 (2005)
- [23] B. L. Henke, E. M. Gullikson, and J.C. Davis, *X-ray interactions: photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at E=50-30000 eV, Z=1-92*, Atomic Data and Nuclear Data Tables Vol. **54** (no.2), 181-342 (July 1993).
- [24] J. A. Samson, D. L. Ederer, *Vacuum Ultraviolet Spectroscopy I*. Academic press, San Diego, USA. 1998
- [25] A. Nudelfuden, R. Solanki, H. W. Moos, *Spatial imaging in the soft x-ray region (20–304 Å) utilizing the astigmatism of a grazing incidence concave grating*. Applied Optics, Vol. 24, Issue 6, pp. 789-792, (1985)
- [26] J. L. WIZA, *Microchannel Plate Detectors*, reprinted from Nuclear Instruments and Methods, Vol. 162, 1979, pages 587 to 601, Disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.119.933&rep=rep1&type=pdf>
- [27] N. Cabrini V., *Estudio del comportamiento de un generador de baja corriente sobre descarga en arreglo de alambres*. Tesis Magister en Ciencias exactas, (Universidad Andrés Bello, 2014)
- [28] K. Koláček, J. Schmidta, V. Boháček, M. Řípa, P. Vrba, O. Frolovb, M. Tichýb, A. Jančárekc, M. Vrbová, E. Skladnik-Sadowskad, M. Sadowskid, J. Baranowskid, *XUV grazing incidence spectrograph for plasma diagnostics*

and its calibration. German-Polish Conference on Plasma Diagnostics for Fusion and Applications, Greifswald, Germany, September 4-6, Paper A0, (2002)

- [29] A. Kramida, Yu. Ralchenko, J. Reader, NIST ASD Team (2014). NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.2), [Online], Disponible en: <http://physics.nist.gov/asd> [7 Septiembre 2015].
National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.

- [30] N. Qi, D. A. Hammer, D. H. Kalantar, K. C. Mittal, *Fluorescence in Mg IX emission at 48.340 Å from Mg pinch plasmas photopumped by Al XI line radiation at 48.338 Å*. Physical Review A. Volume 47, Number 3. (1993)

- [31] Lee J. Dardis *VUV emission and absorption spectroscopy with a multichannel near normal incidence spectrometer*, Thesis of Master of Science, (Dublin City University 1998)

ANEXO

A. Planos para los distintos elementos que componen la cámara de vacío

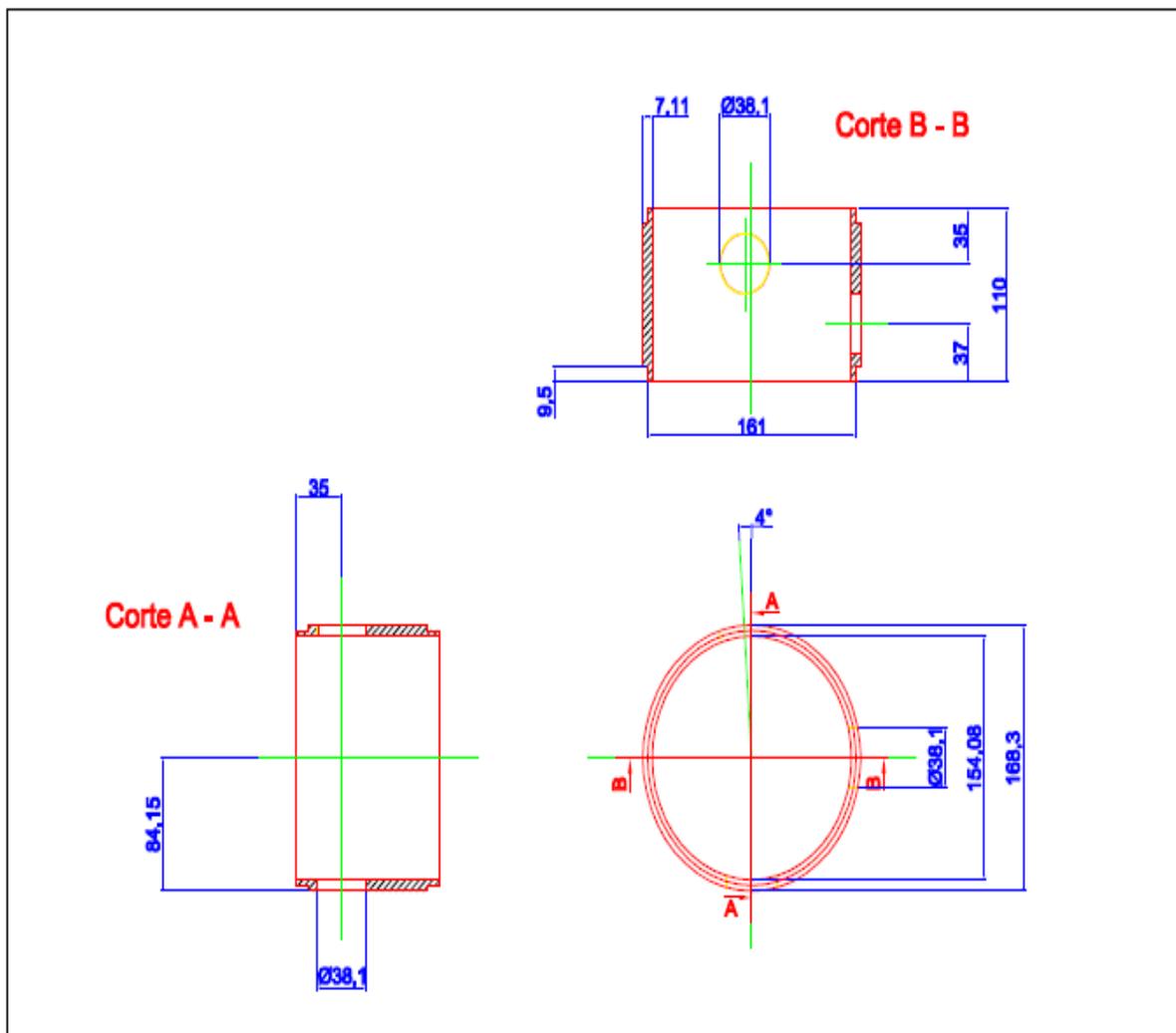


FIGURA I: Plano para la creación de la cámara de vacío. Se consideran tanto el ángulo de incidencia rasante del espejo (2θ), como también las distancias y alturas al eje óptico de la descarga. Los desgastes en los bordes del tubo son utilizados para la soldadura del flange.

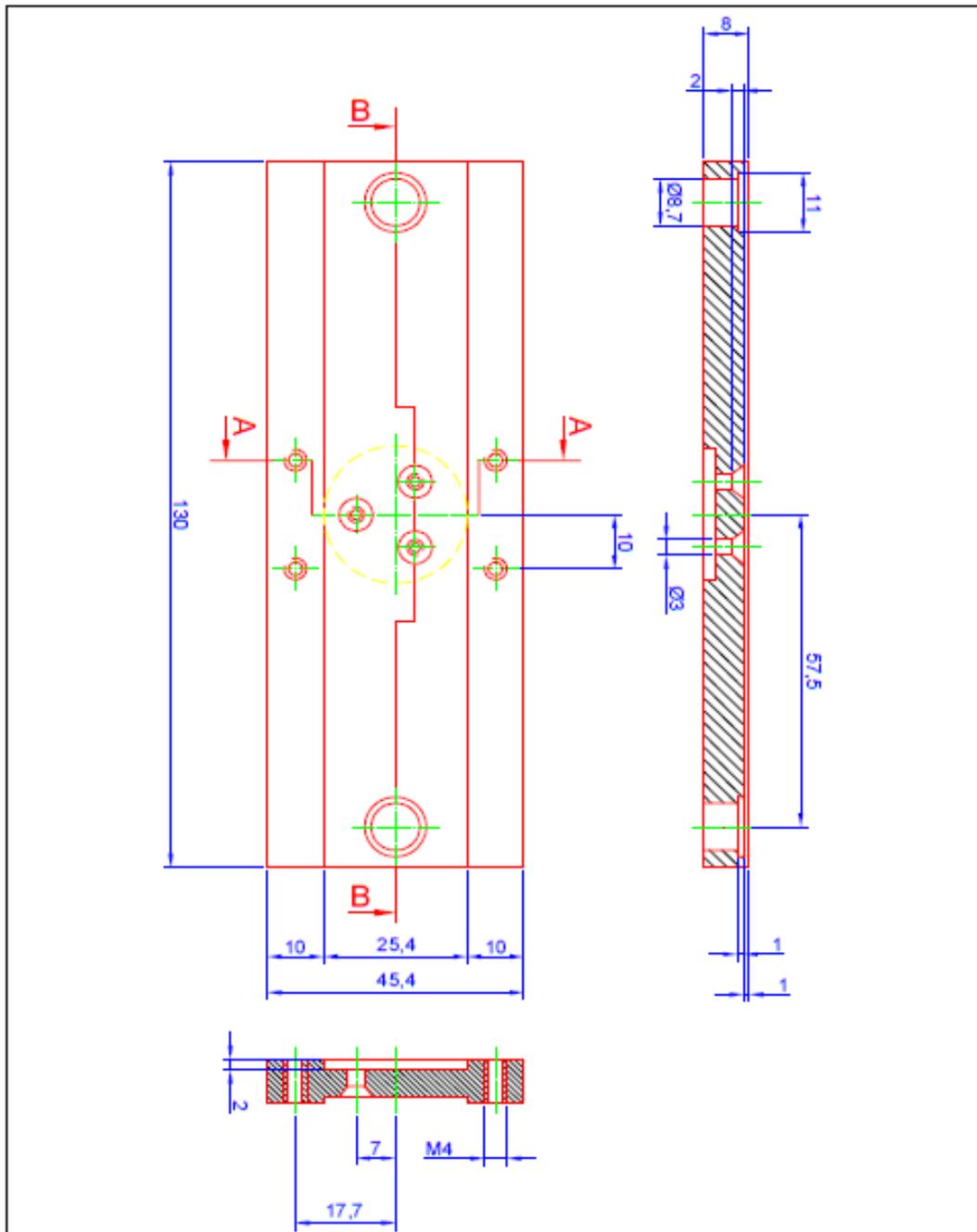


FIGURA II: Plano para el soporte del espejo de incidencia rasante. Al centro del diseño se coloca un soporte mecánico (en este caso barra) el cual se asegura con pernos cónicos. Se crea la cavidad de dichos pernos para que no afecten al espejo.

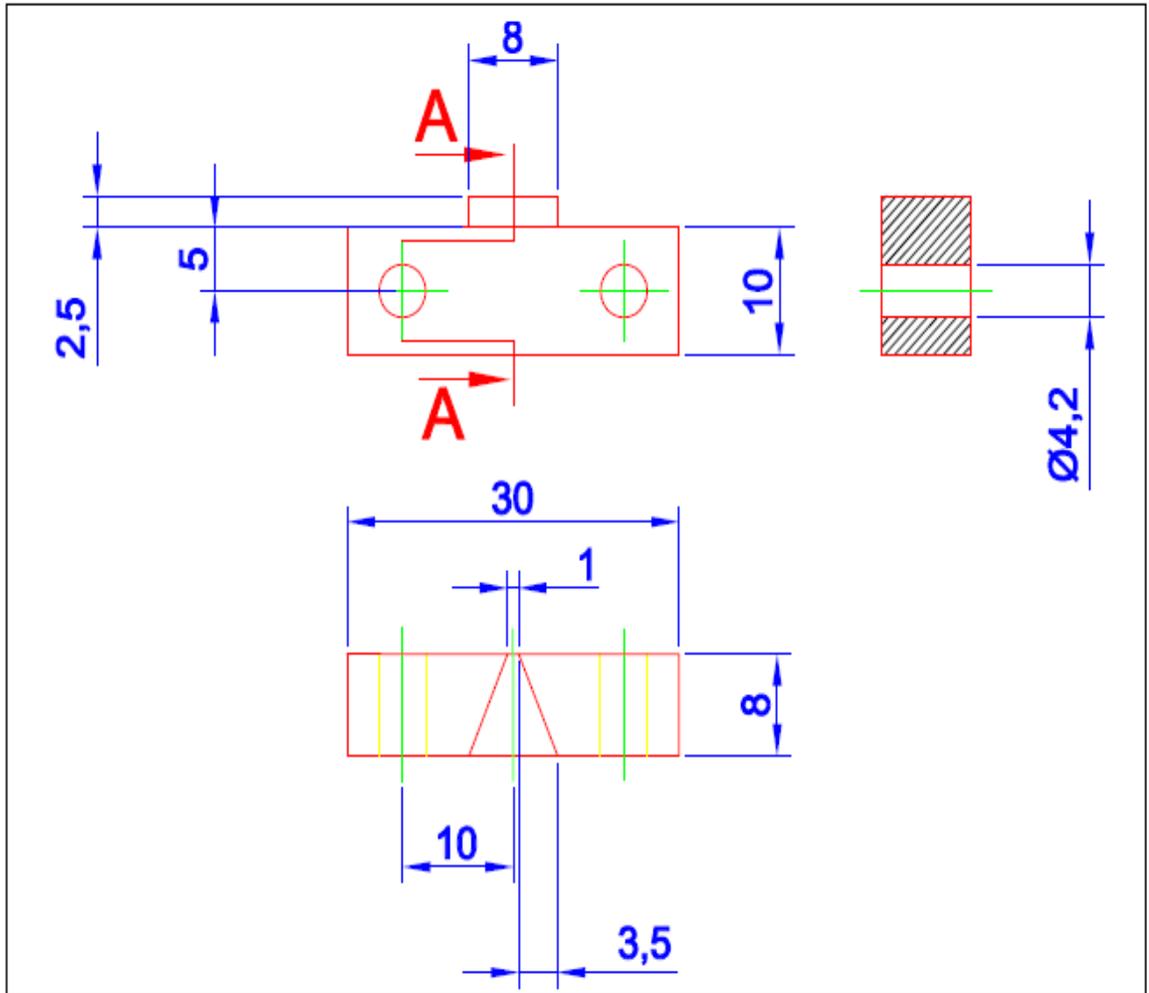


FIGURA III: Planos de los soportes de la montura del espejo. Soportes para el espejo (el contacto con el espejo se realiza en forma de cuña para minimizar el área de contacto y mejorar la curvatura del espejo).

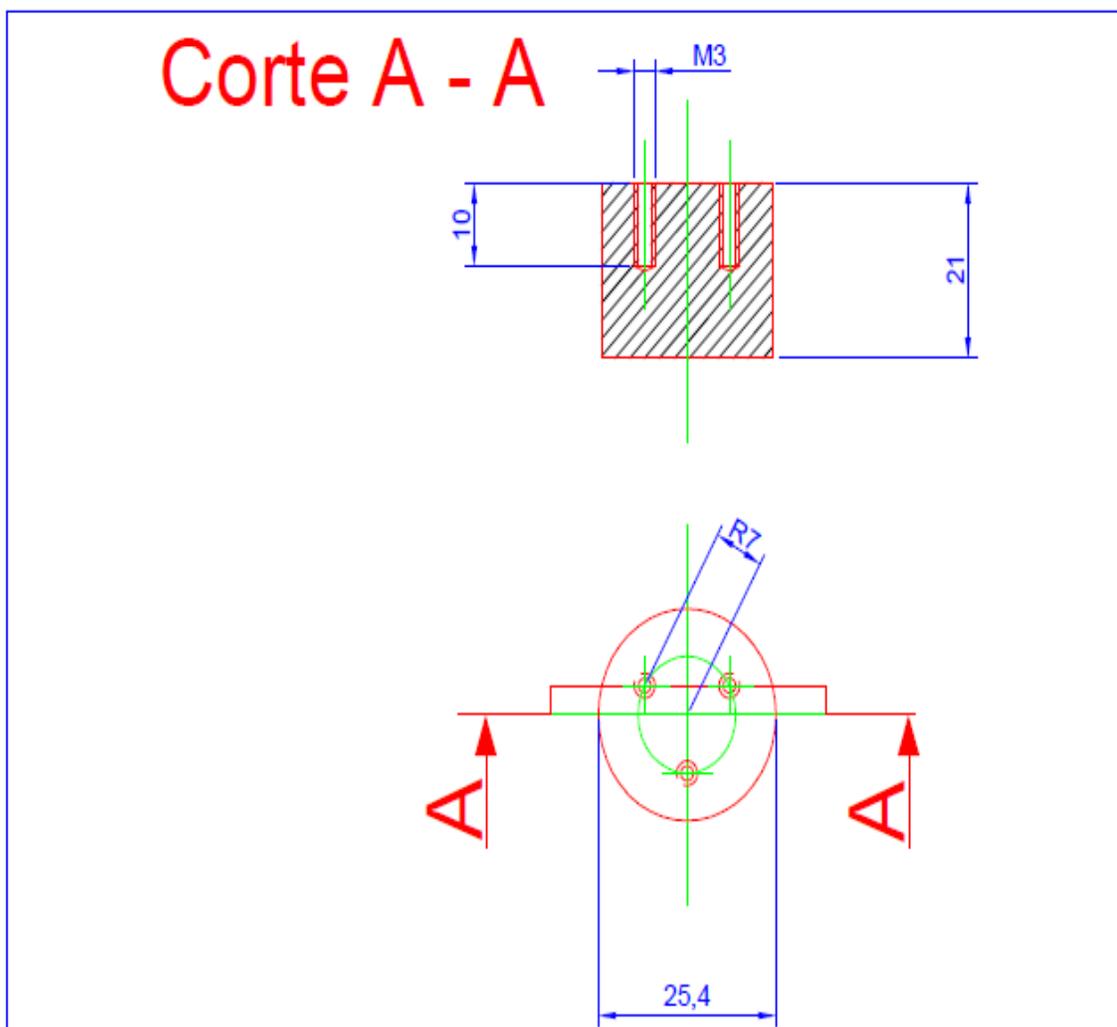


FIGURA IV: Planos de los soportes de la montura del espejo. Soporte en barra de la montura de 1". Se diseña con hilos para ser fijado desde el soporte del espejo hacia la barra.

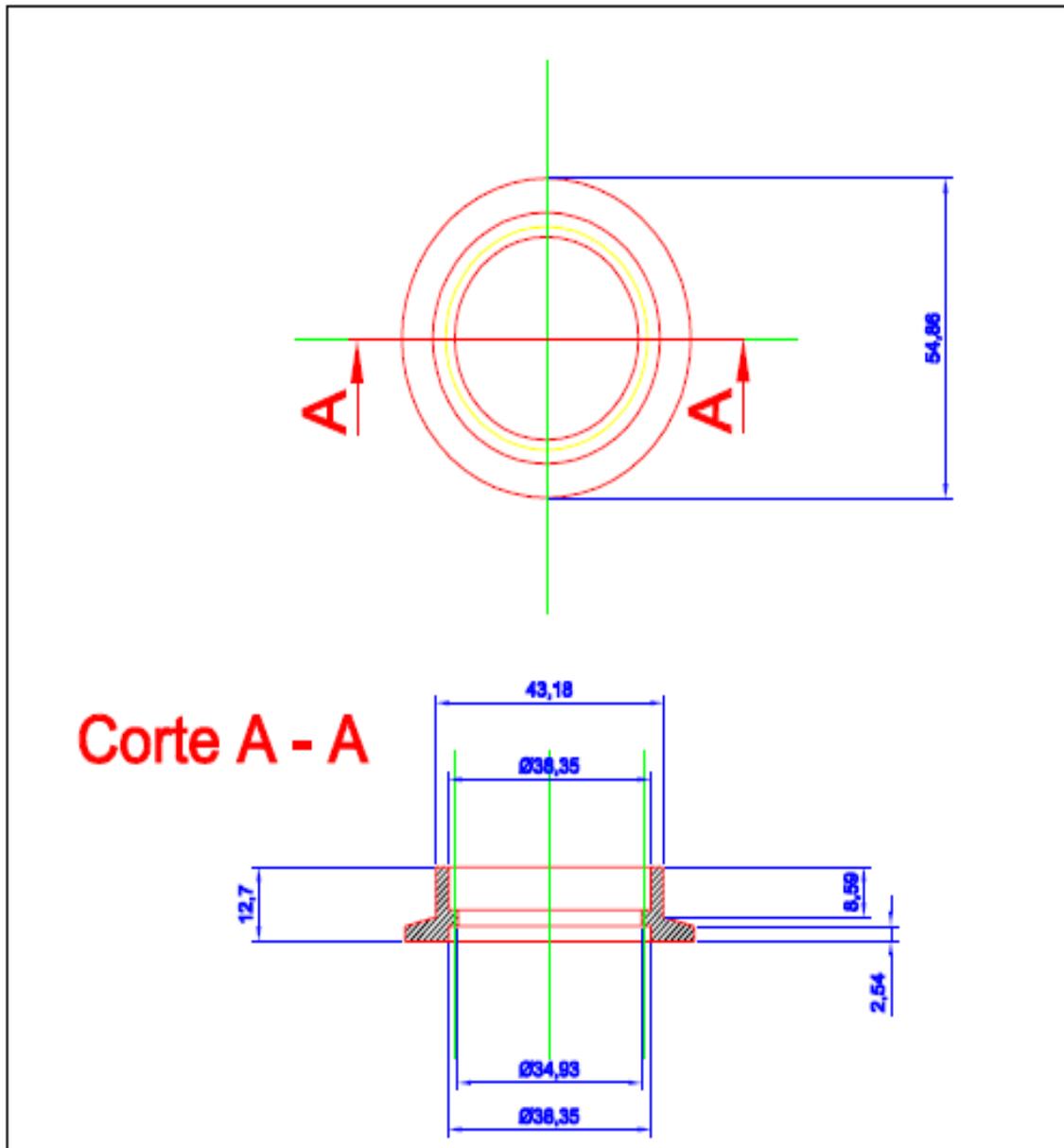


FIGURA V: Planos de los conectores tipo NW40 creados para las conexiones de la cámara de vacío (conexión a descarga, espectrómetro, micrómetro y medidor de presión)

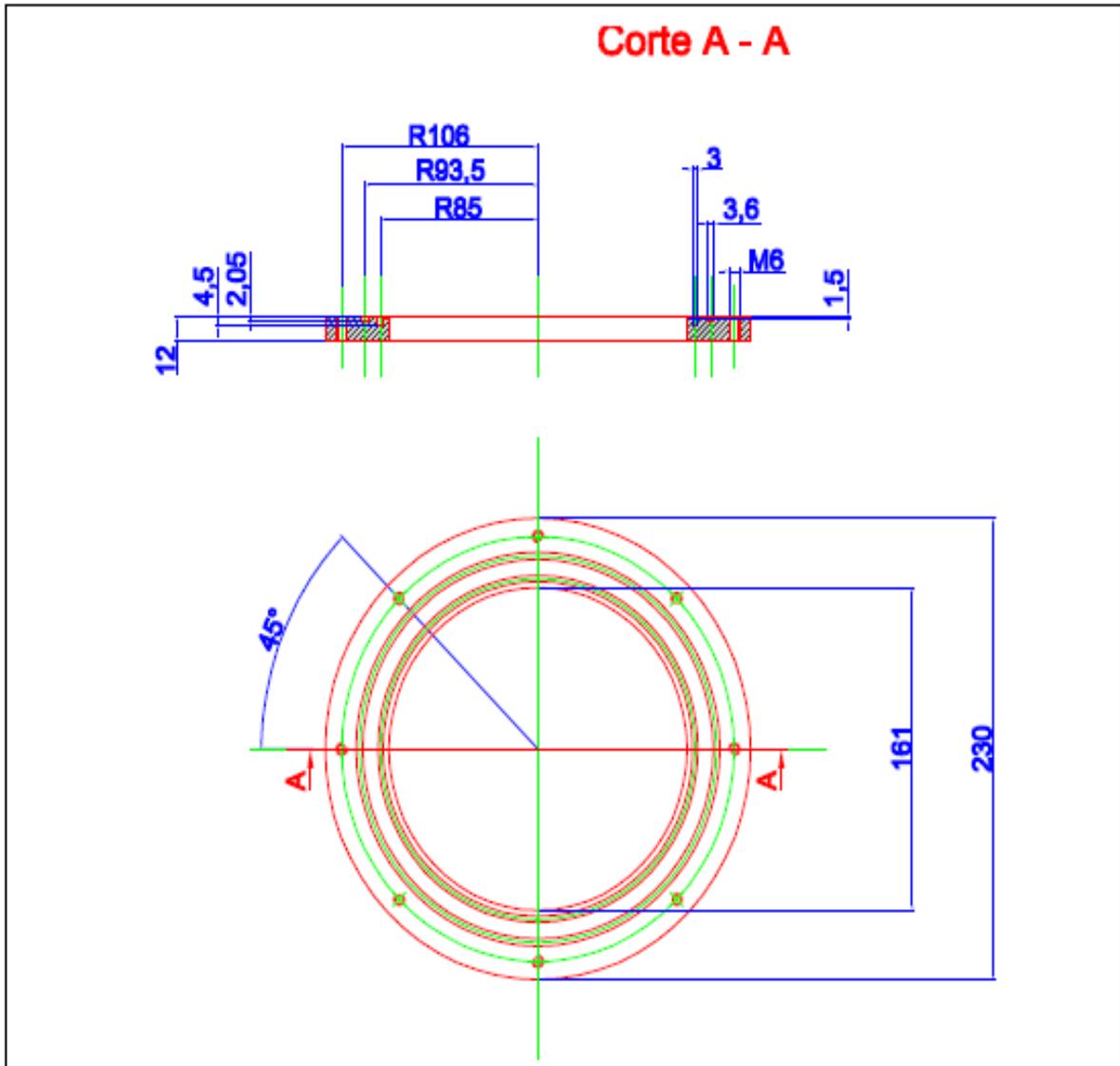


FIGURA VI: Planos de los flanges creados para la cámara de vacío. Ambos flanges poseen los surcos para el o-ring y la soldadura. Se crea también un hilo para pernos M6.

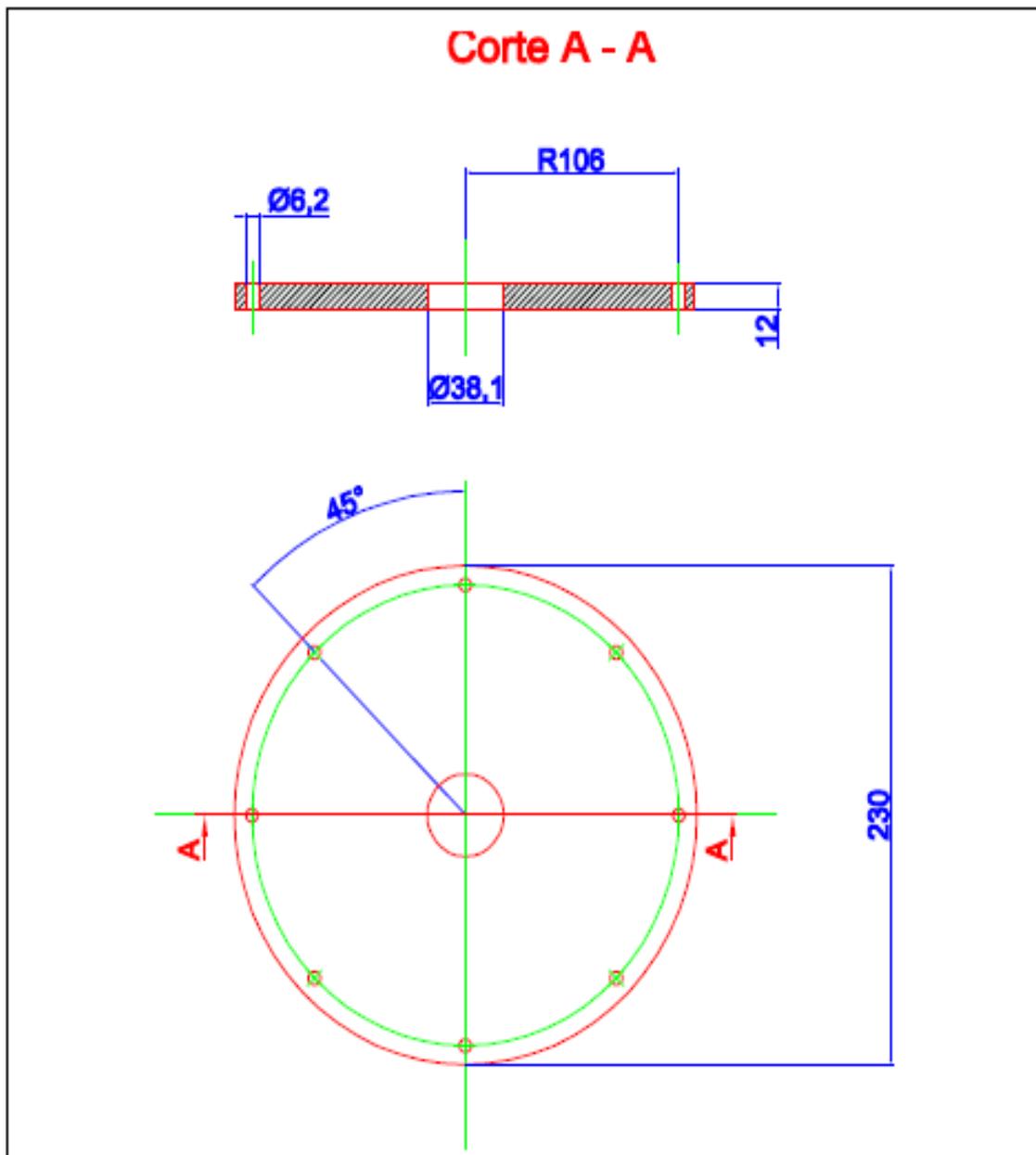


FIGURA VII: Plano para las tapas de la cámara de vacío. La tapa superior de la cámara con la conexión para un tubo de 1-1/2" (terminal NW40) para la conexión de un medidor de presión.

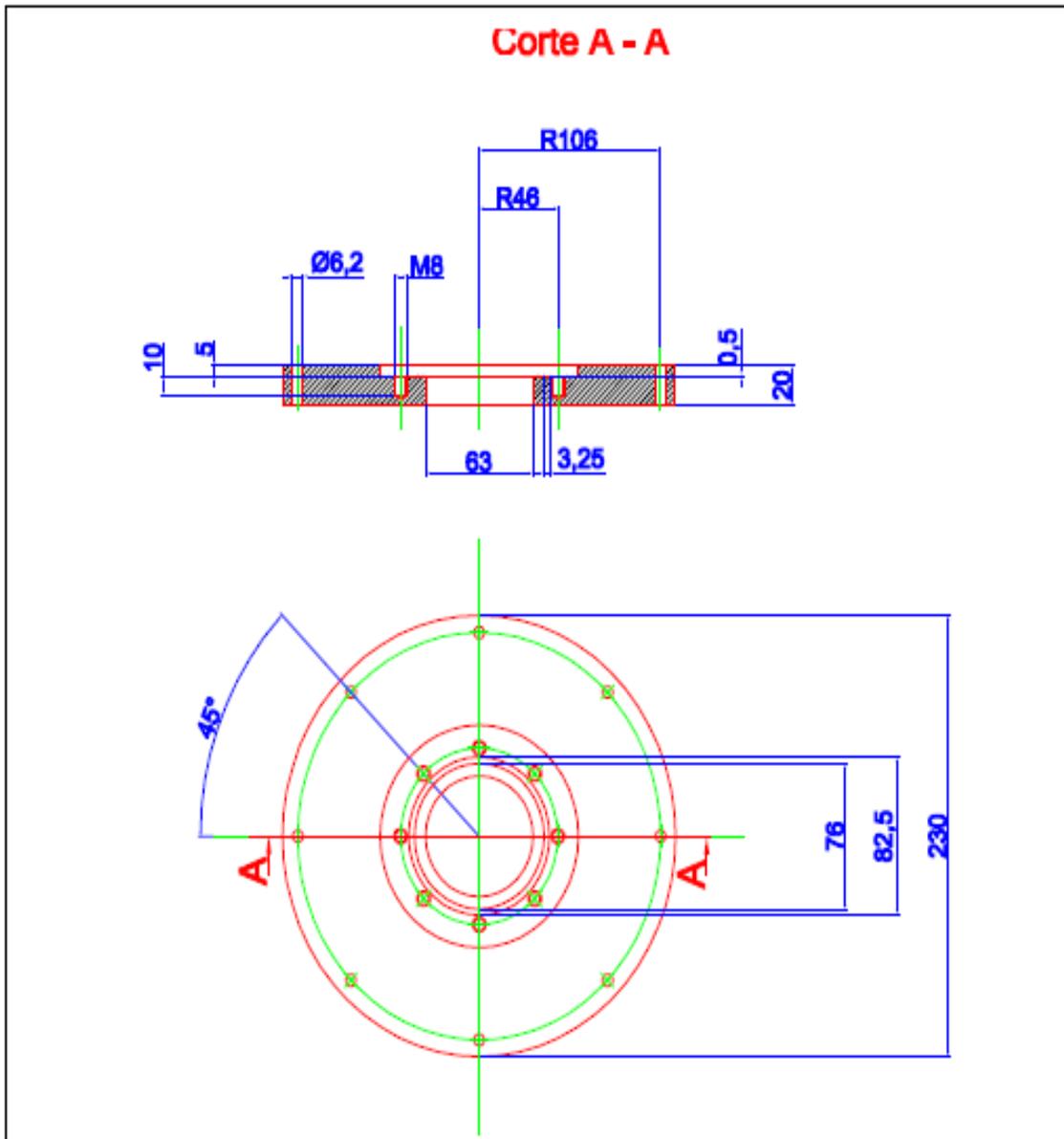


FIGURA VIII: Plano para las tapas de la cámara de vacío. La tapa inferior de la cámara de vacío con la conexión directa a la bomba de vacío. Se diseña de manera tal que el gasket quede dentro de la hendidura de la conexión CF60 de la bomba de vacío.

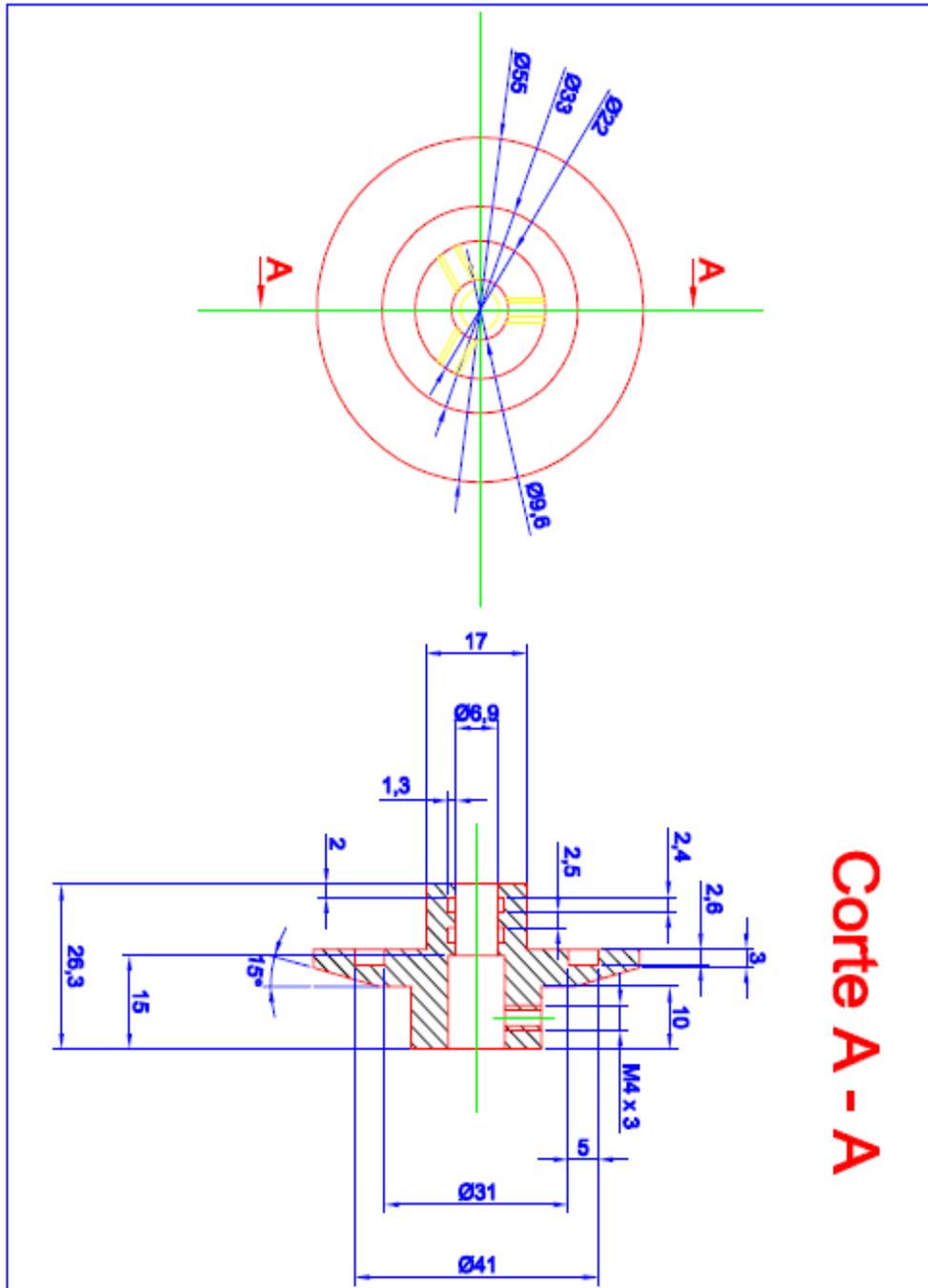


FIGURA IX: Plano para el soporte y entrada del micrómetro en la cámara de vacío. Se realizan surcos dobles para alojar o-rings que mantengan el vaciado de la cámara. Además, la pieza se construye como extensión en sus bordes de una conexión tipo NW40, para así lograr ser utilizado junto a un clamp en la cámara de descarga.

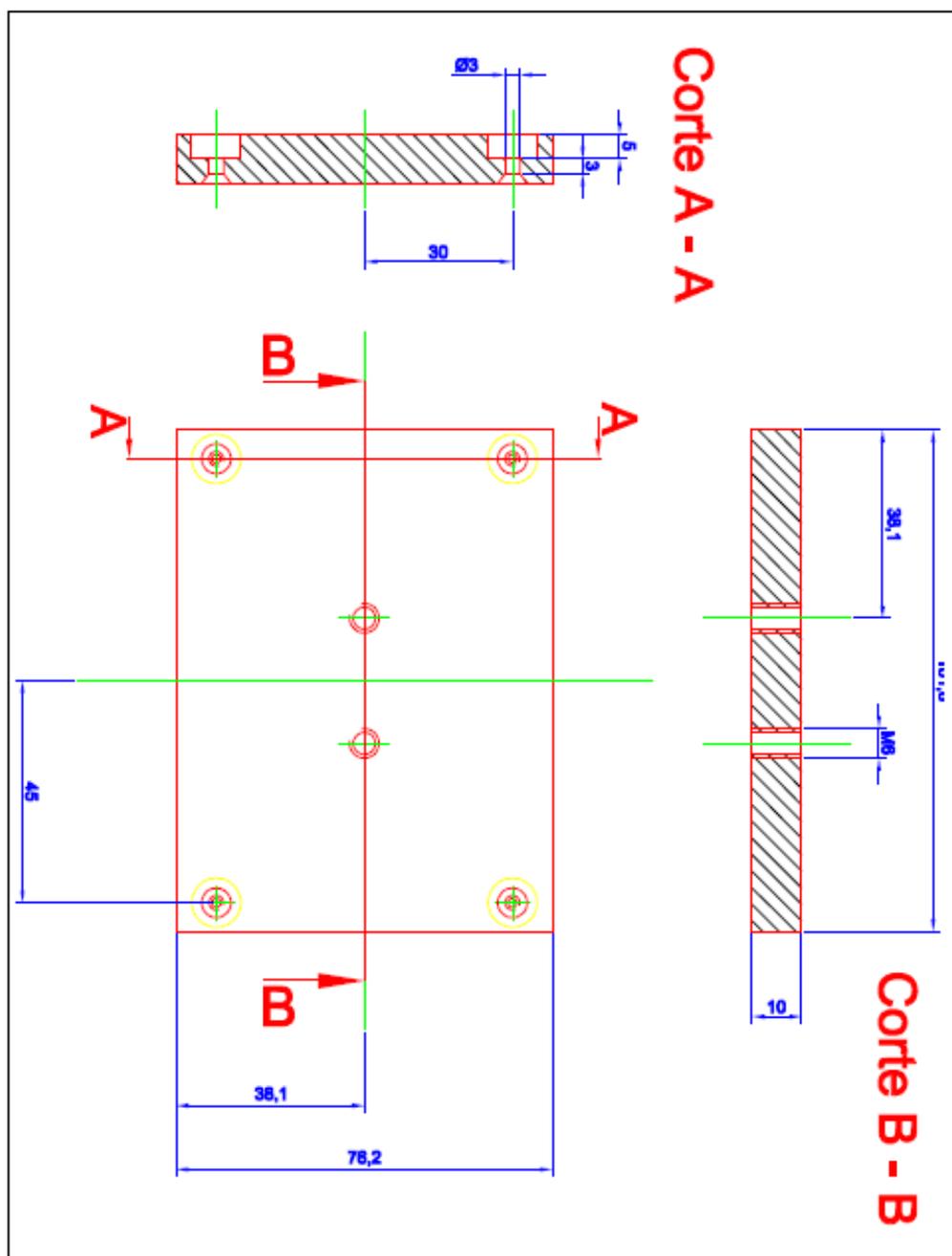


FIGURA X: Plano para el soporte para la plataforma de traslado que contiene la cámara y, sobre la cual, se monta la kinematic mount (PT1) junto al soporte para el espejo (KS1). Las medidas, tanto de las dimensiones como de las barras que soportan la montura, están hechas a partir de la distancia al eje óptico de la descarga, como también a las medidas de la propia plataforma de traslado.

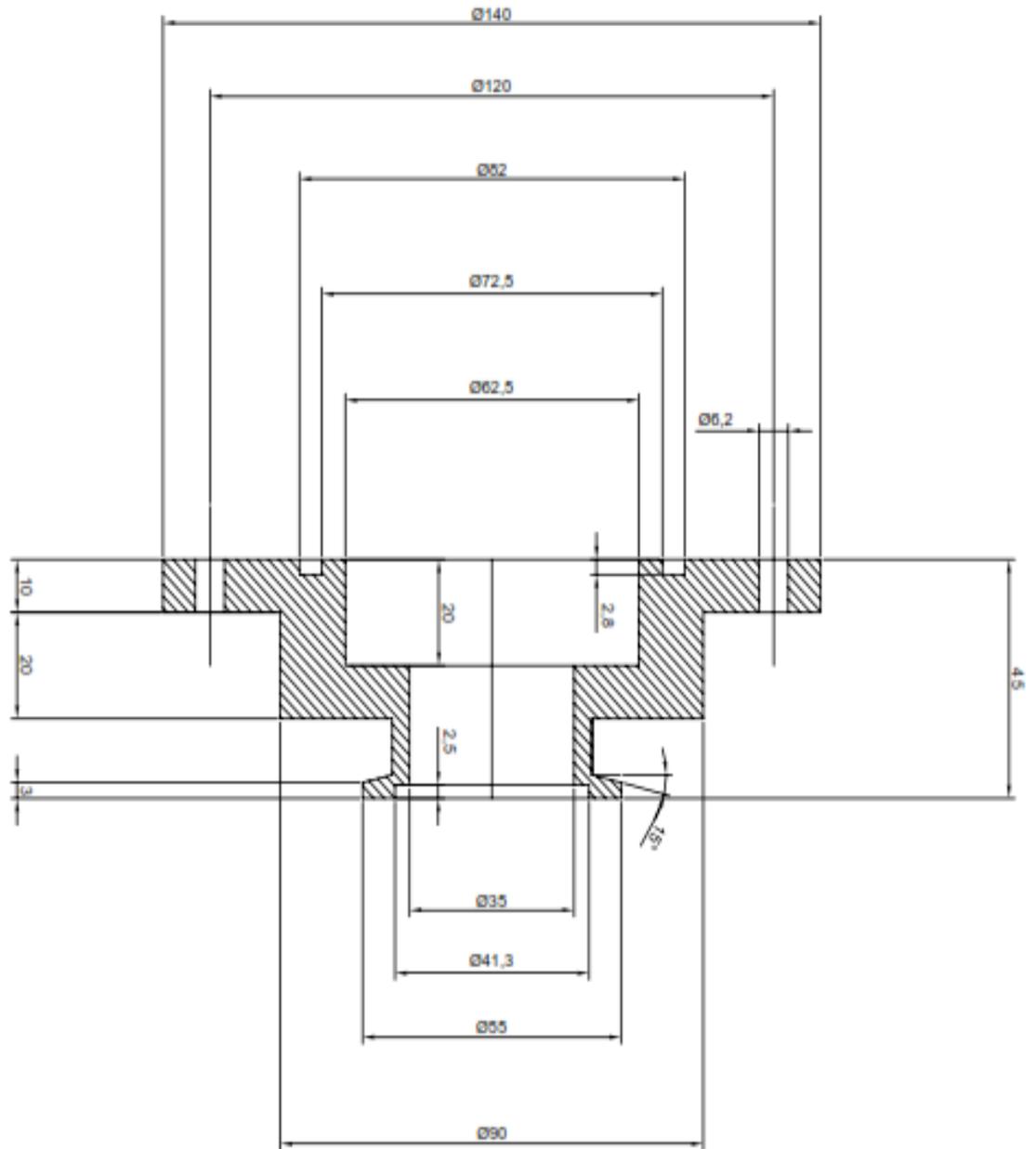


FIGURA XI: Plano para el acople entre la cámara de vacío y el espectrómetro. La parte superior corresponde a la conexión hacia el espectrómetro GISVUV1 mientras que la conexión inferior corresponde a la cámara de vacío con conexión tipo NW40