

***Construcción y ensayo de detectores autoenergizados a utilizarse en la
facilidad para dopaje de silicio del reactor RA-10***

***CARRERA: ESPECIALIZACIÓN EN REACTORES NUCLEARES
Y SU CICLO DE COMBUSTIBLE***

Alumno: Ing. Sergio Gabriel Martinez
Director: Lic. Marcelo Miller

Diciembre de 2018

Índice

Resumen	2
Abstract	3
Capítulo 1: Introducción	4
1.1 Proyecto RA-10.....	4
1.2 Silicio y semiconductores – Dopaje de silicio	6
1.2.1 Introducción a semiconductores.....	6
1.2.2 Aplicaciones de los semiconductores de potencia	8
1.2.3 Dopaje de silicio por transmutación neutrónica.....	9
1.2.4 Características del RA-10 y solución adoptada para el dopaje de silicio	12
1.3 Detectores de neutrones autoenergizados.....	17
1.3.1 Características generales.....	17
1.3.2 Funcionamiento y mecanismos.....	17
1.4 Antecedentes y consideraciones previas	19
1.4.1 Selección del vanadio como material emisor.....	19
1.4.2 Largo de la zona activa	19
1.4.3 Largo total del cable de los detectores	20
1.4.4 Cierre de los extremos y diseño del extremo conector	20
1.4.5 Requisitos técnicos de los detectores:	26
Capítulo 2: Materiales y métodos	27
2.1 Actividades a realizar	27
2.2 Proceso constructivo de los detectores autoenergizados	28
2.2.1 Selección de los detectores existentes	28
2.2.2 Proceso de cortado	29
2.2.3 Perforación y limpieza del extremo lado detector.....	31
2.2.4 Preparación del cierre extremo lado detector	34
2.2.5 Soldado sin aporte del tapón inferior	36
2.2.6 Soldadura con aporte de plata entre pieza copa y cable de aislación mineral.....	38
2.2.7 Soldadura láser entre pasante cerámico y buje de separación	40
2.2.8 Pelado del cable de aislación mineral	44
2.2.9 Soldadura láser con la copa y estanqueidad de las soldaduras	45
2.2.10 Llenado con argón y soldadura láser del conector central	46
2.2.11 Ensayo de soldadura final bajo condiciones de alta humedad	48
2.2.13 Montaje final del buje de cierre y conector BNC.....	50
2.2.14 Soldaduras láser final con buje de cierre	51
2.3 Ensayos y caracterización.....	52
2.3.1 Aislación, continuidad y capacitancia	52
2.3.2 Caracterización: Calibración neutrónica	53
Capítulo 3: Resultados y discusión	54
Capítulo 4: Conclusiones	57
Bibliografía.....	58
Abreviaturas y definiciones	60
Agradecimientos.....	63
Anexo A: Facilidad Central de irradiación de Columna Térmica del RA-3.....	64

Resumen

El reactor multipropósito RA-10 se construye en el Centro Atómico Ezeiza y tendrá como principal objetivo aumentar la producción de radioisótopos. Adicionalmente dispondrá de diferentes instalaciones que permitirán, por ejemplo, el dopaje de silicio a través de transmutación neutrónica para producir material semiconductor. La técnica de dopaje a utilizar generará semiconductores más homogéneamente dopados que otros métodos convencionales del mercado. Esto posicionará al país a la vanguardia de la producción de este recurso estratégico en el ámbito tecnológico.

El objetivo de este trabajo es colaborar y participar en el proceso constructivo de los detectores autoenergizados de vanadio que se utilizarán para determinar la fluencia neutrónica recibida por los lingotes de silicio. Dichos detectores permitirán un seguimiento continuo del flujo neutrónico y de esa forma determinar el tiempo de irradiación necesario para lograr la fluencia requerida, independientemente de las variaciones de dicho flujo a lo largo del tiempo de irradiación.

En particular se documentarán detalladamente los procesos de cierre de ambos extremos, haciendo principal foco en el cierre del extremo del conector, la cual será una etapa original. Para dicho cierre se realizará en 2 o 3 de los detectores los siguientes procesos:

- A. Soldadura con aporte de plata entre pieza copa y cable mineral.
- B. Secado del extremo del cable de aislación mineral basado en la medición de aislación.
- C. Soldadura láser entre piezas.
- D. Ensayo de estanqueidad de las mencionadas soldaduras con un detector de fugas al helio.

Posteriormente se realizarán en al menos 4 detectores los ensayos finales de aislación, continuidad y capacitancia, y se documentará la totalidad de los resultados.

Finalmente se participará en la caracterización de algunos de los detectores por medio de la calibración neutrónica y se documentará la totalidad de los resultados.

Abstract

The multipurpose reactor RA-10 is built at the Ezeiza Atomic Center and its main objective will be to increase the production of radioisotopes. Additionally, it will have different facilities that will allow, for example, silicon doping through neutron transmutation to produce semiconductor material. The doping technique to be used will generate semiconductors more homogeneously doped than other conventional methods on the market. This will position the country at the forefront of the production of this strategic resource in the technological field.

The objective of this work is to collaborate and participate in the construction process of self-energized vanadium detectors that will be used to determine the neutron fluence received by silicon ingots. Said detectors will allow a continuous monitoring of the neutron flux and in this way determine the irradiation time necessary to achieve the required creep, independently of the variations of said flux throughout the irradiation time.

In particular, the closing processes of both ends will be documented in detail, making the main focus on closing the connector end, which will be an original stage. For this closure, the following processes will be carried out in 2 or 3 of the detectors:

- A. Welding with silver contribution between cup piece and mineral wire.
- B. Drying the end of the mineral insulation cable based on the insulation measurement.
- C. Laser welding between pieces.
- D. Sealing test of the aforementioned welds with a helium leak detector.

Subsequently, the final insulation, continuity and capacitance tests will be carried out on at least 4 detectors, and all the results will be documented.

Finally, we will participate in the characterization of some of the detectors by means of neutron calibration and the totality of the results will be documented.

Capítulo 1: Introducción

1.1 Proyecto RA-10

El RA-10 tiene como principal motivación ampliar las capacidades actuales de producción de radioisótopos, garantizando la capacidad de producción y el suministro ininterrumpido.

Adicionalmente el RA-10 mejorará y permitirá [1][2][3]:

- Obtener nuevos productos de fisión o de captura neutrónica, aptos para la medicina nuclear o el estudio y ensayos con radiotrazadores.
- Favorecer novedosos estudios de física nuclear de avanzada, mediante el desarrollo de facilidades frías y térmicas para la aplicación de técnicas neutrónicas.
- Estudiar a la materia y ensayar con las conversiones y procesos fisicoquímicos que ocurren durante las reacciones nucleares de fisión y su posterior decaimiento radiactivo, con el fin de poder predecirlas y contribuir al desarrollo de la tecnología nuclear, ciencia de materiales y biología, entre ellos estudios de daño por radiación y evaluación de corrosión.
- Realizar “mock-up” de los diseños de combustibles nóveles, permitiendo consolidar las capacidades nacionales relacionadas con la producción de combustible nuclear, incluyendo miniplacas, combustibles tipo MTR y de potencia.
- Producir lingotes de silicio dopados por transmutación para semiconductores de potencia.

Producción de Radioisótopos

Argentina ha producido Mo-99 para aplicaciones médicas desde 1985 en el reactor RA-3, operado por CNEA, siendo este reactor el primero en reconvertirse para utilizar LEU (Uranio con bajo enriquecimiento) en 2002, produciendo en forma permanente alrededor de 400 six-dayCi/week, suficientes como para abastecer la demanda interna y aproximadamente un tercio de la demanda de Brasil. [4]

Es importante destacar la creciente demanda de radioisótopos, dado el contexto internacional, es posible identificar una oportunidad única para consolidar una posición de liderazgo en la provisión de radioisótopos para aplicaciones médicas, con capacidad de producción suficiente para asegurar la provisión de radioisótopos a toda Sudamérica.

Reactor	País	Inicio de operación	Expiración de licencia	Participación global
HFR	Holanda	1961	2024	23
BR-2	Bélgica	1961	2026	21
NRU	Canadá	1957	2018	19
SAFARI-1	Sudáfrica	1965	2030	13
María	Polonia	1974	2030	9
OPAL	Australia	2006	2055	8
LVR-15	Republica Checa	1957	2028	7

Tabla 1: participación global en la producción de Mo-99

La tabla 1 muestra los reactores que producen más del 95 % del Mo-99 [5]. Debido a la antigüedad de estos reactores algunos probablemente deban finalizar sus operaciones antes de 2026. En este contexto, las nuevas instalaciones del RA-10 permitirían producir Mo-99 a partir de 2022 con una capacidad de 2,500 6-dayCi/week, lo que cubriría la demanda nacional y regional, posiblemente contribuyendo a la demanda global. También estará en condiciones de incrementar la producción de lutecio-177 e iridio-192, y explorar la generación de nuevos radioisótopos como el bismuto-213. [6]

1.2 Silicio y semiconductores – Dopaje de silicio

1.2.1 Introducción a semiconductores

Los electrones de los átomos pueden ser divididos en dos grandes grupos [7]:

- Electrones ligados al núcleo: orbitan capas interiores del átomo, cerca de este y muy difícilmente pueden escapar del mismo.
- Electrones de valencia: orbitan en capas exteriores del átomo, en niveles superiores de energía y pueden escapar en determinadas condiciones del átomo. Del mismo modo, el átomo acepta en tales niveles electrones externos.

Los electrones de valencia determinan las propiedades químicas y eléctricas de un material, pudiendo diferenciarlos en los siguientes:

- Materiales conductores (metales): Los metales tienen estructura cristalina, ya que los núcleos de los átomos que componen un metal están perfectamente ordenados y los electrones de valencia de los mismos están tan débilmente atados a sus respectivos átomos que cada uno de ellos es compartido por todos los átomos de la estructura. Es por ello que en el metal se forma una “nube electrónica” cuyos electrones son compartidos por toda la estructura, y ninguno de ellos está atado particularmente a alguno de los átomos.
- Material aislante: Los electrones de valencia están ligados fuertemente a sus respectivos núcleos atómicos. Los electrones de uno de sus átomos no son compartidos con otros átomos.
- Materiales semiconductores: Estos materiales se comportan como aislantes a bajas temperaturas pero a temperaturas más altas se comportan como conductores. La razón de esto es que los electrones de valencia están ligeramente ligados a sus respectivos núcleos atómicos, pero no lo suficiente, pues al añadir energía elevando la temperatura son capaces de abandonar el átomo para circular por la red atómica del material. En cuanto un electrón abandona un átomo, en su lugar deja un hueco que puede ser ocupado por otro electrón que estaba circulando por la red.

Los materiales semiconductores más conocidos son el silicio (Si) y germanio (Ge), los cuales poseen cuatro electrones de valencia en su último nivel. Hay que destacar que tales materiales forman también una estructura cristalina, variando su nivel de conductividad con factores tales como las impurezas del material, su geometría, los campos eléctricos, la temperatura, la presión o la luz. Esto los hace adecuados para muchas aplicaciones de sensores. Y aún más importante, la interdependencia de las variables de entrada y salida los hace implícitamente controlables.

A temperatura ambiente, algunos electrones de valencia absorben suficiente energía calorífica para librarse del enlace covalente y moverse a través de la red cristalina, convirtiéndose en electrones libres. Si a estos electrones, que han roto el enlace covalente, se les somete al potencial eléctrico de una pila, se dirigen al polo positivo.

Cuando un electrón libre abandona el átomo de un cristal de silicio, deja en la red cristalina un hueco, que con respecto a los electrones próximos tiene efectos similares a los que provocaría una carga positiva. Los huecos tienen la misma carga que el electrón pero con signo positivo.

El comportamiento eléctrico de un semiconductor se caracteriza por los siguientes fenómenos:

- Los electrones libres son portadores de carga negativa y son atraídos por las cargas positivas.
- Los huecos son portadores de carga positiva y se dirigen hacia el polo negativo de la pila.
- Al conectar una pila, circula una corriente eléctrica en el circuito cerrado, siendo constante en todo momento el número de electrones dentro del cristal de silicio.
- Los huecos sólo existen en el seno del cristal semiconductor. Por el conductor exterior sólo circulan los electrones que dan lugar a la corriente eléctrica.

A los materiales semiconductores puros se les conoce como semiconductores intrínsecos. Por otro lado, los semiconductores extrínsecos son materiales semiconductores puros contaminados con impurezas en mínimas proporciones (una partícula entre un millón). Al proceso intencional de contaminación se le denomina dopaje.

En la figura 1 se observa que según el tipo de dopaje que se le realice al material existen dos tipos [8]:

Tipo N: En este caso se contamina el material con átomos de valencia 5 (Impurezas pentavalentes), como son Fosforo (P), Arsénico (As) o Antimonio (Sb). Al introducirlos, se fuerza al quinto electrón de este átomo a vagar por el material semiconductor, pues no encuentra un lugar estable en el que situarse. Al conjunto de estos electrones se les llama electrones mayoritarios.

Tipo P: En este caso se contamina el material semiconductor con átomos de valencia 3 (Impurezas trivalentes), como son Boro (B), Galio (Ga) o Indio (In). Si se introduce este átomo en el material, queda un hueco donde debería ir un electrón. Este hueco se mueve fácilmente por la estructura como si fuese un portador de carga positiva. En este caso, los huecos son portadores mayoritarios.

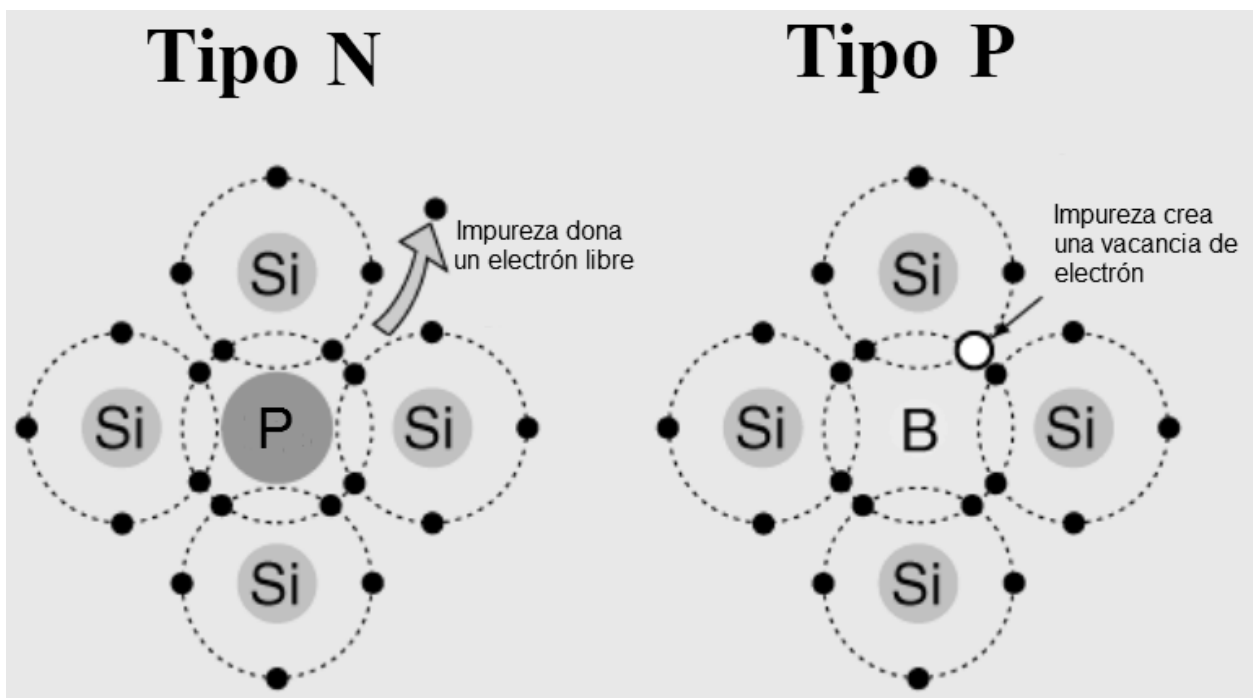


Figura 1: Diferencia en semiconductores del tipo N y tipo P

1.2.2 Aplicaciones de los semiconductores de potencia

La electrónica de los semiconductores puede clasificarse, según el tipo de procesamiento de la señal, en tres áreas básicas:

- La analógica trata principalmente de la operación física, eléctrica y de las aplicaciones de dispositivos semiconductores utilizados como amplificadores de señal.
- La digital trata la aplicación de los dispositivos electrónicos como conmutadores o llaves, funcionando solo en dos estados: encendido (ON) o apagado (OFF).
- La de potencia trata sobre la operación y aplicaciones de dispositivos electrónicos utilizados para el control y conversión de la potencia eléctrica.

Debido a estas diferencias de aplicación se debe seleccionar el tipo más adecuado de componente electrónico según la función y las especificaciones del sistema a desarrollar.

El término “revolución de los semiconductores” se suele asociar con la reciente y rápida aparición de nuevas tecnologías de comunicaciones, proceso de datos y ocio. Un número sin precedente de personas utilizan medios sociales o participan en el comercio por internet gracias a la capacidad de fabricación de semiconductores con altos niveles de integración y bajos precios unitarios. Menos visible, pero igualmente fundamental para los cambios profundos de las recientes décadas, es la revolución de los semiconductores para la electrónica de potencia.

La electrónica de potencia permite transformar la electricidad entre distintas frecuencias y tensiones de forma segura, eficiente y rentable. Por ejemplo, se estima que el 65 por ciento de toda la electricidad generada la consumen los motores eléctricos, por lo tanto, la posibilidad de controlar los motores de forma más eficiente con electrónica de potencia representa un gran potencial de ahorro en términos de recursos y emisiones. Asimismo, el empleo de la electrónica de potencia en la red de transporte eléctrico (por ejemplo, con FACTS y HVDC que se describirán más adelante) aumenta la controlabilidad del flujo de electricidad y permite transportar más potencia con menos pérdidas. En el campo de las energías renovables, el gran crecimiento de la generación solar y eólica de los últimos años no habría sido viable sin convertidores de electrónica de potencia para conectar a la red [9][10].

1.2.3 Dopaje de silicio por transmutación neutrónica

Definición de NTD

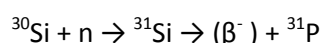
La transmutación nuclear es el cambio de un núcleo atómico a otro a través de una reacción nuclear. La transmutación generalmente es producida por la interacción con neutrones, fotones o partículas cargadas de alta energía. Si un núcleo absorbe un neutrón, el núcleo resultante puede estar en un estado inestable y someterse a algunos procesos para estabilizarse. Si su número atómico se cambia en este proceso, el átomo original cambia a un nuevo elemento y, por lo tanto, tendrá diferentes propiedades [11].

El dopaje es el proceso de agregar intencionalmente una pequeña cantidad de impureza a un material para mejorar sus propiedades con fines específicos. Particularmente, el dopaje en tecnología de semiconductores es la inserción o creación de impurezas en un material semiconductor intrínseco o extrínseco para mejorar sus propiedades eléctricas.

Por lo tanto, el proceso de NTD (Neutron Transmutation Doping) se define como el proceso mediante el cual la irradiación de neutrones crea la impureza en un semiconductor intrínseco o extrínseco para aumentar su valor para diversos usos.

Los átomos de silicio natural están compuestos de tres isótopos, ^{28}Si (abundancia: 92.23%), ^{29}Si (abundancia: 4.67%) y ^{30}Si (abundancia: 3.10%). Entre ellos, cuando los átomos de ^{28}Si o ^{29}Si absorben un neutrón térmico, se cambian a otros átomos de silicio estables. Sin embargo, la absorción de un neutrón rápido conduce a la producción directa o indirecta (a través del decaimiento) de isótopos de Al o Mg. Si bien la probabilidad de este tipo de absorción es aproximadamente dos órdenes de magnitud menor a la probabilidad de absorción de neutrones térmicos, se busca minimizar esta perturbación mediante la provisión de un espectro de neutrones bien termalizado.

En el caso de ^{30}Si , la captura de neutrones térmicos conduce al isótopo inestable ^{31}Si , que sufre una desintegración beta. El producto de este proceso es un átomo de fósforo (^{31}P). Sin tener en cuenta la emisión de antineutrino asociada, el proceso es el siguiente:



El átomo de ^{31}P es una impureza pentavalente estable del grupo 15 en la tabla periódica. Todos los elementos componentes de este grupo tienen cinco electrones en su capa más externa, es decir, una impureza tipo N, el dopaje se logra a través de este proceso. Dado que la irradiación de Si con neutrones térmicos da como resultado una sola reacción nuclear y además que la vida media de ^{31}Si es de solo 2,62 h, es posible implementar la técnica de dopaje NTD a escala industrial [11].

Mercado y producción de silicio dopado

El método NTD tiene varias ventajas en la producción de semiconductores de alta potencia, en comparación con otras tecnologías convencionales de dopaje como la implantación de iones o el método de difusión, permitiendo la construcción de semiconductores de potencia de la mejor calidad disponible en el mercado.

La demanda mundial para NTD se ha incrementado rápidamente desde principios de la década del 90, sin embargo se estabilizó hasta mediados de la década del 2000 en alrededor de 100 ton/año. A partir de entonces se presentaron nuevas circunstancias, y la demanda de semiconductores de potencia se incrementó rápidamente acorde al incremento del uso de tecnologías de energías verde [11].

Un ejemplo significativo es la rápida expansión de vehículos eléctricos híbridos, sumado al transporte, generación de electricidad solar y eólica, las cuales se incrementan rápidamente con el objetivo de disminuir la contaminación del aire y especialmente los gases de efecto invernadero. Todas estas evoluciones requieren cada vez más dispositivos de potencia de alta calidad.

La producción de este tipo de silicio se concentra en solo 5 reactores operativos a nivel mundial [11]:

- BR2 en Bélgica, capacidad de 15000 Kg/año.
- HANARO en República de Corea del sur, capacidad de 15000 Kg/año.
- OPAL, en Australia, capacidad de 40000 Kg/año.
- SAFARI-1 en Sudáfrica, capacidad de 14000 Kg/año.
- FRM-II en Alemania, capacidad de 14000 Kg/año.
- JRR-3M en Japón (temporalmente apagado), con capacidad de 2354 Kg/año.

Según la base de datos del sitio oficial de la OIEA (Transmutation Si-doping Facilities) [12], actualmente tienen identificadas 29 facilidades/instalaciones en reactores de investigación distribuidos en 20 países, las cuales están en condiciones de producir silicio NTD. En la tabla 2 se observa que algunas tienen declarada una muy baja capacidad, destacándose el RA-10 como la de mayor capacidad hasta ahora.

País	Nombre instalación	MW	Estado Actual	Capacidad anual Masa Si (Kg)
Argentina	RA-10	30	EN CONSTRUCCIÓN	80000
Australia	OPAL	20	OPERATIVO	40000
Bélgica	BR-2	100	OPERATIVO	15000
Corea del Sur	HANARO	30	OPERATIVO	15000
Sudáfrica	SAFARI-1	20	OPERATIVO	14000
Alemania	FRM II	20	OPERATIVO	14000
Federación Rusa	WWR-TS	15	OPERATIVO	5000
Federación Rusa	IRT-T	6	OPERATIVO	4500
China	MJTR	5	OPERATIVO	3000
Japón	JRR-3M	20	APAGADO (TEMPORAL)	2354
Suecia	JEEP II	2	OPERATIVO	2000
Federación Rusa	RBT-10/2	7	OPERATIVO	500
Republica Checa	LVR-15 Rez	10	OPERATIVO	345

Tabla 2: Listado de facilidades para producir NTD-Si

Expectativa para el futuro

Una proyección positiva para el NTD puede hacerse en la industria automovilística, la producción mundial de automóviles en 2005 fue de alrededor de 60 millones, pudiendo incrementarse a más de 100 millones en 2030. Se considera la posibilidad que para 2030 el 50% de los vehículos fabricados estén equipados con motores híbridos, eléctricos o celdas de combustible, es decir, 50 millones de vehículos. Si una oblea de silicio NTD de 6 pulgadas es usada por cada auto, se estima que se requerirían 2000 toneladas por año para satisfacer la demanda. Si el suministro de NTD-Si no llegara a ser suficiente, es posible que la industria pueda recurrir a otras tecnologías más costosas, sin embargo, existen grandes presiones en la industria para expandir rápidamente las tecnologías denominadas verdes, lo que garantiza que la demanda en el futuro de NTD-Si se incrementará notablemente [11].

Otro mercado en constante crecimiento para el NTD son los sistemas de transmisión de electricidad FACTS (Sistemas Flexibles de Transmisión en Corriente Alterna) y HVDC (Alta tensión en Corriente Continua). Los HVDC son conocidos como “autopistas de la electricidad” por su capacidad de transmitir grandes cantidades de electricidad a largas distancias, con la mayor eficiencia. Un sistema HVDC puede transmitir hasta cinco veces más de potencia eléctrica que los sistemas tradicionales de corriente alterna [9][10]. Los dispositivos FACTS se han convertido en herramientas indispensables a considerar en la planificación y expansión de las redes eléctricas, no solo para reducir o incluso eliminar sus limitantes, sino además para facilitar su operación y control, mejorando su confiabilidad. Todo esto gracias a la flexibilidad y rapidez de actuación de los sistemas de control y a las ventajas que ofrecen los dispositivos electrónicos en cuanto a controlabilidad. Ambas tecnologías, tanto FACTS como HVDC, son complementarias, y que a pesar de que la palabra “flexible” se usa solamente en la descripción de la primera, no es una característica exclusiva de la misma. Ambas tecnologías hacen un uso extensivo de convertidores AC-DC, el cual es el convertidor básico de la tecnología HVDC [10].

1.2.4 Características del RA-10 y solución adoptada para el dopaje de silicio

El RA-10 será una instalación multipropósito, ya que permitirá la producción de radioisótopos, irradiación de materiales y combustibles, haces de neutrones y producción de silicio dopado.

Entre las características que tendrá el reactor podemos enumerar las siguientes [3]:

- Pileta abierta.
- Potencia de 30 MW térmicos.
- Combustible de bajo enriquecimiento (LEU: 20% de U-235), tipo placa MTR.
- Tanque reflector con D₂O.
- Moderador y refrigerante H₂O.
- Dirección del caudal en el núcleo ascendente.
- 2 sistemas de parada diversos e independientes

En la figura 2 se ilustra un corte transversal de la pileta del reactor con la ubicación del núcleo, tanque reflector y pileta de servicio [13].

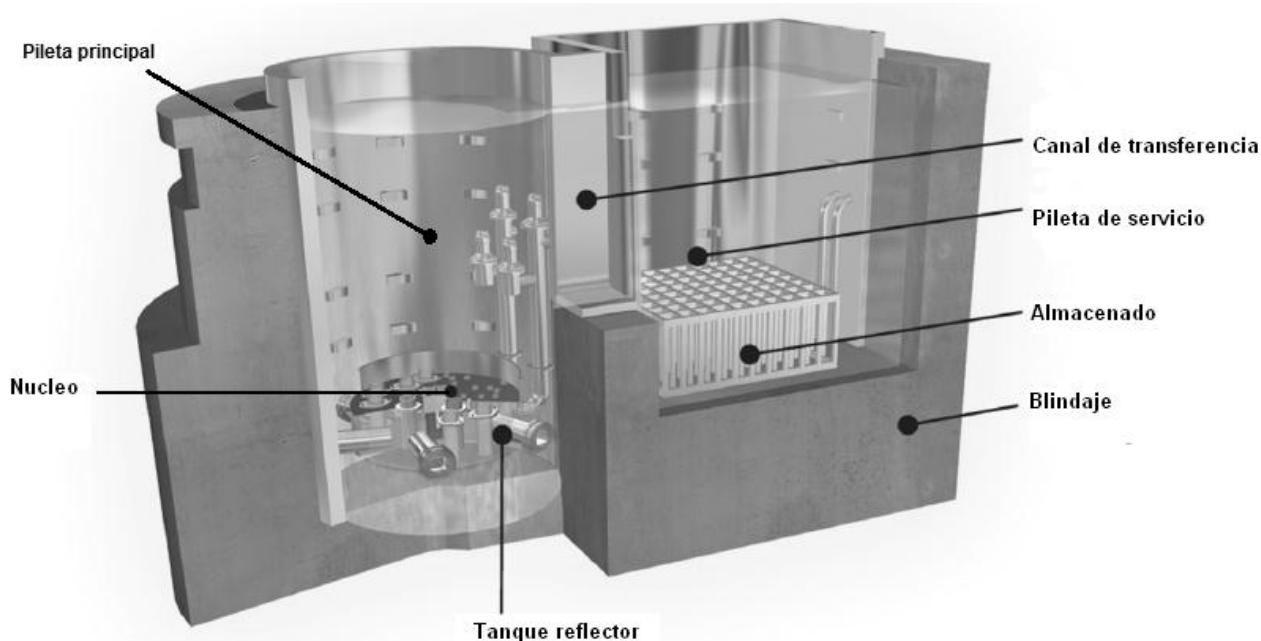


Figura 2: Corte esquemático del reactor

Como se explicó anteriormente, este reactor tendrá facilidades para irradiar con neutrones lingotes de silicio. De esta forma se generarán impurezas de fósforo a través de transmutaciones neutrónicas inducidas. De acuerdo a la concentración de impurezas generadas, se podrán obtener semiconductores con distintos niveles de resistividad con el fin de lograr las características necesarias para el uso en aplicaciones tecnológicas específicas. Las impurezas generadas serán directamente proporcionales a la fluencia neutrónica en el lingote durante el tiempo de su irradiación.

En el tanque reflector del reactor habrá 5 posiciones (figura 3) para el dopaje de silicio: 2 de 6'', 2 de 8'' y una de 10'', las piezas de silicio a irradiar serán cilíndricas y de hasta 600 mm de longitud (denominadas lingotes), estimando una producción máxima de 80 toneladas anuales.

Seguidamente se describe en forma sintética cuál fue la propuesta adoptada para lograr la uniformidad radial y axial.

Irradiación radialmente uniforme

La uniformidad radial se asegura posicionando al silicio en una zona del reflector donde exista el menor gradiente de flujo térmico y haciendo rotar al silicio durante el tiempo que perdure la irradiación.

El concepto de rotación es simple, pero su ejecución es más compleja que otros métodos. Se han desarrollado algunos sistemas con una cadena metálica conectada a un motor paso a paso para la rotación, o en el caso del reactor OPAL se ha adoptado un concepto de soporte de agua [11].

Irradiación axialmente uniforme

En cuanto a la uniformidad axial, la misma se puede obtener instalando una pantalla absorbente que aplane al flujo neutrónico antes de que éste alcance al silicio. El procedimiento de irradiación de este método es relativamente simple en comparación con otros métodos. Sin embargo, dado que la distribución del flujo de neutrones axiales podría variar espacialmente según la posición de las barras de control y el uso de otras facilidades, se debe tener en cuenta la influencia de estas eventuales variaciones antes de aplicar este método.

Esta solución ya se utilizó en la década de 1990 en el reactor ASTRA en Austria y más recientemente se ha adoptado en OPAL, HANARO y FRM II [11].

En la figura 3 se presenta la distribución dentro del tanque reflector [3], donde se observa que los silicios se encuentran ubicados en la periferia del tanque, cumpliendo con la premisa que deben residir en una zona de bajo gradiente de flujo térmico.

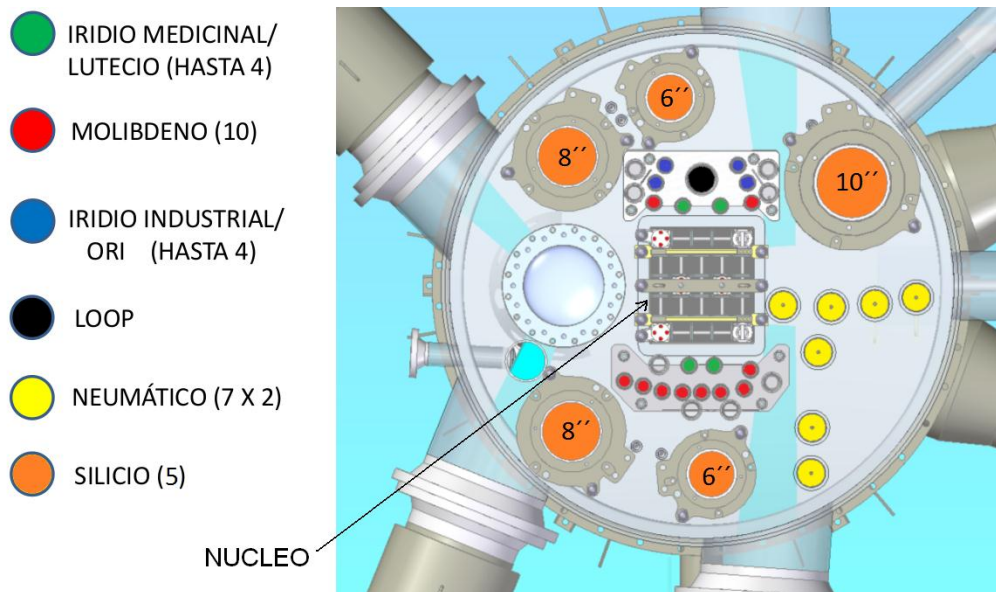


Figura 3: Detalle de las facilidades dentro del tanque reflector

Dada la importancia de la uniformidad del dopante, se hicieron estudios con el fin de lograr un diseño para optimizar este parámetro. De acuerdo a los requerimientos comerciales, la fluctuación en la uniformidad del agente dopante debía ser igual o menor al 3% del valor promedio [2].

En el caso del RA-10, el diseño del aplanador de flujo consiste en utilizar distintos espesores de materiales con alta sección eficaz de absorción para las regiones de alto flujo neutrónico y materiales con baja sección eficaz de absorción para las zonas de bajo flujo, logrando de esta manera obtener un flujo axialmente plano en la zona del silicio [14].

Monitoreo del flujo de neutrones con detectores autoenergizados

La medición del flujo de neutrones es indispensable en el proceso NTD para garantizar la calidad de la irradiación. En la facilidad de irradiación de NTD se necesita una supervisión permanente del flujo de neutrones para lograr una fluencia predeterminada, que generalmente se logra mediante detectores de neutrones autoenergizados (SPND) [11]. En la sección 1.3 “Detectores de neutrones autoenergizados” se desarrollará y explicará el funcionamiento de estos detectores y sus características principales.

Como el SPND se debe ubicar solo fuera del lingote, su señal se debe calibrar con respecto al flujo de neutrones en el lingote. Pero el factor de calibración puede variar dependiendo de muchos factores, como la configuración geométrica del núcleo, la posición de las barras de control, el quemado del combustible, el quemado del propio emisor del SPND, etc. Por lo tanto, se requiere una caracterización cuidadosa del factor de calibración a largo plazo.

Para garantizar el control eficiente del silicio en todas las etapas del proceso de irradiación se debe mantener un buen sistema de documentación. En general, la documentación para el proceso de NTD se puede dividir en dos grupos, como la documentación para fines comerciales y la garantía de calidad. Por ejemplo, cada pieza de silicio puede ser documentada por el nombre del cliente, número de envío, fecha de llegada, número de irradiación, identificaciones de cristal, diámetro, longitud, dosis de neutrones requeridas, instalación de irradiación utilizada, fecha y horas de irradiación, detalles de la rotación, etc.

Por esta razón, la precisión y el funcionamiento del detector autoenergizado juega un rol importante, ya que se incluye en la documentación que garantiza la calidad del silicio producido, donde se incluye las señales del SPND durante la irradiación de cada lingote de silicio como evidencia del proceso [11].

La figura 4 describe conceptualmente la disposición del lingote con respecto al aplanador y el detector autoenergizado [14], detallando las características del flujo neutrónico recibido por el lingote y el medido por el SPND.

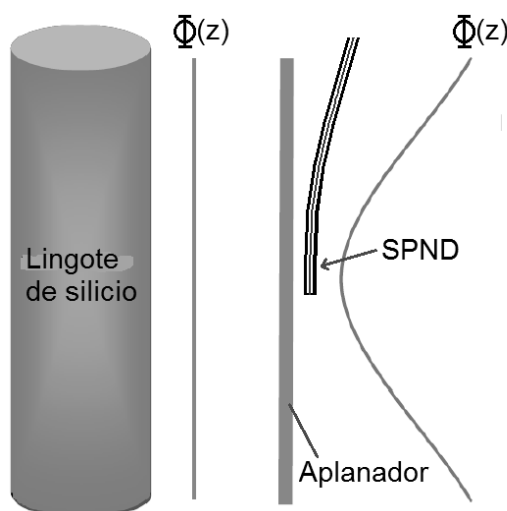


Figura 4: Disposición del lingote, aplanador y SPND

La figura 5 indica esquemáticamente el recorrido del cable para la instalación del detector dentro de la pileta del reactor. La figura 6 muestra detalles constructivos básicos del sistema de dopaje de silicio y la ubicación del SPND dentro del tubo guía.

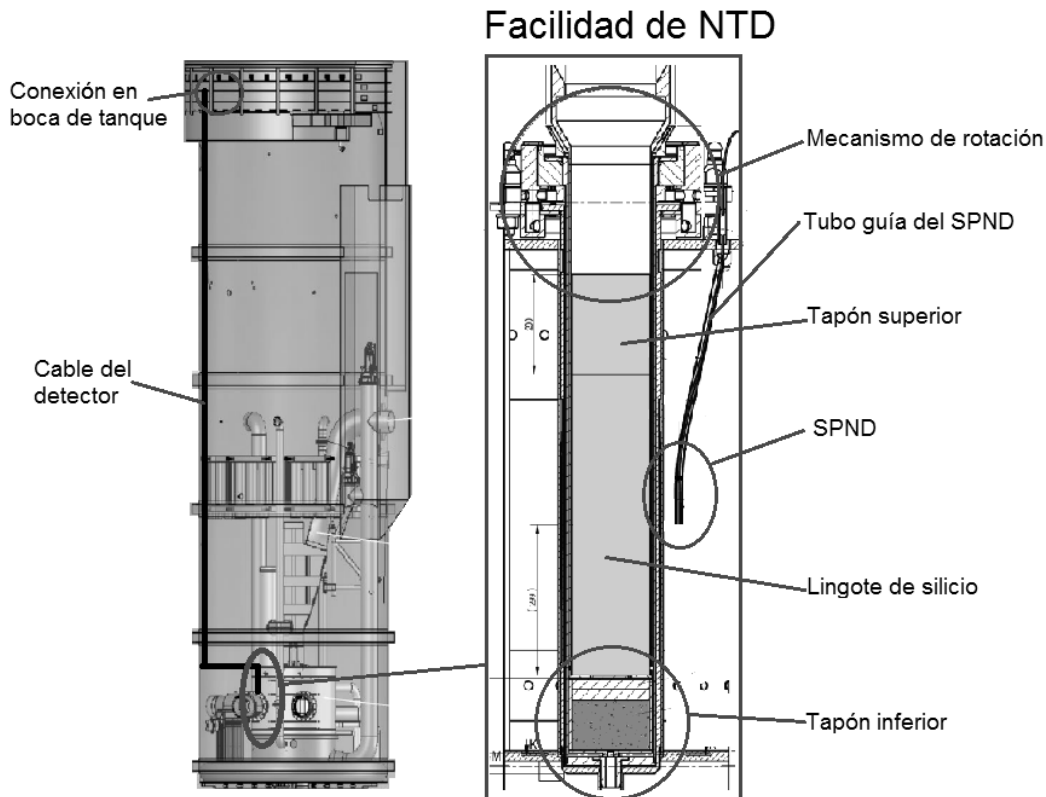


Figura 5: Detalle de la pileta del RA-10

Figura 6: la ubicación del SPND en la facilidad de NTD.

El lado detector se enhebrará por un tubo guía vertical de acero inoxidable paralelo a la pared de la pileta del reactor hasta llegar a la altura de la cara superior del tanque reflector. Desde allí se canalizará en forma horizontal hasta su posición en la facilidad NTD correspondiente. Luego se enhebrará por la boquilla donde se ingresará al tubo guía de zircaloy (alojamiento del SPND mostrado en la figura 6) el cual lo hace coincidir con el centro del lingote de silicio. Para el ingreso al alojamiento se requiere un cambio de dirección de 90° y para no someter el cable del detector a esfuerzos se deberá realizar “un rulo” respetando el radio de curvatura aconsejable de 50mm. A diferencia de lo que se realizó en el OPAL, el diseño del alojamiento para el SPND está fuera del aplanador y del tubo rotador, permitiendo el recambio del detector sin necesidad de desmontar el sistema de rotación del lingote de silicio [15].

El extremo superior del cable tendrá un conector para su conexión hacia la correspondiente electrónica. Dicho extremo ingresará en las paredes superiores de la pileta (boca de tanque), donde estarán las borneras de conexión correspondientes.

1.3 Detectores de neutrones autoenergizados

1.3.1 Características generales

En los detectores de neutrones autoenergizados (SPND o DAE), las interacciones de neutrones y los núcleos atómicos se usan para producir una corriente que es proporcional a la tasa de fluencia de neutrones (flujo).

En comparación con otros detectores, presentan las siguientes ventajas [16]:

- No necesita fuente de alimentación (de ahí el nombre de autoenergizado)
- Estructura simple y robusta.
- Requieren componentes electrónicos relativamente simples para su utilización.
- Tamaño "mecánico" relativamente pequeño, adecuado para la instalación en el núcleo.
- Aptos para trabajar en condiciones de alta temperatura y presión.
- Genera una señal lineal reproducible, proporcional al flujo neutrónico.
- Bajo nivel de "quemado" (depende del material del emisor).

Sin embargo, también hay algunas desventajas:

- Limitado margen de operación debido a la sensibilidad neutrónica relativamente baja.
- Aporte de señal del cable no despreciable.
- Señal retardada (para algunos emisores).

1.3.2 Funcionamiento y mecanismos

Los detectores de neutrones autoenergizados se utilizan ampliamente para la medición del flujo en el núcleo del reactor. Su diseño es un arreglo coaxial con un electrodo interno (emisor), rodeado por un aislante y un electrodo externo (colector). Dicho arreglo se empalma con un cable coaxial de aislación mineral para transmitir la corriente hacia la instrumentación. El material del emisor es elegido por su sección eficaz relativamente alta para la captura de neutrones, que conduce al posterior decaimiento beta o emisión gamma. Estos eventos se describen en la figura 7, donde se identifican los eventos 1 y 2 de captura de neutrones seguidos por decaimiento β (señal retardada). El evento 3 muestra la interacción de un rayo gamma emitido al momento de una captura de neutrones, dando lugar a un electrón secundario rápido (señal instantánea). Los eventos 4 y 5 muestran la generación de electrones rápidos que surgen de las interacciones de los rayos gamma externos [17].

De esta forma, por alguno de estos mecanismos de interacción con los neutrones o los gamma del reactor, el material emisor emite un β^- o un e^- energético (del orden de Mev), la carga atraviesa la capa aislante y llega a la vaina exterior (colector), de forma que permite medir una corriente que es proporcional a la radiación incidente.

Para los SPND cuyo material emisor es el vanadio o el rodio, el evento 1 es el mecanismo principal. En aquellos con respuesta rápida, el evento 3 y 4 es el modo principal de interacción, siendo el caso del cobalto y el platino respectivamente.

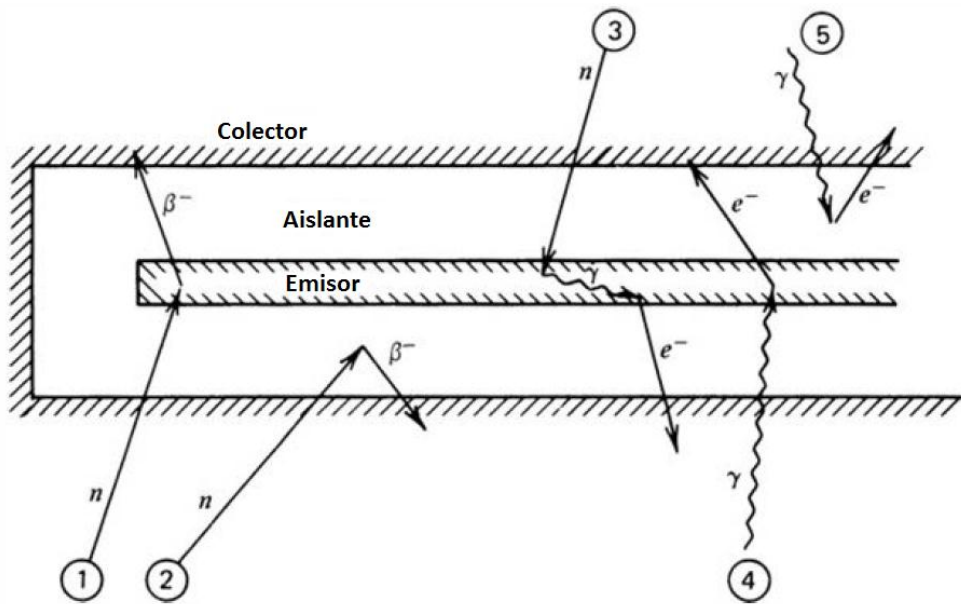


Figura 7: Diferentes eventos que producen detecciones en un SPND

Debido a que este tipo de detectores no generan multiplicación de cargas, se utiliza para altos flujos neutrónicos térmicos. Típicamente cubren un rango desde 10^9 nv (o neutrones. $\text{cm}^{-2}.\text{seg}^{-1}$), donde se generan corrientes del orden de 10^{-12} A, y hasta plena potencia (10^{14} nv).

1.4 Antecedentes y consideraciones previas

1.4.1 Selección del vanadio como material emisor

Cuando se quiere obtener una buena medición del flujo neutrónico y no es importante el retardo de la señal, los emisores más adecuados son el de rodio y el de vanadio. El vanadio produce una desintegración beta bastante simple con una vida media de 225 segundos, mientras que el rodio da lugar a una desintegración beta más compleja con una mezcla de vidas medias de 44 y 265 segundos, con un alto predominio de la primera.

A pesar de que el vanadio tiene una sensibilidad más baja y una respuesta algo más lenta que el rodio, los emisores de vanadio se han vuelto más comunes en aplicaciones de reactores porque la tasa de quemado es significativamente menor, permitiendo su uso durante períodos de años en los flujos típicos del núcleo. Por otro lado, a nivel local, la CNEA desarrolló la construcción de SPNDs con emisor de vanadio porque es el que utilizaba Atucha-I en su diseño original. El proceso constructivo tradicional de SPND incluye una soldadura entre el vanadio y el conductor del cable. Esta soldadura ha demostrado ser un punto de falla para este tipo de detectores. A diferencia de esto, la CNEA desarrolló el empalme sin soldadura y el contacto eléctrico vanadio-conductor se logra por colaminación. Se obtiene de esta forma un producto con mayor confiabilidad y vida útil. La factibilidad de este proceso está relacionada con la buena ductilidad del vanadio. En el caso de haber optado por el uso del rodio como material emisor, hay que tener en cuenta que es mucho menos dúctil que el vanadio, con lo cual se ha analizado que sería imposible fabricarlo por colaminación y hubiera obligado a recurrir a la soldadura.

El vanadio (^{51}V) tiene una sección eficaz de 5 barn ($5 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$) y una característica $1/v$ sin resonancias en el rango de energía de neutrones térmicos y epitérmicos. Al reaccionar con los neutrones produce ^{52}V que se encuentra en estado excitado, basado en una reacción de $^{51}\text{V} (n, \gamma) ^{52}\text{V}$. Los átomos de ^{52}V luego decaen con una vida media de aproximadamente 3,76 minutos a un nucleído estable de cromo (^{52}Cr) con la emisión de una partícula beta (de aproximadamente 2.6 Mev). Debido a este tiempo de retardo, en algunos casos la señal SPND necesita ser corregida. Los detectores de vanadio tienen una tasa de quemado aproximada de 0.012%/mes en un flujo de neutrones térmicos de $10^{13} \text{ n.cm}^{-2}.\text{seg}^{-1}$ [18][19].

1.4.2 Largo de la zona activa

El largo de la zona activa es una relación de compromiso con la señal entregada. Cuanto más corta es la zona activa menor es la señal, lo cual es una desventaja, pero se mejora la indicación local. Si la zona activa fuera muy larga promediaría toda una zona en donde podrían existir gradientes. Por otra parte, también se debe mantener cierta relación con la longitud de los silicios y ser práctico a la hora del montaje mecánico e instalación. En base a estos criterios se definió una longitud activa de 100 mm.

1.4.3 Largo total del cable de los detectores

Para el cálculo del largo total del cable de los detectores se consideró que las distancias variaban entre un mínimo de 15,22 m y un máximo de 16,86 m, debiendo considerar la necesidad del “rulo” al ingreso del tanque del reflector (TQREF). Se unificó que todos los detectores tengan 18,5 m, con el objetivo de que los detectores puedan ser intercambiables entre las diferentes facilidades en caso de ser necesario, ya que 5 serán instalados en las facilidades de irradiación y los 3 restantes serán para repuesto.

1.4.4 Cierre de los extremos y diseño del extremo conector

Dado que el óxido de magnesio es altamente higroscópico es necesario que la vaina exterior del detector/cable y ambos extremos estén totalmente sellados con respecto a las condiciones ambientales, para evitar el ingreso de humedad con la consecuente disminución de la aislación. Para el caso particular del extremo del conector, la solución implementada en los detectores provistos al reactor OPAL se realizó con un sellado con epoxi. Sin embargo esta solución a largo plazo resultó permeable a la humedad. Frente a esta situación, para los detectores que se están desarrollando para el RA-10, se decidió poner un pasante cerámico-metal como solución de sellado de mayor durabilidad. El diseño desarrollado es una solución similar al implementado en los extremos de los detectores autoenergizados para Atucha-II. En este caso se usó brazing de plata de una pieza contra el cable y luego por primera vez se utilizó soldadura láser en el resto de las piezas. Para este trabajo se utilizarán las mismas soldaduras, pero con otro tipo de pasante y conector, lo cual implicó desarrollar un nuevo diseño [20]. Dicho diseño buscó minimizar el tamaño y el peso del conector para disminuir el riesgo de ruptura o fisura en la soldadura de plata sobre el cable, ya que esa unión es una zona delicada durante la manipulación cuando se la expone a esfuerzo mecánico.

En las figuras 8 y 9 se esquematiza el diseño para lograr el cierre estanco y el montaje del conector en el extremo del cable y en la tabla 3 se identifican las diferentes piezas que conforman dicho diseño.

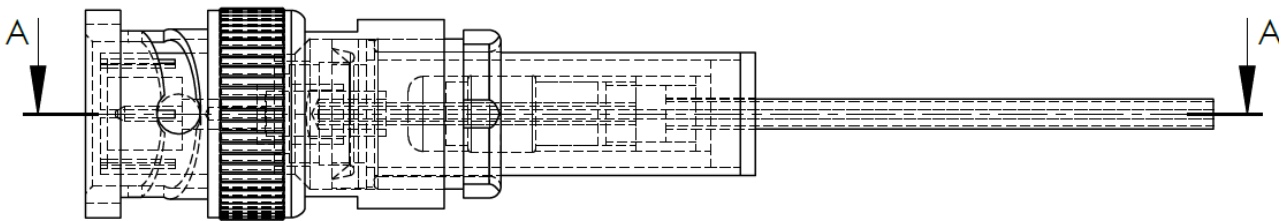


Figura 8: Vista exterior del conector con su corte longitudinal

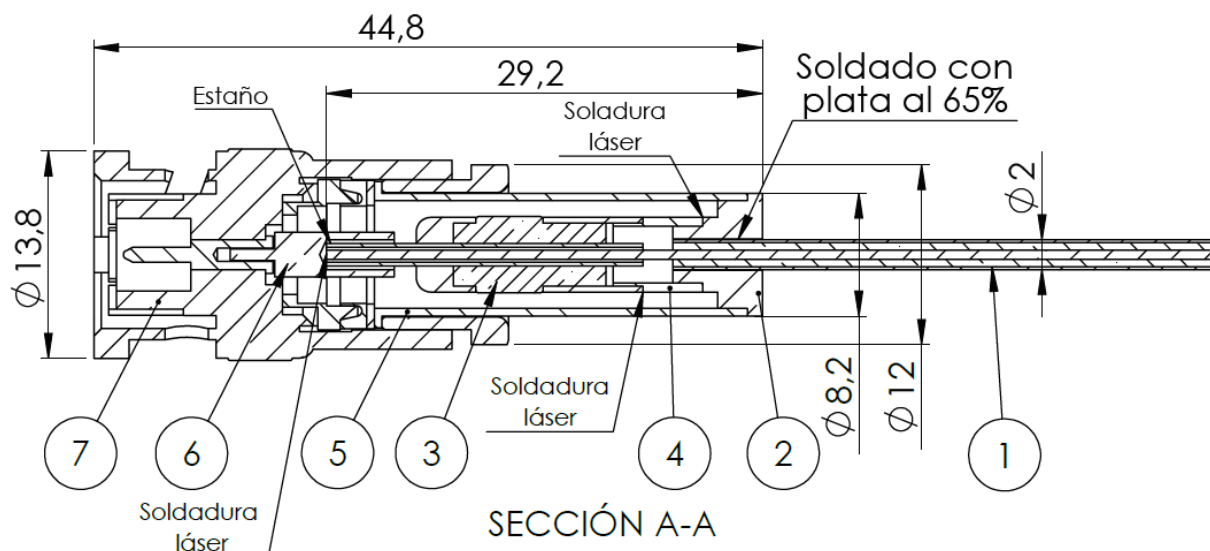


Figura 9: Diseño con medidas (mm) y número de orden para el armado del conector

N° de Orden	Denominación	Provisión	Observaciones
1	Cable del SPND	CNEA	Series C-E-G
2	Copa unión cable-pasante	CNEA	
3	Pasante cerámico metal	FRIATEC	Art N° 551-1063
4	Buje de separación	CNEA	
5	Buje de cierre	CNEA	
6	Pin de acople pasante-BNC	CNEA	
7	Conector BNC	Amphenol	ITEM N° 031-212

Tabla 3: Descripción de las piezas del conector

A continuación se describen los materiales, la geometría y la función de cada una de las partes que constituyen el diseño.

1. Cable del SPND:

Es un cable coaxial compuesto de un conductor interno y una vaina exterior (ambos de Inconel 600), separados por un aislante mineral (óxido de magnesio), como se observa en la figura 10. El Inconel 600 es una aleación de níquel-cromo-hierro usada para aplicaciones que requieren gran resistencia a la corrosión y a altas temperaturas. Como se explicó al principio de esta sección, el cable y el detector conforman una única pieza continua sin soldaduras.

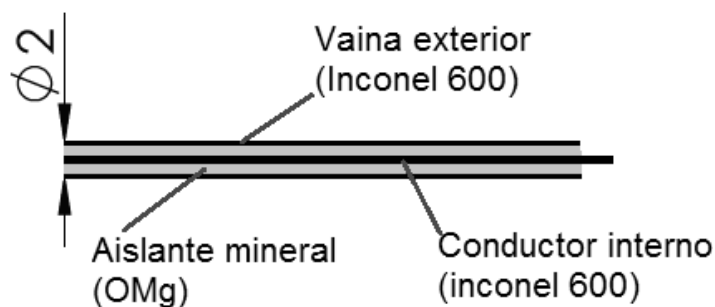


Figura 10: Cable coaxial mineral

2. Copa unión cable-pasante:

Pieza de acero inoxidable AISI 304L con diferentes diámetros. Permite el sellado y el contacto eléctrico contra la vaina exterior del cable (mediante una soldadura de plata). Además provee el soporte mecánico a las piezas necesarias para el sello del extremo y el montaje del conector. El detalle de la pieza se puede ver en la figura 11.

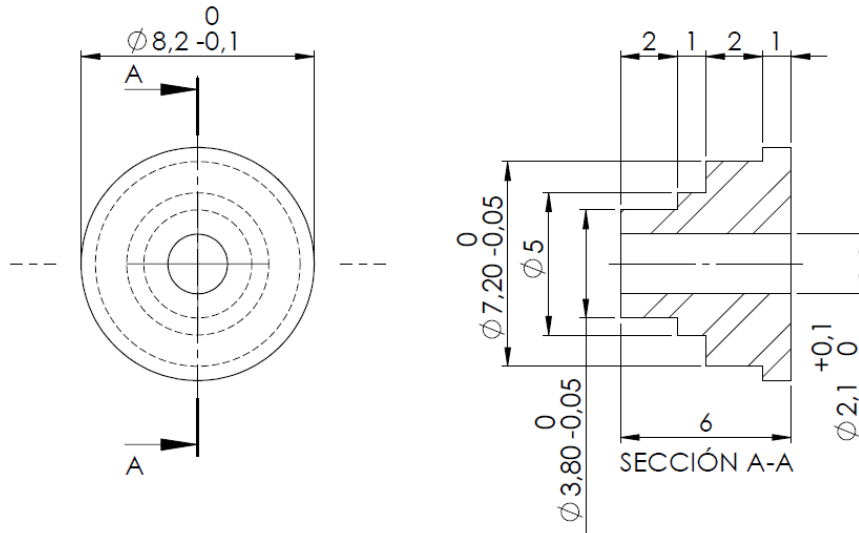


Figura 11: Dimensiones de la copa

3. Pasante cerámico metal:

El pasante es construido a partir de una pieza comercial adquirida a FRIATEC, conformada por un aislante cerámico de óxido de aluminio (Al_2O_3 – FRIALIT F99.7) el cual posee excelente resistencia a la corrosión y propiedades aislantes. Las partes metálicas son de una aleación de Ni-Fe (Ni42 o Alloy 42). Permite pasar la señal del conductor central de forma eléctricamente aislada de la vaina y al mismo tiempo, sellar el extremo por las características estancas de la pieza junto con la implementación de soldaduras láser. Sus dimensiones son indicadas en la figura 12.

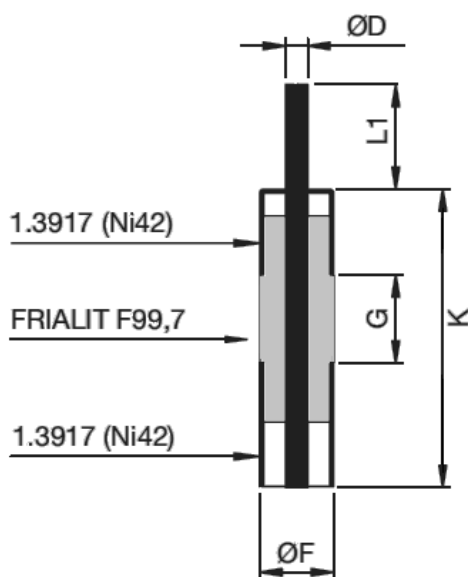


Figura 12: Dimensiones (mm)

$\phi D = 1,5 \times 0,25$
 $\phi F = 5$
 $G = 4$
 $K = 15,2$
 $L1 = 6$

4. Buje de separación:

Pieza cilíndrica de acero inoxidable AISI 304L que ajusta y une la copa con el pasante mediante soldadura láser, evitando la posibilidad de corto circuito entre el conductor central y la malla externa del cable. Se detallan sus dimensiones en la figura 13.

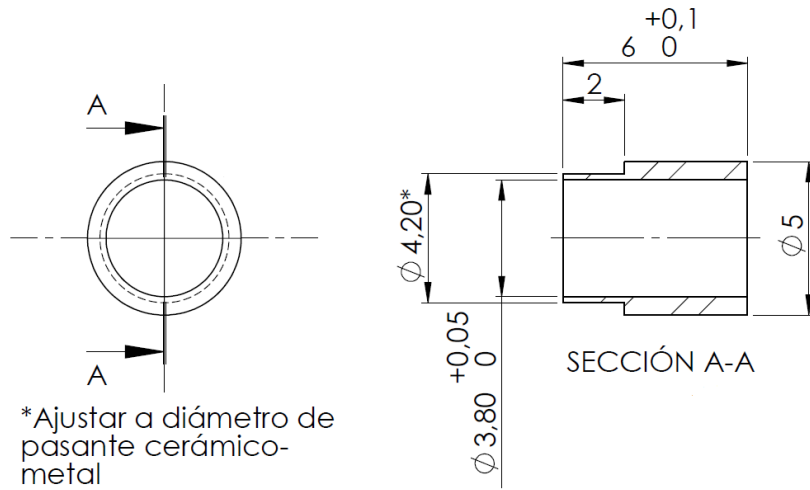


Figura 13: Dimensiones del buje de separación

5. Buje de cierre:

Pieza cilíndrica de acero inoxidable AISI 304L que provee soporte mecánico al conector y contacto eléctrico mediante soldadura láser, ajustando el BNC con el cuerpo del conector que está soldado al cable. En la figura 14 se detallan sus dimensiones.

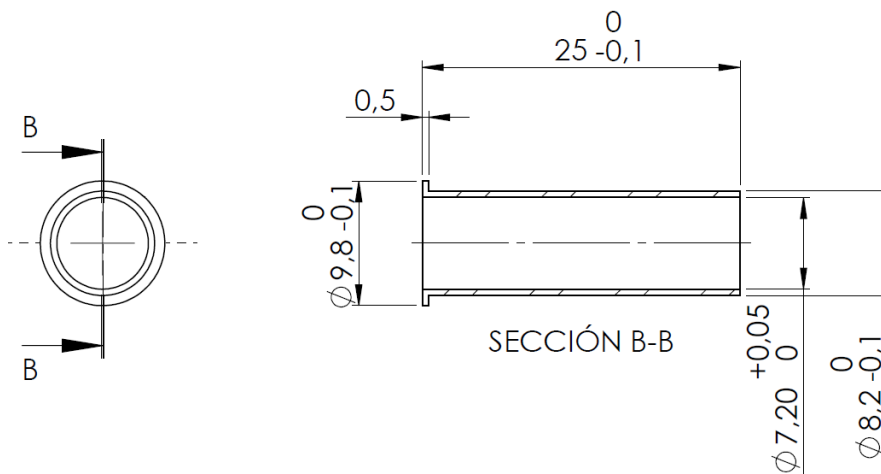


Figura 14: Dimensiones del buje de cierre

6. Pin de acople pasante-BNC:

Pieza de bronce cuyo objetivo es adaptar tanto el diámetro como el largo final del pin interior para que ajuste correctamente el BNC. En la imagen 15 se indican sus dimensiones.

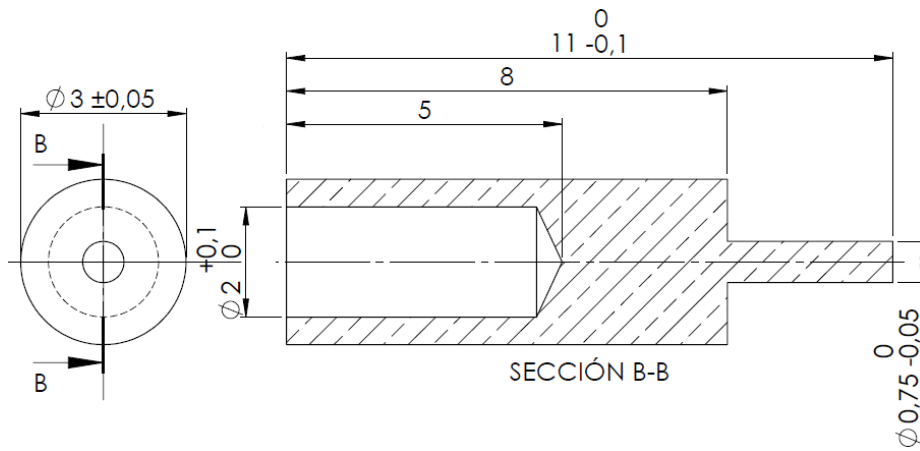


Figura 15: Dimensiones del pin de acople

7. Conector BNC:

El conector BNC (Bayonet Neill-Concelman) es un tipo de conector de rápida conexión/desconexión en forma de bayoneta (Figura 16). En el diseño se utiliza un modelo para cable coaxial, el cual está formado por varias piezas que se visualizan en la figura 17 y que se ajustan al buje de cierre y al pin de acople central.

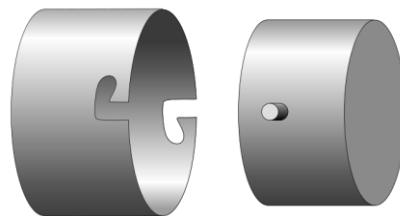


Figura 16: Cierre en bayoneta



Figura 17: Piezas que conforman el conector BNC

El esquema del conjunto armado en 3 dimensiones se puede observar en la figura 18.

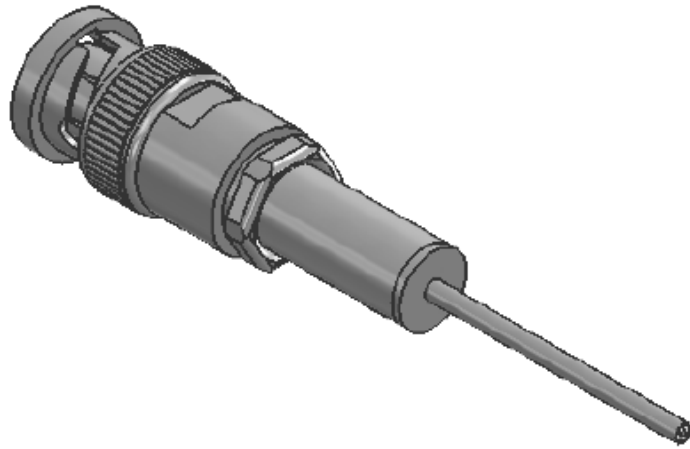


Figura 18: Imagen de la conformación final

1.4.5 Requisitos técnicos de los detectores:

Los requisitos técnicos definidos para la construcción de los detectores se detallan a continuación:

Requisitos dimensionales:

- Diámetro externo de zona sensible: (3.5 ± 0.1) mm
- Longitud zona sensible: (100 ± 0.1) mm
- Longitud total detector: (115 ± 0.1) mm
- Diámetro externo de cable de aislación mineral: (2.0 ± 0.1) mm
- Longitud de cable de aislación mineral: hasta 18,5 m.
- Diámetro porta-conector: hasta 25 mm
- Longitud porta-conector: hasta 35 mm

Requisitos funcionales:

- Sensibilidad neutrónica térmica: cercana a $2,5 \cdot 10^{-22}$ (A/n $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)/cm de vanadio
- Resistencia: mayor que 10^{11} ohms (a temperatura ambiente)

Requisitos de materiales constructivos:

- Material sensible: Vanadio 51 con pureza no menor a 99.5% (contenido en emisor)
- Material de la vaina exterior de la zona sensible (colector): Inconel 600
- Material de la vaina y conductor central del cable: Inconel 600
- Aislante de la zona sensible: MgO en polvo compactado
- Aislante del cable: MgO en polvo compactado
- Sello y pasante eléctrico de extremo: pasante cerámico-metal con aislante de Al_2O_3
- Conector: BNC con aislante de PEEK (preferible) o polietileno

Soldaduras admitidas:

- TIG sin aporte
- Brazing de plata
- Estaño

Requisitos de condiciones ambientales:

- Temperatura máxima de funcionamiento: 70°C (sumergido en agua)
- Humedad máxima de funcionamiento: 100 % (sumergido en agua)
- Flujo neutrónico térmico en operación: hasta 10^{14} n/cm²s
- Tasa gamma en operación: hasta 10^6 Gy/h ($\sim 10^8$ R/h)

Requisito de cantidad:

- La cantidad total de detectores a proveer es de 8, de los cuales 5 serán para cada una de las facilidades y 3 de recambio.

Capítulo 2: Materiales y métodos

2.1 Actividades a realizar

A continuación se procede a listar las actividades realizadas en el presente trabajo:

- Selección de los detectores existentes.
- Proceso de cortado.
- Perforación y limpieza del lado detector.
- Preparación del cierre lado detector.
- Soldado sin aporte del tapón extremo detector.
- Soldadura con aporte de plata entre pieza copa y cable de aislación mineral.
- Soldadura láser entre pasante cerámico y buje de separación.
- Pelado del cable de aislación mineral.
- Soldadura láser con la copa y estanqueidad de las soldaduras.
- Llenado con argón y soldadura láser del conector central.
- Ensayo de soldadura final bajo condiciones de alta humedad.
- Montaje con soldadura de estaño del pin central.
- Montaje final del buje de cierre y conector BNC.
- Soldaduras láser final con buje de cierre.
- Ensayos: Aislación, continuidad y capacitancia.
- Caracterización: Calibración neutrónica.

2.2 Proceso constructivo de los detectores autoenergizados

2.2.1 Selección de los detectores existentes

Para la construcción de los detectores del RA-10 se partió de los detectores existentes, parcialmente construidos para proyectos anteriores. Dichos detectores pertenecen a distintas series de fabricación y como consecuencia poseen diferencias menores en los materiales utilizados, como pueden ser el óxido de magnesio y las condiciones del vanadio al momento de colaminar. Esto podría acarrear ciertas diferencias funcionales que se evaluarán durante la caracterización.

Para seleccionar los detectores entre las posibles alternativas se evaluaron las radiografías de cada uno de ellos para ver la presencia o no de defectos que podrían generar mal funcionamiento. Adicional se buscó un lote que presentara la mayor similitud constructiva posible. Por otro lado, el análisis de las radiografías permitió identificar la zona activa del vanadio y su longitud. En la Figura 19 se puede observar una radiografía de 2 detectores donde se distinguen las diferentes partes que los constituyen.

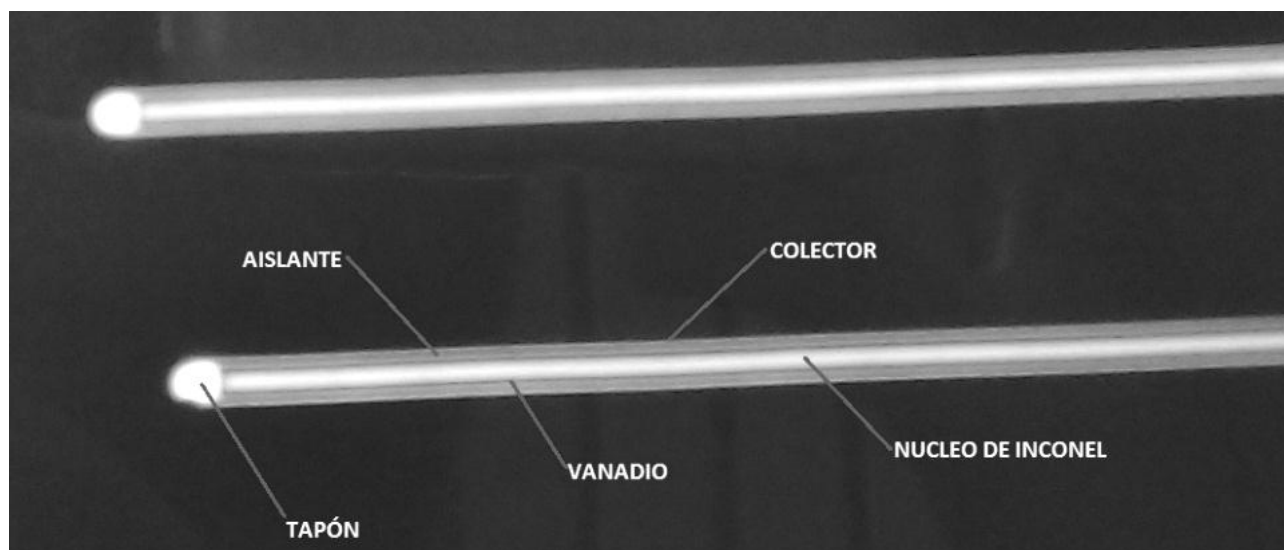


Figura 19: Radiografía de los detectores, para identificar el largo de la zona activa y la presencia de posibles defectos.

Los detectores se diferencian por la letra (serie) y un número (identificación). Los detectores que resultaron seleccionados para este trabajo fueron: C017, E003, G002, G007, G008, G012, G014 y G018.

2.2.2 Proceso de cortado

Materiales y herramientas:

- Detector SPND.
- Arco de sierra para metal.
- Radiografía a escala de cada detector.
- Regla graduada para tomar la medida de la zona activa.
- Boquilla de tope o pieza de cobre para sujeción (conformado por 2 partes en media caña).
- Morsa de banco.
- Otras herramientas de taller.

Descripción:

Debido a que los detectores de partida tenían una longitud de zona activa mayor a la especificada para el RA-10, cada detector se cortó de modo tal que la zona activa final fuera de 100mm. Para esto se utilizó la correspondiente radiografía a escala de cada detector. Debido a dicho corte, fue necesario retrabajar el nuevo extremo para lograr el sello definitivo. En la figura 20 se sintetiza el proceso de cortado, perforación, limpieza y colocación del tapón.

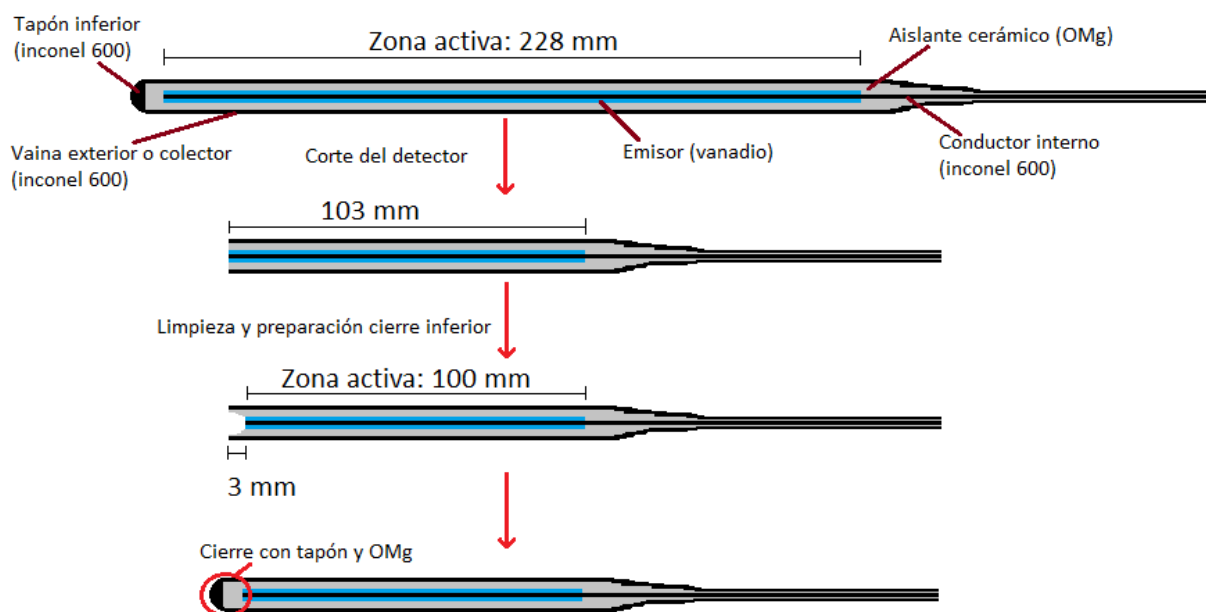


Fig. 20: Ejemplo para el detector E003, donde se mide la zona activa con 228mm y los pasos para adaptarlo.

En la figura 21 se indica cómo se posicionó cada detector para realizar el corte correspondiente. Para ello se utilizó una morsa de banco y la boquilla de tope de cobre.



Figura 21: Proceso de cortado de un detector

En la figura 22 se observa en detalle la boquilla de cobre utilizada como guía para garantizar un corte recto y evitar daños sobre la pared del detector.

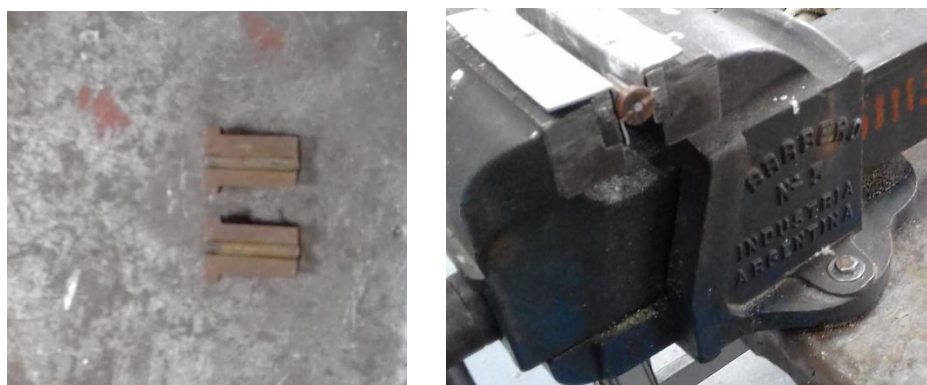


Figura 22: Boquilla de cobre y su uso para el corte

El corte con sierra manual se ejecutó con máxima precaución. Hasta completar el corte, el movimiento se realizó siempre hacia atrás, con el objetivo de evitar un salto involuntario de la sierra que pudiera dañar al detector.

En todo momento se preservó la integridad del detector, para lo cual se evitó flexionar la zona activa, principalmente la zona donde se estrecha para conformar el cable del detector.

2.2.3 Perforación y limpieza del extremo lado detector

Materiales y herramientas:

- Lima media caña.
- Horno a 250°C para secado + guantes.
- Taladro o agujereadora de pie con platos autoajustados de mordaza.
- Boquilla de tope o pieza de cobre para sujeción.
- Mecha de 2.5 mm.
- Pieza de acero inoxidable para proveer superficie plana.
- Cilindro de acero inoxidable para centrar la mecha.
- Pieza testigo o referencia de profundidad.
- Micrómetro o calibre de presión.
- Herramienta punzante para limpiar interior.

Descripción:

Para realizar la perforación se utilizó la agujereadora de pie y platos autoajustados de morsa. Con una mecha de 2,5 mm a 170 rpm para proceder a quitar los últimos 3 mm del detector (figura 20).

Primero se colocó de a un detector por vez en los platos autocentrantes como se indica en la figura 24 con una pieza de cobre (la misma boquilla utilizada durante el corte del detector) y se procedió al limado con una lima fina de media caña para quitar las posibles rebabas producidas durante el corte, junto a cualquier imperfección que existiera.

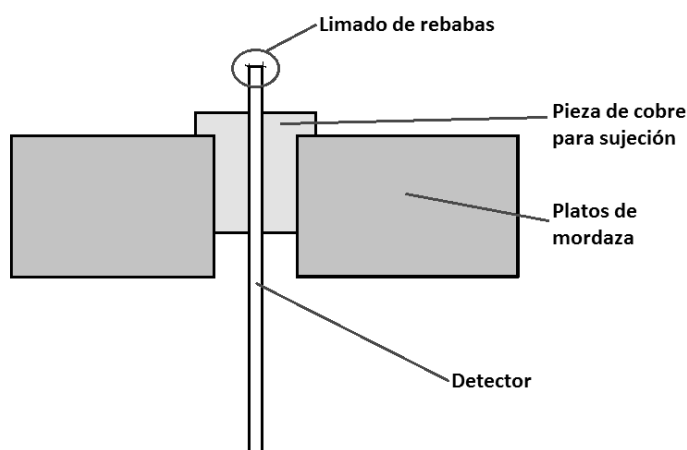


Figura 24: Platos autocentrantes sujetando a la boquilla y el detector

Luego se colocó una pieza de acero inoxidable para facilitar una superficie plana donde proceder a limar y aplanar el extremo del detector. La pieza de acero inoxidable se colocó de forma que sobresaliera apenas 0,5 mm el detector, como se ejemplifica en la figura 25.

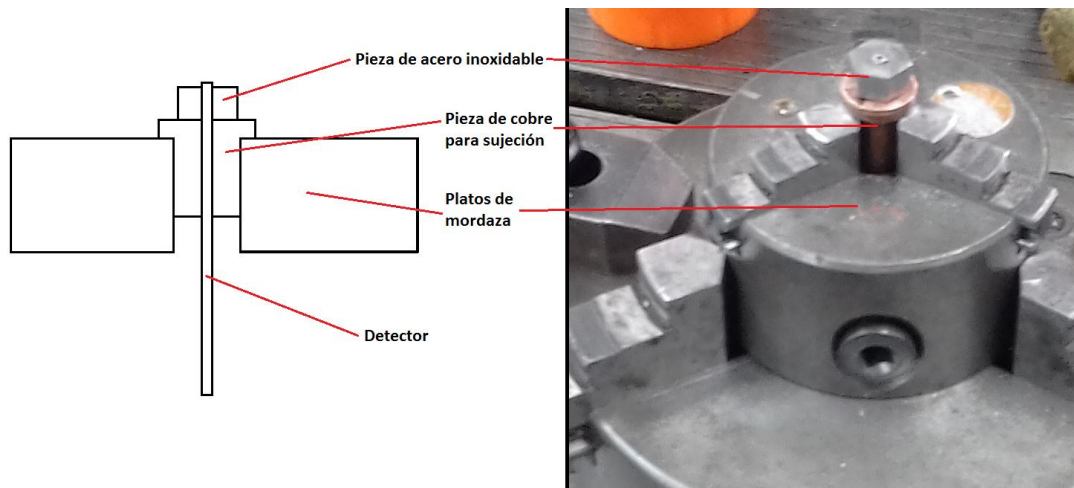


Figura 25: Proceso de limado y aplanado del extremo lado detector

Finalizado el limado, se ajustó la proximidad de la mecha con el volante de la agujereadora para usarla como referencia para la perforación. Para garantizar que la mecha se mantuviera centrada con respecto al detector y evitar su desplazamiento lateral, se utilizó una pieza cilíndrica con dos calibres diferentes en sus extremos. Uno corresponde al del diámetro externo del detector (3mm) y el otro al diámetro externo de la mecha (2.5mm) (figura 26). El proceso se realizó cuidadosamente, perforando de a un milímetro.

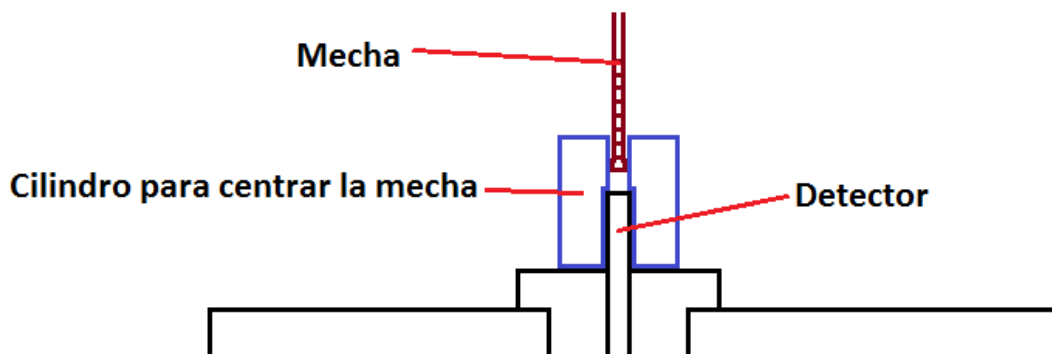


Figura 26: Detalle de la pieza cilíndrica para el proceso de perforación

Como se muestra en la figura 27, es importante sujetar el cilindro de acero inoxidable con una pinza durante el proceso de perforación para evitar deformaciones o tensiones sobre el detector.

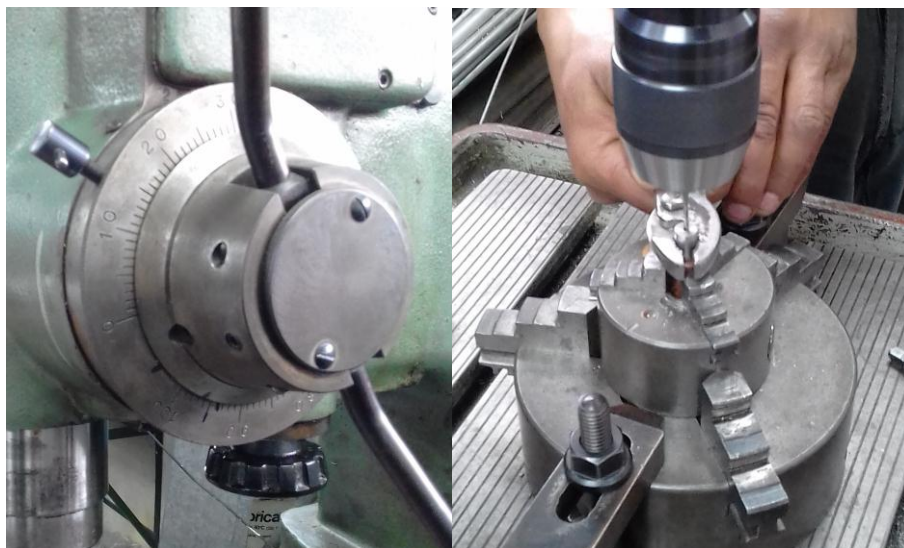


Fig. 27: Detalles del volante de ajuste (derecha) y del proceso de agujereado del detector (izquierda).

Para quitar los restos sueltos de óxido de magnesio y vanadio, se utilizó una herramienta tipo punzón, cuidando de no dañar el colector o el vanadio. Luego de cada limpieza se utilizó una pieza de referencia o “testigo” para medir los milímetros perforados por la mecha.

Para cada detector, una vez terminada la perforación y limpieza, se tomó la medida de su diámetro interno con un micrómetro, para luego proceder a maquinar los tapones con el diámetro correspondientes.

Luego se realizó el pelado del extremo del cable para permitir la medición de aislación. Dicha medición es utilizada para verificar el adecuado sellado del extremo. Para el pelado del cable se utilizó la amoladora de banco (con disco de piedra) con el fin de remover por abrasión la vaina exterior del cable y dejar el conductor central libre. Los restos de la vaina exterior se quitaron con la ayuda de un alicate de corte. En la figura 23 se muestra el cable pelado y la remoción de la vaina externa.



Figura 23: Pelado del cable extremo conector

Finalmente, se colocó en un Horno a 250°C para su secado hasta el momento que se realizó el cerrado del lado detector con el tapón de Inconel 600 mecanizado con la medida correspondiente. La humedad suele ingresar algunos centímetros por los extremos (alrededor de 10-15 cm, dependiendo de las condiciones ambientales), al dejarlos en el horno se garantizó el secado de todo el detector, ya que la posible humedad existente va migrando hacia los extremos y escapando.

2.2.4 Preparación del cierre extremo lado detector

Materiales y herramientas:

- Tapones mecanizados de Inconel 600.
- Acetona al 99% y papel.
- Bandeja de vidrio pírex (vidrio de reloj).
- Pinza de punta.
- Martillo liviano.
- Cuchara cerámica y pilón.
- Anillos cerámicos de óxido de magnesio (MgO) calcinados en horno.
- Pieza de referencia (con diámetro y profundidad de 3mm).
- Boquilla de tope o pieza de cobre para sujeción
- Morsa de banco.
- Horno a 250°C para secado + guantes.
- Otras herramientas de taller.

Descripción:

Previamente deben estar preparados los tapones correspondientes a cada detector, ya que deben ajustar de manera exacta, para ello se tomaron los diámetros con un calibre de precisión y se maquinaron tapones de Inconel 600 partiendo de un diámetro de 3,25mm hasta el diámetro de cada tapón (que varió en nuestro caso entre 2,53 a 2,64mm) con un largo de 3,4 mm, para luego llevarlo mediante un suave perfilado a 3mm. Este perfilado se realizó solo del lado que queda dentro del detector para minimizar tensiones sobre el vanadio.

El óxido de magnesio (MgO u OMg) se adquiere en forma de anillos cerámico, el cual pasa por un proceso de calcinado para eliminar impurezas y humedad, la manipulación posterior debió siempre evitar el contacto con las manos, para no contaminar el aislante mineral.

Las herramientas y recipientes fueron limpiados cuidadosamente con papel mojado en acetona.



Figura 28: Preparación del MgO en polvo

Los anillos cerámicos fueron sometidos a un proceso de pisado o molienda, como se observaba en la figura 28, hasta obtener un fino polvo.



Figura 29

Se colocó el detector sujetado por la pieza en la mordaza (figura 29) y se introdujo el polvo de MgO compactándolo manualmente con la pieza de referencia, la cual nos indicó los 3 mm que deben reservarse para la colocación del tapón.

Luego se colocó el tapón correspondiente al detector y se le aplicó presión con el martillo, de modo que ingrese levemente ajustado y no se salga. La altura del tapón debe quedar a nivel del borde del extremo inferior del detector como se indica en la figura 30.

Luego se volvió a colocar el detector en el horno para continuar con la eliminación de la humedad.

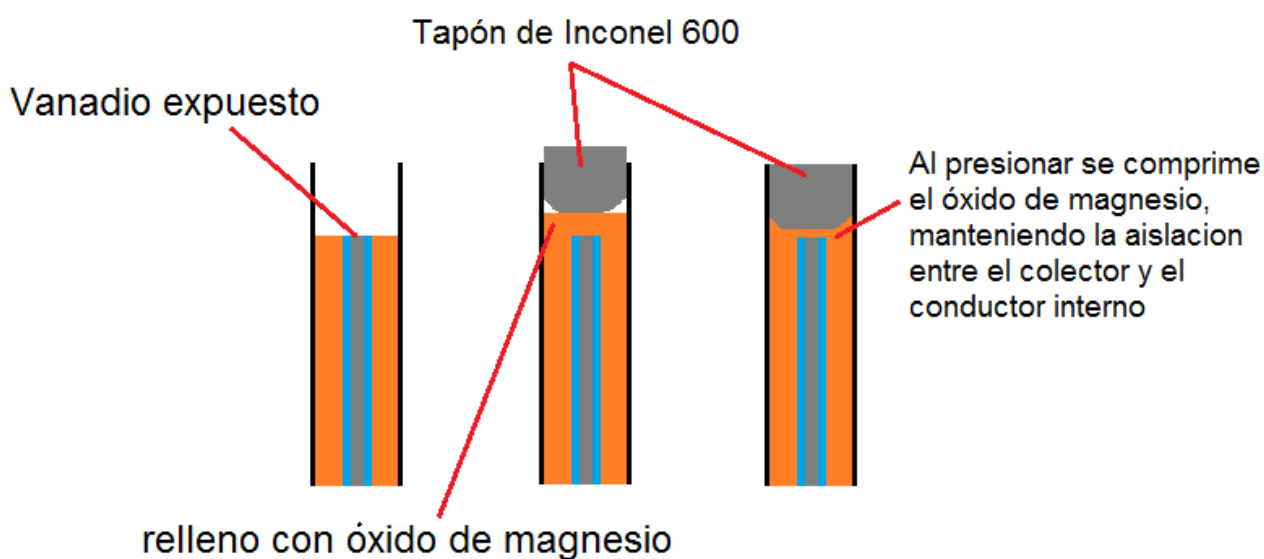


Figura 30: Colocación del tapón de Inconel

Obsérvese en la figura 30 que el lado perfilado del tapón debe colocarse hacia el interior del detector, como se indicó anteriormente, con el objeto de facilitar su inserción y reducir los esfuerzos mecánicos al momento de colocar el tapón, evitando dañar el conductor interno del detector o provocar que este toque el colector, inutilizando el detector al ponerlo en “corto”.

2.2.5 Soldado sin aporte del tapón inferior

Materiales y herramientas:

- Acetona al 99% y papel.
- Pinza de punta.
- Resina vegetal en barra.
- Sonda para medir separación.
- Pistola de aire caliente (300 °C) Black&Decker Linea HG 2000W.
- Soldadora TIG (FRONIUS MagicWare 1700) + gas de cobertura.
- Electrómetro Keithley Instruments 610C y cables de conexión.
- Recipiente con agua desmineralizada
- Morsa de banco.
- Otras herramientas varias de taller.

Descripción:

Se retiraron del horno los detectores de uno a la vez, y se mantuvo caliente el extremo del cable pelado con la pistola de aire caliente a una distancia de 5 cm, con el objetivo de impedir el ingreso de humedad por ese extremo, calentando desde unos 10-15cm del extremo con movimientos hacia el borde durante algunos minutos, para luego, mientras se continua aplicando calor, se procedió a colocar resina vegetal para sellar el extremo y permitir hacer mediciones de resistividad.

Luego se continuó calentando con la pistola el extremo del detector para quitar todo rastro de humedad de igual forma que se hizo con el extremo pelado, mientras se mantiene caliente, se colocó para proceder al soldado del tapón, tal cual como se esquematiza en la figura 31, alineado al electrodo y separado 0,8 mm de su punta. La medición de la luz se hizo con una sonda para garantizar la separación exacta.

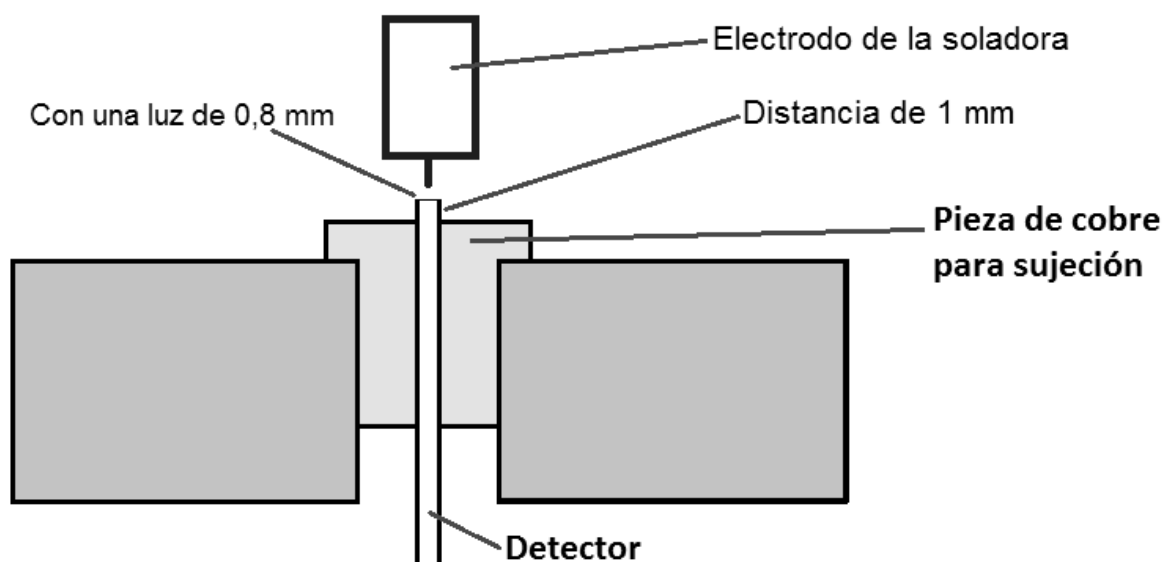


Figura 31: Preparación de la soldadura TIG

En la figura 32 se puede observar cómo se calentó el detector con la pistola justo sobre la pieza de sujeción de cobre, la cual favorece que el calor se distribuya equitativamente. De igual forma, durante la soldadura, esta pieza disipa el calor generado sobre del detector, facilitando que primero se funda el tapón y no se afecte la integridad del vanadio.

El arco voltaico para soldar se aplica durante unos segundos, para luego constatar que se haya fusionado el tapón con el colector del detector, como así también el estado general de la soldadura, en caso de ser necesario es posible volver a aplicar otro arco voltaico para fundir el Inconel 600 del tapón con el colector, quedando el extremo con forma de “gota”, sin observarse orificios o fisuras.

La soldadura TIG fue realizada por personal calificado del taller, ya que requiere de mucha experiencia y capacitación. Por esta razón la participación en esta tarea se limitó a observar y documentar el procedimiento.



Figura 32: Calentamiento previo e instante de la soldadura del tapón

Adicionalmente es necesario verificar que durante la soldadura puede expulsarse o “subirse” levemente el tapón por acción de gases internos o impurezas dentro del detector, en esos casos hay que constatar que eso no suceda, limpiando cuidadosamente las piezas con acetona y no contaminándolas usando los recaudos ya descriptos en los pasos anteriores.

Al finalizar de soldar, se usó un cepillo de alambre fino para remover los restos de impurezas (como el óxido de magnesio) que pudieran ser expulsadas durante la soldadura.

Posteriormente se verificó la estanqueidad de la soldadura, introduciendo el lado del tapón soldado en agua durante 20 min, y se verificó con un electrómetro que la resistencia interna del detector sea superior a $10^{11}\Omega$ (ohm).

2.2.6 Soldadura con aporte de plata entre pieza copa y cable de aislación mineral

Materiales y herramientas:

- Barra de plata con aleación SOLWIR 606 (punto de fusión de 606°C).
- Lija P240.
- Acetona pura 99%.
- Fundente 606.
- Guantes de látex.
- Pieza copa mecanizada de acero inoxidable AISI 304L.
- Separador cerámico.
- Soporte de metal para sujetar el conjunto de pieza y cerámico.
- Limpiador de ultrasonido Branson B-220.
- Otras herramientas varias de taller.

Descripción:

Se limpió el cable con una lija fina y acetona para eliminar restos de grasas, aceites, óxidos y rebabas en la superficie a soldar. La copa de unión también se limpió con acetona en un recipiente y se coloca en un limpiador de ultrasonido para facilitar la liberación de cualquier impureza.

Se tomó la medida y se calculó que el detector contabilice un total de 18,5 metros hasta el extremo del conector. Se enhebró el cable del SPND a través de la copa junto con el separador cerámico, y con ayuda del soporte se colocó en la posición para ser soldado. En la figura 33 se ejemplifica cómo quedó armado el conjunto para proceder a soldar y la colocación del fundente.

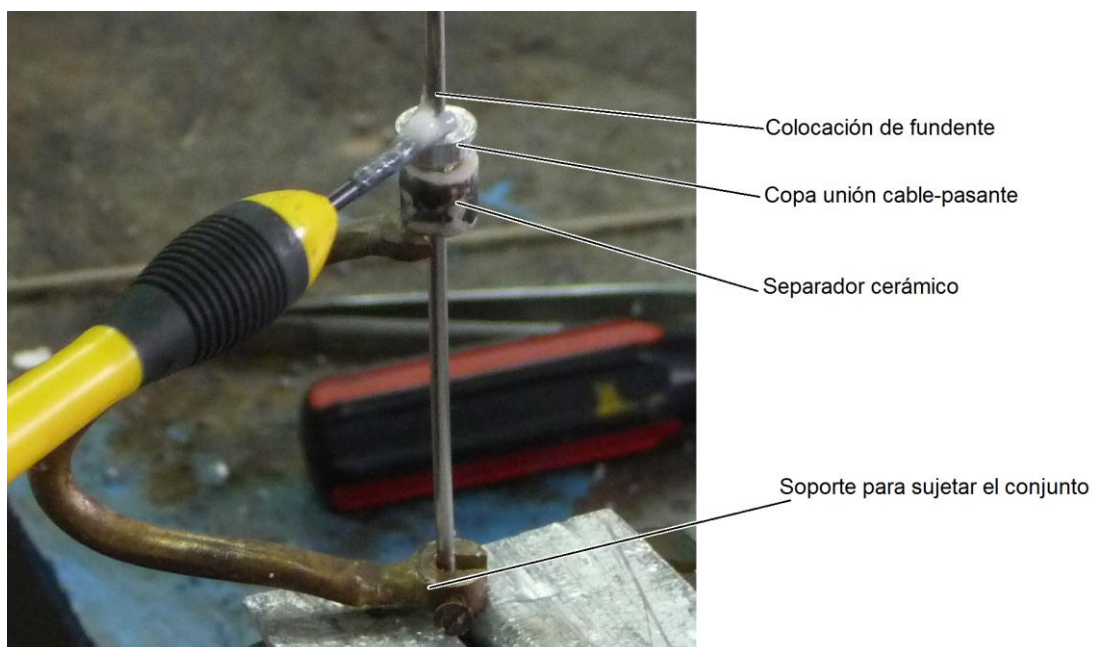


Figura 33: Colocación del fundente (o decapante) en la zona a soldar del cable y la pieza, el cual proteger de la oxidación durante la soldadura.

El separador cerámico se colocó para mejorar la distribución del calor, sujetar la pieza y brindar mayor masa al conjunto, permitiendo calentar de modo más homogéneo la zona, mientras que el soporte brinda estabilidad al conjunto y evita que la pieza se mueva durante el proceso de soldado.

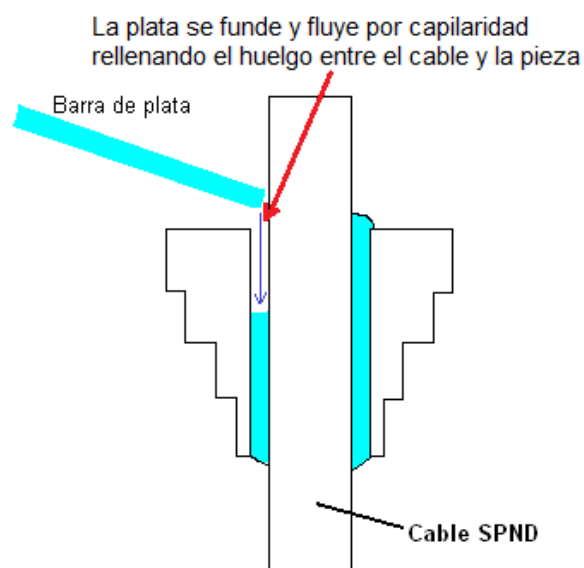
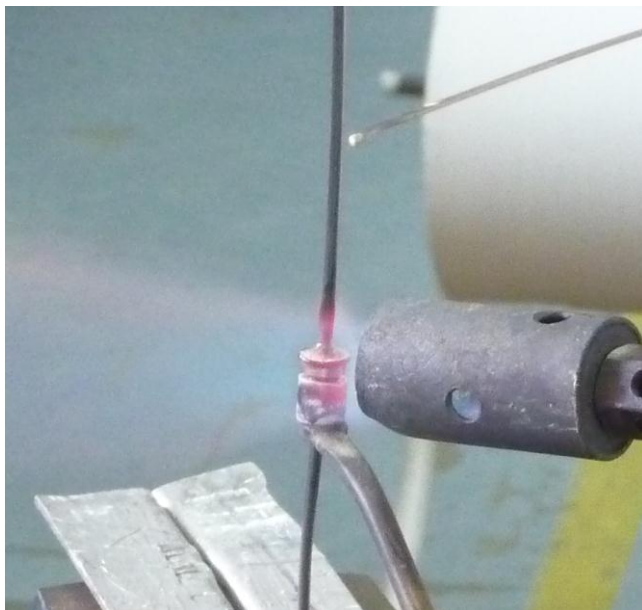


Figura 34: Brazing de plata fluye por efecto de la acción capilar.

Se procedió a calentar con el soplete por encima y debajo de la pieza de manera continua, hasta que la copa toma color rojo cereza, cuidando de no exceder el calor aplicado sobre el cable. La temperatura alcanzada debe ser la de fundición de la plata (aproximadamente 600°C), se acercó la barra de plata hasta el contacto justo en la zona de intercepción entre el cable y la parte superior de la copa (figura 34), en ese momento se pasó el calor a la parte inferior, por debajo de la pieza durante unos 5 segundos, para permitir bajar la plata, sellando por capilaridad y soldando la copa al cable [21].

Mientras se aportaba la plata, se observó claramente la “penetración” del material entre las piezas (por acción capilar), apoyando la barra de plata unos segundo hasta que comenzó una leve acumulación en la parte superior.

Al finalizar el brazing de cada detector, se volvieron a colocar en el horno para mantenerlos libre de humedad.

2.2.7 Soldadura láser entre pasante cerámico y buje de separación

Materiales y herramientas:

- Limas finas de mano y lijas.
- Acetona pura 99%.
- Pasante cerámico metal cortado con las medidas de diseño.
- Buje separación de acero inoxidable AISI 304L.
- Soldadora láser Sisma Serie LM-D (alta precisión).
- Equipo de vacío Pfeiffer vacuum QualyTest Serie HLT.
- Tubo de gas helio con dosificador para la prueba de estanqueidad.
- Limpiador de ultrasonido Branson B-220.
- Adhesivo tipo Poxipol.
- Otras herramientas varias de taller.

Descripción:

Como se indicó, el pasante cerámico metal es adquirido en el mercado a la firma FRIATEC y debió adaptarse para este diseño que busca minimizar el largo, por esa razón se cortó el cuerpo para que tenga un largo de 15,2 mm, y el lado pasante central posea un largo de 6 mm.

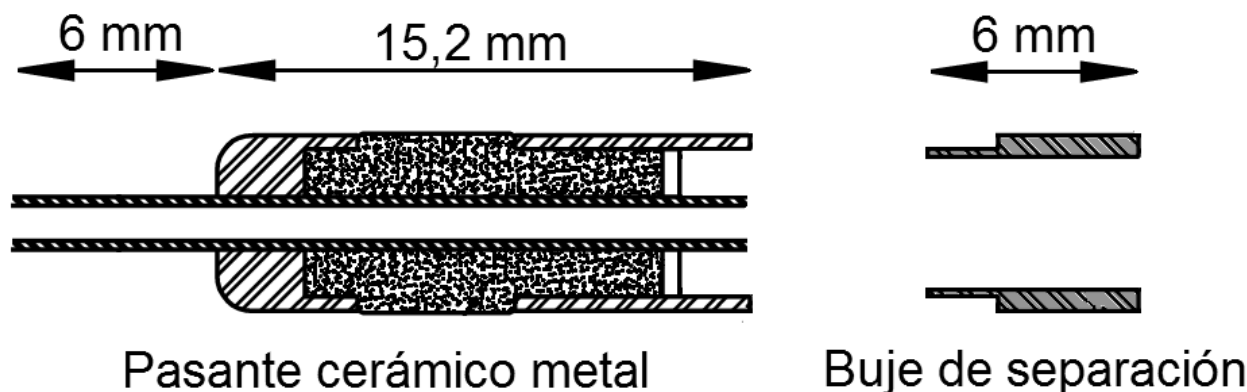


Figura 35: Dimensiones del pasante y el buje a soldar con láser

Las piezas involucradas (figura 35) deben encastrar con un ajuste perfecto, debido al proceso de corte requerido y el maquinado del buje de separación, fue necesario limar y lijar cuidadosamente las superficies de contacto y encastre (unión mixta), para que en el ajuste entre ellas no quedara ninguna distancia o luz que dificulte la soldadura láser.

Como se ha indicado al describir el diseño del conector, el objetivo más importante del buje de separación justamente es separar la parte central del pasante (donde se cortó) de la vaina del cable del detector. Evitando de esta manera que se produzca un corto circuito.

Ambas piezas fueron sometidas a una limpieza con acetona en el limpiador ultrasónico, evitando tocar las zonas a soldar para no contaminarla.



Figura 35: Detalle de defectos habituales en las piezas a soldar

Luego de cortar las piezas, es normal encontrar imperfecciones, como las que se indican en la figura 35, que debieron ser corregidas con limas o lijas finas. Una vez limadas las superficies, y verificado el encastre perfecto, se continuó con el proceso de soldadura láser, en este caso se configuró el equipo con un 25% de potencia, 2,5mseg duración del punto, 3 puntos por segundos y un diámetro de 0,8 mm. El equipo posee un pedal como disparador para poder utilizar ambas manos en la manipulación de las piezas, y un microscopio para observar el proceso con claridad. En la figura 36 se observa el exterior del equipo láser.

Se inició realizando 4 puntos a 90° para afirmar ambas piezas, para ello, se sujetó de manera de presionar ambas piezas para que se ajusten y tengan una unión perfecta. Una vez que se verificó la correcta unión de las piezas con los 4 puntos, se hizo rotar para soldar puntos superpuestos (figura 37), cubriendo todo el perímetro de la pieza con dos vueltas sobre la línea de unión de las mismas.



Figura 36: Equipo para soldar con láser

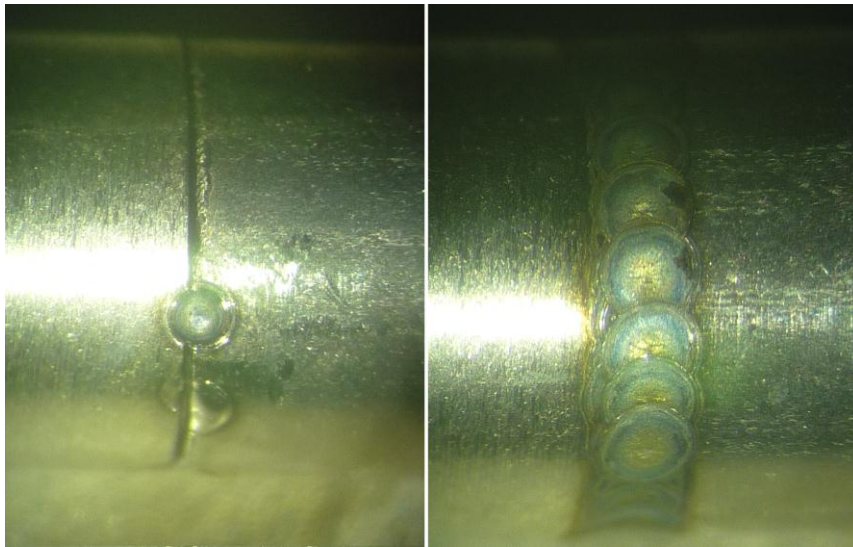


Figura 37: Detalle de una de las piezas con soldadura láser, se observa la realización de un punto “bueno” y otro “fallado” abajo (Izquierda) y la soldadura completa entre ambas piezas (Derecha).



Figura 38: Resultado final con ambas piezas soldadas

Para verificar la estanqueidad de la soldadura se realizó una prueba individual con gas trazador (helio en nuestro caso, ya que debido a su pequeño tamaño molecular posee gran capacidad de penetrar por poros y fisuras) utilizando la máquina de vacío con una boquilla del diámetro adecuado para que se adapte y una junta de goma (o´ring) para sellar los bordes, también se colocó adhesivo plástico (Poxipol) en la punta de la pieza para evitar el ingreso de gases.

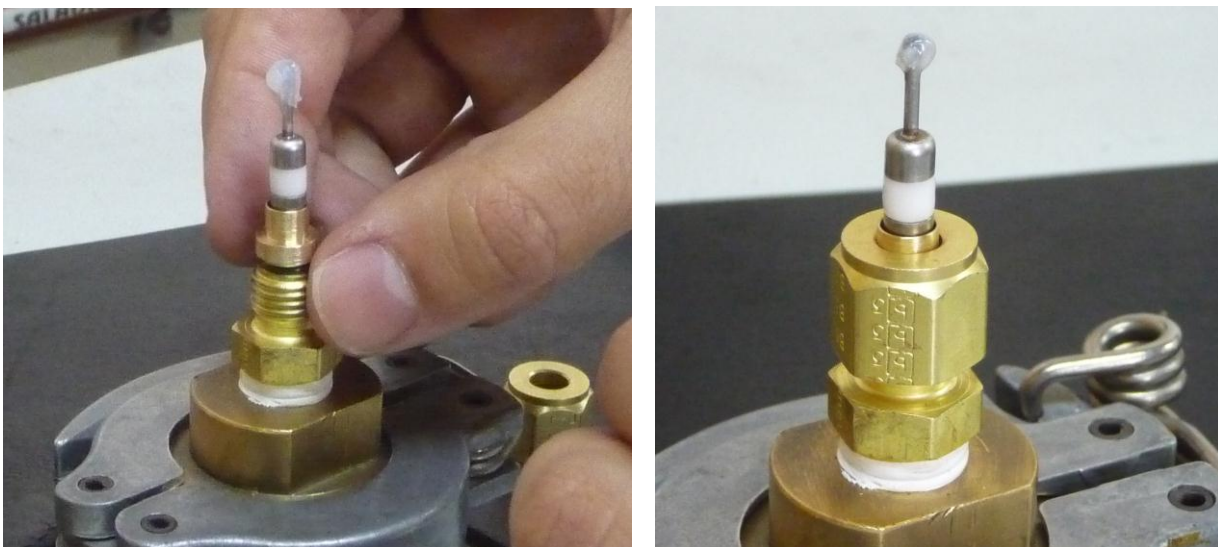


Figura 39: Preparación de la pieza para la prueba de estanqueidad de la soldadura láser

Se dejó endurecer el adhesivo, para luego colocar la pieza en la boquilla de la máquina de vacío como se muestra en la figura 39.

El equipo de vacío posee un espectrómetro de masa, por lo cual, permite identificar el ingreso de helio, exigiendo para la aprobación de la soldadura que se mantenga un nivel inferior a 3.10^{-9} sccs (Standard Cubic Centimeters per Second, que indica la concentración de un fluido en condiciones estándares de temperatura y presión). Durante la prueba se colocó gas de helio a baja presión alrededor de la pieza mientras se realiza vacío, con el objetivo de que si existe alguna falla en la soldadura el helio ingrese al interior de la pieza y sea detectado por el espectrómetro del equipo de vacío.

En los caso que se detectó la presencia de gas helio por parte del espectrómetro se debió revisar minuciosamente la soldadura realizada con ayuda del microscopio del equipo de soldar, para buscar la posible causa del problema y se procedió a soldar nuevamente para corregirla. Luego se volvió a repetir la prueba de estanqueidad al helio, y se constató que se cumpliera el nivel indicado anteriormente.

2.2.8 Pelado del cable de aislación mineral

Materiales y herramientas:

- Agua desmineralizada caliente en recipiente tipo batea.
- lima fina perfil triangular, pinza y alicate.
- Otras herramientas varias de taller.

Descripción:

Previamente se debió realizar la limpieza de la zona de la copa soldada con plata para quitar los restos de fundente colocándolo en agua desmineralizada caliente en una batea y sumergiendo la zona a limpiar, este proceso se repitió varias veces hasta quitar todo rastro de las sales del fundente, luego se cepilló con la máquina de banco para sacar el óxido restante, evitando tocar la zona de la copa para no contaminarla.

Se realizó el limado y apertura de la vaina con mucho cuidado de no dañar el conductor central del cable. Se calcularon 28 mm desde el borde de la copa, como se observa en la figura 40.



Figura 40: Limado de la vaina

Luego se procedió a cortar a dicha distancia, y comenzar con el doblado cuidadoso de la vaina con ayuda de una pinza y alicate hasta “desnudar” el conductor central (figura 41). Al llegar con la vaina al borde de la copa se debió aplicar un leve movimiento de zigzag hasta que la vaina cedió y se quebró limpiamente, verificando que no queden restos que lo pongan “en corto” con el conductor central.



Figura 41: Doblado de la vaina y su remoción

Específicamente esta maniobra la realizó personal calificado del taller, por tratarse de una tarea delicada que requiere de mucha experiencia, por lo tanto solo se limitó a la documentación de esta etapa.

2.2.9 Soldadura láser con la copa y estanqueidad de las soldaduras

Materiales y herramientas:

- Limas finas de mano y lijas.
- Acetona pura 99%.
- Pieza buje separación + Pasante cerámico.
- Cable SPND + copa soldada.
- Electrómetro Keithley Instruments 610C y cables de conexión.
- Soldadora láser Sisma Serie LM-D (alta precisión).
- Equipo de vacío Pfeiffer vacuum QualityTest Serie HLT.
- Tubo de gas helio con dosificador para la prueba de estanqueidad.
- Limpiador de ultrasonido Branson B-220.
- Otras herramientas varias de taller.

Descripción:

Se limpió cuidadosamente el conector central expuesto en el paso anterior usando papel mojado en acetona, para retirar cualquier posible contaminación, para luego medir con el electrómetro la resistencia entre la vaina y el conductor sea mayor a $5 \cdot 10^{11}$ Ohm.

Luego se procedió a enhebrar la pieza conformada por el buje de separación y en pasante cerámico-metal hasta su posición de ajuste con la copa para proceder a realizar la soldadura laser de la misma forma y configuración que se hizo en la sección 2.2.7, la particularidad en este paso es que para rotar el conjunto se necesitó asistencia para girar el rollo de cable completo junto con el detector, acompañando el ritmo de la soldadura.

Luego de soldar, se probó nuevamente la aislación eléctrica usando el electrómetro para medir la resistencia, permaneciendo el extremo central del pasante cerámico todavía sin cerrar para permitir realizar pruebas de estanqueidad al helio y verificar las soldaduras como se realiza en la figura 42.

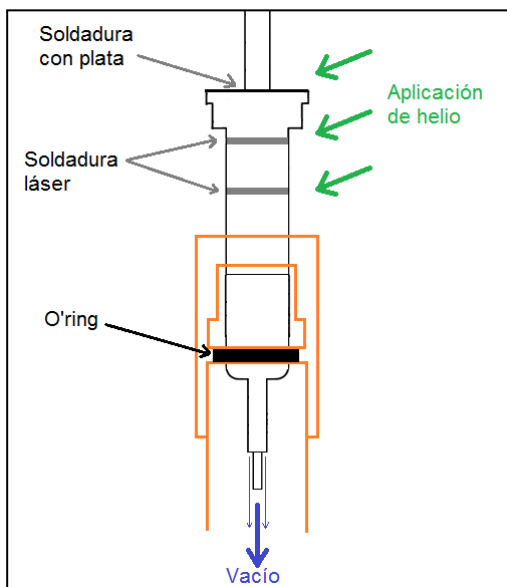


Figura 42: Con esta prueba de estanqueidad al helio se verifican las 3 soldaduras realizadas

2.2.10 Llenado con argón y soldadura láser del conector central

Materiales y herramientas:

- Pieza Buje separación + Pasante cerámico.
- Cable SPND + copa soldada.
- Electrómetro Keithley Instruments 610C y cables de conexión.
- Soldadora láser Sisma Serie LM-D (alta precisión).
- Equipo de vacío Pfeiffer vacuum QualyTest Serie HLT.
- Pistola de calor Black&Decker Linea HG 2000W.
- Gas argón pureza 5.0.
- Cilindro de latón para referencia de corte.
- Pinza y alicate.
- Otras herramientas varias de taller.

Descripción:

Se cortó el exceso del conector interno dejándolo al ras del pasante cerámico-metálico, y se comenzó con el secado del extremo del cable de aislación mineral basado en la medición de aislación utilizando la pistola de calor y midiendo aislación con el electrómetro (Figura 43), se calentó hasta no observar movimientos sensibles de la aguja del electrómetro, lo que indicó que no hay humedad, siempre midiendo más de $5 \cdot 10^{11} \text{ Ohm}$.



Figura 43: Medición de aislación

Al verificar las correctas condiciones de aislación, se colocó nuevamente en la máquina de vacío de la misma forma que para la prueba de estanqueidad. En este caso se purgó para quitar el aire y humedad que posea acumulada la máquina y se conectó su pico de purgado al tubo de Argón Grado 5.0 (pureza >99,999%), el cual es un gas inerte que evita reacciones químicas indeseadas, el equipo de vacío permitió el ingreso del argón emitiendo una alarma de saturación cuando se completó la operación.

Este proceso provocó vacío dentro del conector (quitando cualquier resto de aire y humedad), que luego es reemplazado por el gas de argón que deja ingresar el equipo a través del extremo abierto del pasante cerámico hasta la cavidad interna del buje de separación. Esto permitió minimizar el ingreso de aire con la correspondiente humedad ambiente durante la soldadura láser.

Inmediatamente se colocó el cilindro de latón de referencia y se procedió al aplastado o achatamiento de la punta con ayuda de una pinza para mejorar el contacto eléctrico con el conector central y además crear una superficie lineal que favorezca la realización de la soldadura laser (figura 44). Se verificó que el cilindro pueda quitarse sin problemas al terminar de presionar la punta, la función de este cilindro es meramente de orientación dimensional para realizar el achatamiento de la punta correctamente.

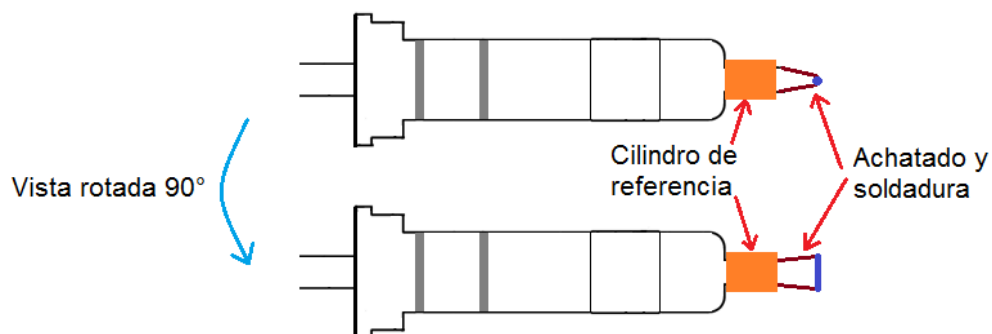


Figura 44: Uso del cilindro de referencia y el achatado de la punta para realizar la soldadura

Luego se quitó el cilindro de referencia y se llevó a la soldadora láser, modificando la configuración de potencia a un 10% y el de diámetro a 0,6 mm. Se realizó la soldadura a modo de “costura” cerrando el extremo del conector central como se muestra en la figura 55.

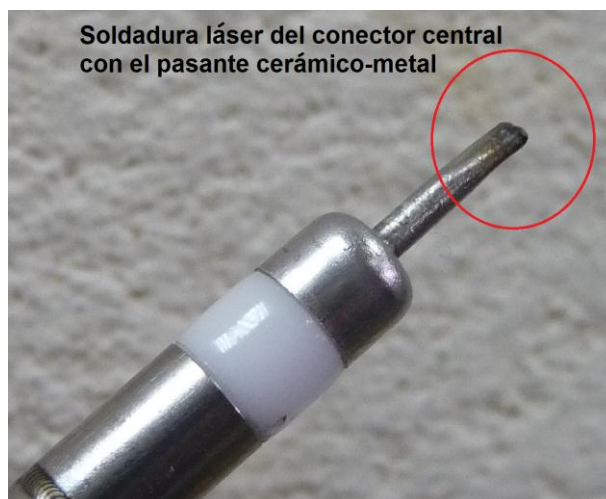
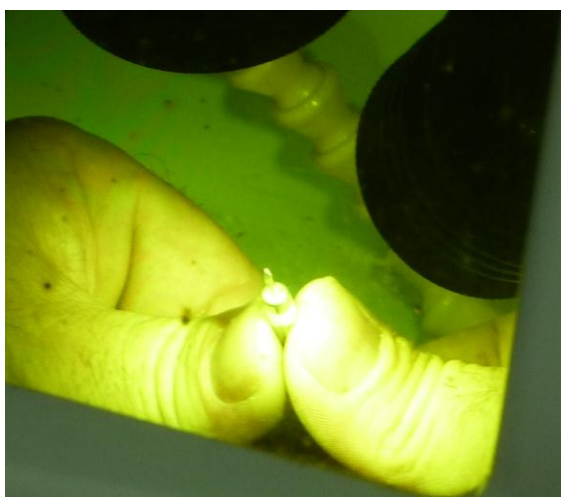


Figura 55: Manipulación de la pieza para la soldadura laser (Izquierda), resultado final del cierre (derecha).

La tarea de soldar con láser el conector central fue realizada por personal calificado del taller, debido a que es una tarea delicada que se encuentra al final del proceso, por lo que se limitó a la documentación de dicha soldadura.

2.2.11 Ensayo de soldadura final bajo condiciones de alta humedad

Materiales y herramientas:

- Conjunto cable SPND + copa soldada + pasante cerámico.
- Electrómetro Keithley Instruments 610C y cables de conexión.
- Paño de tela.
- Agua desmineralizada.
- Pinza y alicate.
- Otras herramientas varias de taller.

Descripción:

Al cerrar la punta con la soldadura laser se verificó el estado de la misma aplicando humedad y midiendo la aislación con el electrómetro (Figura 56). Para ello primero se humedeció el paño con agua desmineralizada y se tocó la punta del conector, constatando que la aislación no descienda de los $5 \cdot 10^{11}$ Ohm, al no detectar problemas en esta etapa, se procedió a colocar la punta soldada del cable en agua durante 20 min (cuidando que solo la punta quede sumergida). Luego se midió nuevamente la resistencia, si continuaba siendo superior a $5 \cdot 10^{11}$ Ohm indicaba que la soldadura era totalmente estanca. Esto se debe a que la composición del conector es muy higroscópica, es decir que tiende a absorber fácilmente la humedad que la circunda, si existiera alguna fisura o poro rápidamente se perdería la aislación por el ingreso del agua.



Figura 56: Ensayos para probar la estanqueidad por el método de alta humedad

Este ensayo se hace ante la imposibilidad de realizar las pruebas de estanqueidad por fugas al helio, ya que al cerrar la punta del pasante no es posible generar vacío dentro de la pieza como se hizo en el punto 2.2.9.

2.2.12 Montaje con soldadura de estaño del pin central

Materiales y herramientas:

- Conjunto cable SPND + copa soldada + pasante cerámico.
- Pin de acople pasante-BNC.
- Soldador eléctrico (Estación de soldado ATEN AT8565 con punta lápiz + aire).
- Aleación de estaño 60/40.
- Limas finas de mano y lijas.
- Acetona pura 99%.
- Pinzas.
- Otras herramientas varias de taller.

Descripción:

En este paso se utilizó el soldador eléctrico para unir con estaño el pasante al pin de acople, y este al pin del conector interno del BNC, previamente se limpió la superficie a soldar con acetona y se removió cualquier resto de oxidación depositada durante la soldadura láser de la punta.

La aleación 60/40 es uno de los tipos más comunes de soldadura. La aleación contiene 60% de estaño y 40% de plomo, tiene un punto de fusión aproximado de 180°C, se enfría y "se vuelve a solidificar" rápidamente, sin afectar la soldadura laser de la punta debido a la diferencia en la temperatura de función con la aleación del pasante (Ni42) que es superior a los 1000°C.



Figura 57: Soldadura del pin de acople (izquierda), y unión al pin central del BNC (derecha).

Como se muestra en la figura 57, primero se soldó con estaño el pin de acople pasante-BNC a la punta del pasante cerámico, y luego se hizo lo mismo con el pin central que conforma el conector BNC. Se verificó que estuvieran alineados y coincidan con el largo total especificado en el diseño.

2.2.13 Montaje final del buje de cierre y conector BNC

Materiales y herramientas:

- Conjunto cable SPND + copa soldada + pasante cerámico + pin de acople + pin BNC.
- Buje de cierre.
- Piezas que conforman el BNC.
- Llaves de tuerca y pinzas.
- Electrómetro Keithley Instruments 610C y cables de conexión.
- Otras herramientas varias de taller.

Descripción:

En este paso se enhebró primero la tuerca de ajuste del BNC al buje de cierre y se colocaron encastrando con la copa del conector soldada al cable como se muestra en las figuras 58 y 59.



Figura 58: Dirección de colocación del buje de cierre y la tuerca de ajuste

A continuación, se armó el conector BNC como se indica en la figura 59, y se procedió a ajustar las tuercas con las llaves correspondientes.

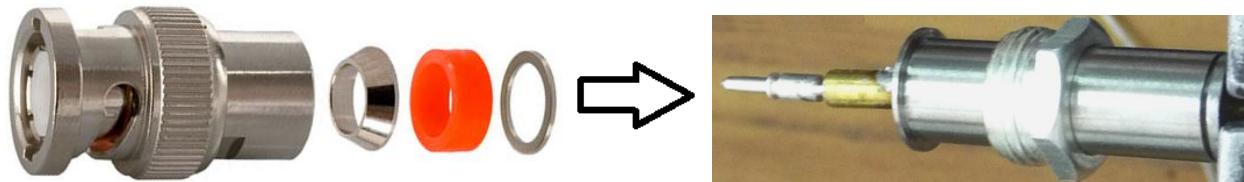


Figura 59: Dirección de armado del conector BNC



Figura 60: Vista frontal del conector (izquierda), conector BNC unido al resto del conector (derecha)

Antes de pasar a la siguiente etapa, se realizó una prueba de aislación con el electrómetro, para verificar que durante el armado final del BNC no se produjo ninguna fisura o rotura en alguna de las piezas, y que el pin central se encontraba correctamente soldado.

2.2.14 Soldaduras láser final con buje de cierre

Materiales y herramientas:

- Detector SPND con su conector conformado.
- Acetona pura 99%.
- Papel para limpieza.
- Soldadora laser Sisma Serie LM-D (alta precisión).

Descripción:

Como último paso en la construcción del conector para el detector autoenergizado, se limpió con acetona la zona a soldar. En este caso no requirió ser estanco, por lo que se hicieron 3 líneas o “cordones” de soldadura láser con la misma configuración del punto 2.2.7 cada 120° (figura 61), con el objetivo de brindar sujeción mecánica y soporte al conector (además de continuidad eléctrica), pero a su vez permite más fácilmente su cortado y apertura en caso de requerir alguna reparación en el futuro. Pudiendo observar el conector finalizando en la figura 62.



Figura 61: Detalle de la soldadura láser



Figura 62: Imagen final del conector

2.3 Ensayos y caracterización

2.3.1 Aislación, continuidad y capacitancia

Materiales y herramientas:

- Electrómetro marca Keithley Instruments 610C.
- Pistola de calor Black&Decker Linea HG 2000W.
- Capacímetro digital marca Escort EDC-110R.
- Resistencia calibrada Keithley 6517 de 10^{11} Ohm.

Descripción:

Para la verificación de la aislación y continuidad se sigue el protocolo definido en el documento de calidad “Ensayo Eléctrico de Aislación y Continuidad de los DAEs” (PPD-06Y-208 Rev: 0).

En el ensayo de aislación se utilizó un electrómetro constatado con una resistencia calibrada de valor conocido, con el objetivo de verificar que las mediciones posean un margen de error aceptable. Según los límites del documento de calidad, el valor de resistencia debía ser mayor a 10^{11} Ohm, al igual que se ha realizado durante el armado del conector.

Para verificar la continuidad se calentó el extremo del detector mientras se medía la aislación en el otro extremo. En caso de continuidad se debía observar una disminución sistemática de la aislación que se invertía al dejar de calentar, recuperando los valores iniciales.

Finalmente, el ensayo de capacitancia se realizó con un capacímetro. En este caso el objetivo del ensayo fue comprobar con otro método la continuidad del detector y saber cuán similares son los detectores constructivamente hablando.



Figura 63: Constatación con la resistencia de referencia de 10^{11} Ohm (izq), medición de aislación de uno de los detectores (centro) y medición de la capacitancia (der).

2.3.2 Caracterización: Calibración neutrónica

Materiales y herramientas:

- Electrómetros digitales marca Keithley Instruments 6514 y cables de conexión.
- Computadora y software para la adquisición de lecturas de los electrómetros.
- Facilidad Central de irradiación de Columna Térmica (FCCT) del RA-3.
- SPND de rodio para referencia ($2,04 \cdot 10^{-21}$ A/nv \pm 8%) y los SPND a caracterizar.

Descripción:

Para realizar la caracterización de los detectores se los comparó con un SPND de rodio con sensibilidad conocida, para lo cual se utilizó la FCCT del RA-3 que permitió introducir ambos SPND con los centros de sus zonas activas alineados, se realizó de esta forma debido a que ambos detectores poseen importantes diferencias en sus dimensiones, y se intentó tener una correcta estimación del flujo neutrónico que incide sobre el detector a calibrar. En el ANEXO A se hace una descripción más detallada de la columna térmica.

Antes de iniciar con la irradiación, fue necesario garantizar con un electrómetro digital que la corriente de fuga propia del detector sea menor a $0,2 \cdot 10^{-12}$ A (pA), para que al momento de caracterizarlo dispongamos de una señal "limpia" sin distorsiones producto de la polarización del aislante cuando se hace circular 100 voltios durante las pruebas de aislación y continuidad.

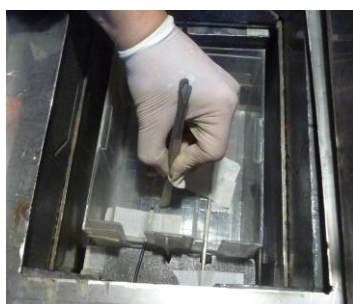


Figura 64: colocación de los SPND

Los detectores se ubicaron orientados al núcleo del reactor y paralelos entre ellos, para lograr conseguir una irradiación lo más similar posible.

El volumen útil de la cavidad porta-muestras es de 20x15x10 cm (figura 64), donde se colocó la caja de acrílico con ambos detectores, el de referencia (rodio) y los de vanadio que se irradiaron cada uno durante 25 min para su caracterización, con el objetivo de alcanzar la corriente de saturación con una diferencia menor del 1%.

Se utilizaron las radiografías para identificar correctamente el centro de la zona activa de cada detector, en este caso dicha zona se señaló con una cinta, y es la parte que se alineó con el detector de rodio, en la figura 65 se indican estas características.

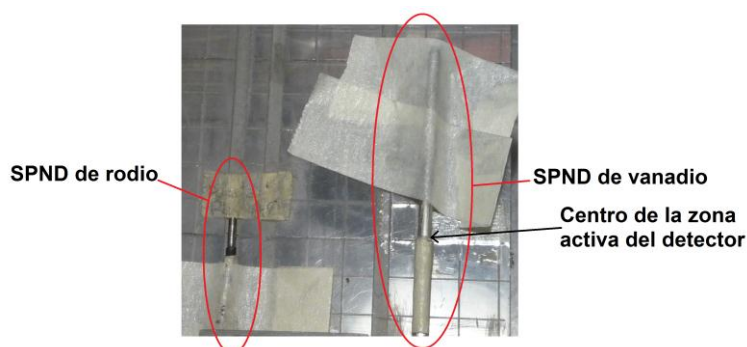


Figura 65: Alineación de los centros de las zonas activas

Durante la irradiación se recolectó las mediciones de ambos SPND mostrando gráficamente en tiempo real las lecturas mediante el software, guardándolas en archivos de texto para su posterior análisis.

Luego del tiempo de irradiación, se los dejó decaer por lo menos 45 minutos antes de retirarlos del dispositivo de irradiación, con el objeto de disminuir la dosis recibida durante este procedimiento.

Capítulo 3: Resultados y discusión

3.1 Aislación, continuidad y capacitancia

Número de detector	Aislación (Ohm)	Continuidad	Capacitancia (nF)
C017	$> 5 \times 10^{11}$	si	6,12
E003	$> 5 \times 10^{11}$	si	6,68
G002	$> 5 \times 10^{11}$	si	5,66
G007	$> 5 \times 10^{11}$	si	5,73
G008	$> 5 \times 10^{11}$	si	5,70
G012	$> 5 \times 10^{11}$	si	5,73
G014	$> 5 \times 10^{11}$	si	5,74
G018	$> 5 \times 10^{11}$	si	5,98

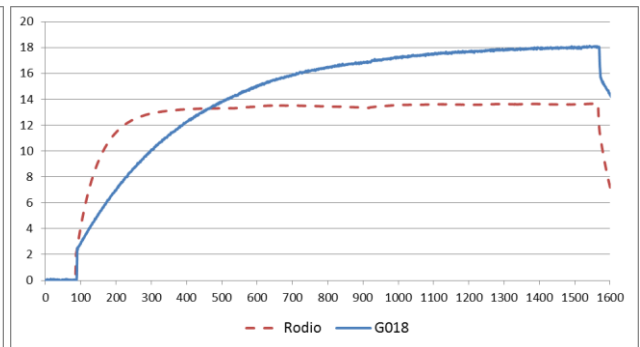
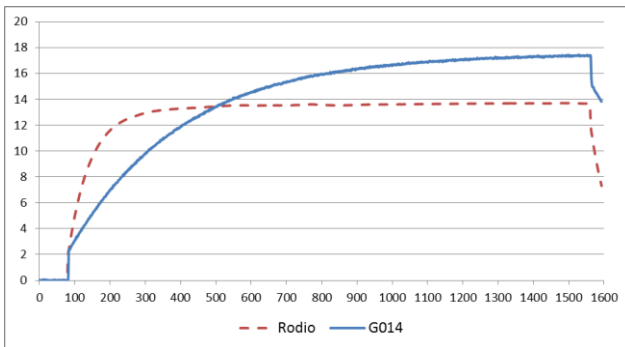
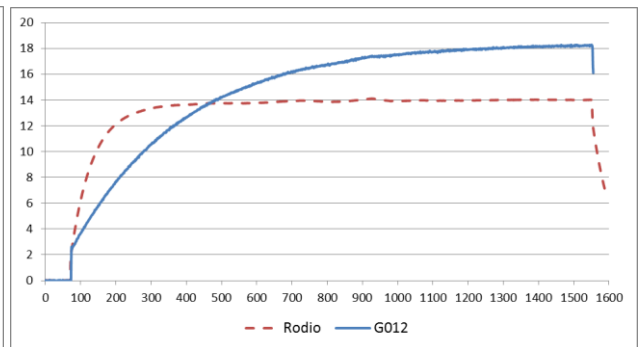
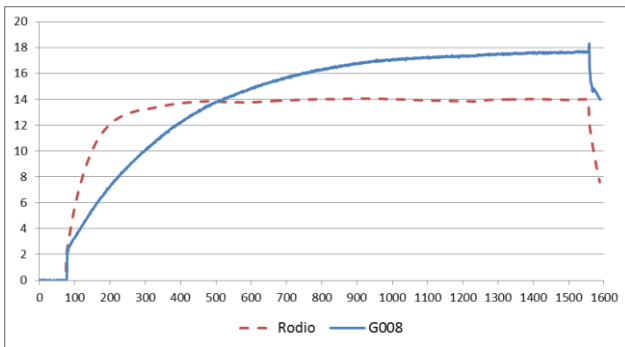
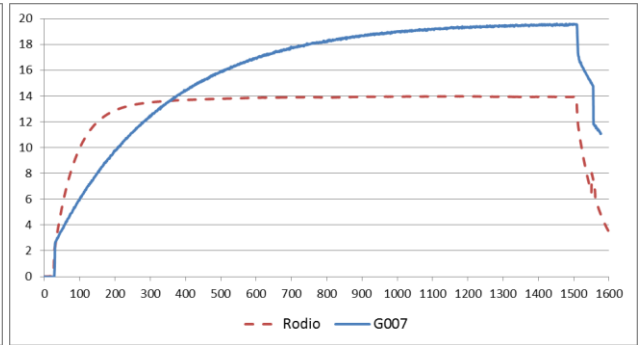
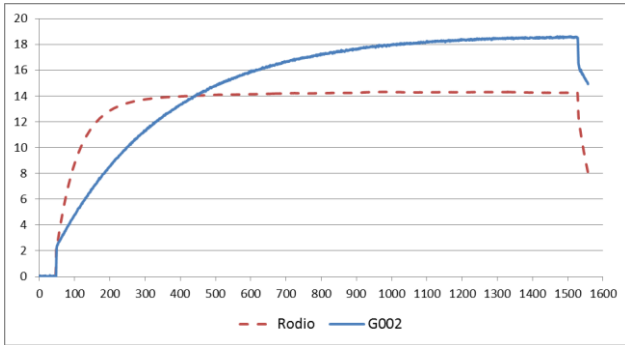
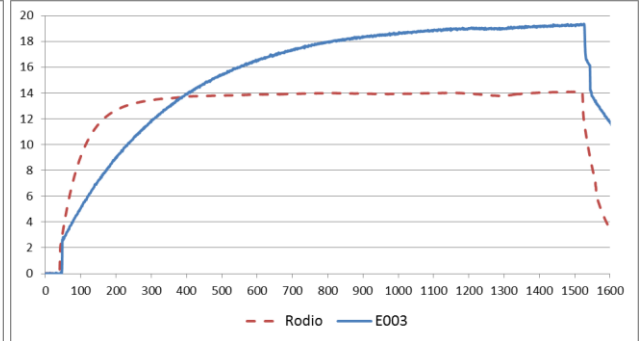
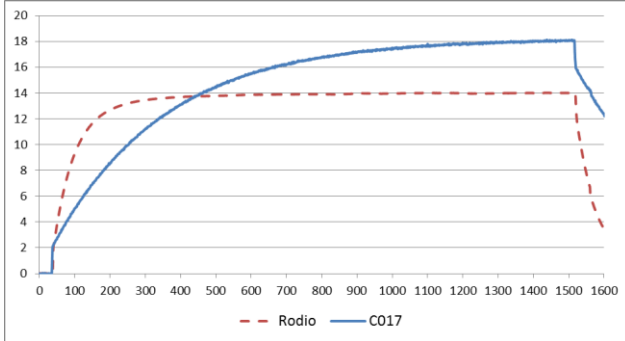
Tabla 4: Resultado de los ensayos

Para el ensayo de aislación y continuidad todos los resultados fueron similares y no se detectaron problemas.

Para la prueba de capacitancia el valor medio de los detectores fue de 5,86 nF (considerando el lote de 8 detectores), oscilando entre un mínimo de 5,7 nF y un máximo de 6,68 nF, lo que arroja una dispersión de aproximadamente un 16%. Aunque este valor es mayor al esperado, hay que considerar que se utilizaron detectores de varias series, que poseen diferencias en el tipo de óxido de magnesio y la pureza o dureza del vanadio afectan a la geometría final en el proceso de laminación. Si solo se consideran los 6 detectores de la serie G (mismas condiciones y materiales de fabricación), la capacitancia oscila entre un mínimo de 5,7 nF y un máximo de 5,98 nF, lo que arroja una dispersión de solo el 5%.

3.2 Calibración neutrónica

Las figuras a continuación presentan los resultados de las lecturas para cada uno de los detectores junto con la señal del detector de rodio. En el eje de ordenadas se representa el nivel de señal (μA) y en el de abscisas el tiempo transcurrido de la experiencia (segundos).



En la tabla 5 se presentan los promedios de las últimas 100 lecturas de los detectores, cuando la señal se estabiliza, y el desvío estándar (media \pm desvío) correspondiente.

Detector	Media $\pm \sigma$ (pA)	Rodio media $\pm \sigma$ (pA)
C017	18.04 \pm 0.03	14.008 \pm 0.005
E003	19.24 \pm 0.05	14.08 \pm 0.01
G002	18.54 \pm 0.04	14.257 \pm 0.005
G007	19.53 \pm 0.03	13.934 \pm 0.006
G008	17.61 \pm 0.04	13.97 \pm 0.02
G012	18.20 \pm 0.03	14.009 \pm 0.007
G014	17.36 \pm 0.03	13.69 \pm 0.01
G018	18.01 \pm 0.05	13.62 \pm 0.02

Tabla 5: Resultados de la media +/- el desvío estándar (σ)

De esta forma, conociendo la sensibilidad del detector de rodio ($2.04E-21$ A/nv \pm 8%), y estando ambos detectores sometidos al mismo flujo neutrónico es posible calcular la sensibilidad de los SPND de vanadio con los siguientes cálculos:

$$\text{Corriente (A) / flujo neutrónico (nv) = sensibilidad (A/nv)}$$

$$\text{Sensibilidad vanadio (A/nv) = sensibilidad rodio (A/nv) * corriente vanadio (A) / corriente rodio (A)}$$

Detector	Lectura (A)	Rodio (A)	Sensibilidad detector (A/nv)	Desviación por propagación del error (A/nv)
C017	1.8036E-11	1.4008E-11	2.6E-21	0.3E-21
E003	1.9237E-11	1.4077E-11	2.8E-21	0.3E-21
G002	1.8541E-11	1.4257E-11	2.7E-21	0.3E-21
G007	1.9526E-11	1.3934E-11	2.9E-21	0.3E-21
G008	1.7610E-11	1.3969E-11	2.6E-21	0.3E-21
G012	1.8203E-11	1.4009E-11	2.7E-21	0.3E-21
G014	1.7359E-11	1.3686E-11	2.6E-21	0.3E-21
G018	1.8012E-11	1.3619E-11	2.7E-21	0.3E-21

Tabla 6: Resultado de la sensibilidad de cada detector

De los datos medidos se obtiene una sensibilidad media de $2,7 \cdot 10^{-21}$ A/nv con una dispersión de aproximadamente un 11%. Si se considera que la desviación por propagación del error es de $0,3 \cdot 10^{-21}$ A/nv para cada uno de los detectores, tal cual como se muestra en la tabla 6, se puede afirmar que los valores de sensibilidad obtenidos no presentan diferencias significativas.

Capítulo 4: Conclusiones

Se pudo cumplir el objetivo de construir los 8 detectores autoenergizados requeridos para las facilidades de irradiación de silicio del proyecto RA-10.

Se adquirió una capacitación importante en las metodologías utilizadas en los diferentes procesos constructivos y se logró documentar dicha información.

El nuevo diseño propuesto para el cierre del extremo del conector se pudo validar mediante demostración de su factibilidad constructiva y el resultado exitoso de los ensayos realizados. Resultó un diseño simple, liviano (25 gramos) y compacto.

La sensibilidad media obtenida en los detectores con su dispersión es consistente con el valor requerido de $2,5 \cdot 10^{-22}$ (A/n $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)/cm de vanadio.

Bibliografía

- [1] Ing Alejandro Stankevicius – Ciclo de combustible Nuclear- Clase de combustibles MTR/RA-10.
- [2] Diseño y optimización de un aplanador de flujo neutrónico para dopaje de silicio en el reactor RA-10.
Federico Casella - Departamento de Reactores y Radiaciones - Instituto Balseiro (UNCuyo).
Gerencia de Ingeniería Nuclear - Centro Atómico Bariloche – CNEA.
<http://ricabib.cab.cnea.gov.ar/547/1/1Casella.pdf>
- [3] Dr. Herman Blaumann – Gerente del Proyecto RA-10 – CNEA.
X Congreso Regional Latinoamericano IRPA de Protección y Seguridad Radiológica
X Congreso Argentino de Protección Radiológica
VI Congreso Iberoamericano de Sociedades de Protección Radiológica
12 al 17 de Abril de 2015, Buenos Aires, Argentina
- [4] “Current Molybdenum-99 Supply” - National Academy of Sciences.
<https://www.nap.edu/read/24909/chapter/5#16>
- [5] OECD-NEA. 2016 Medical Isotope Supply Review: 99Mo/99mTc Market Demand and Production Capacity Projection 2016-2021.
<https://www.oecd-nea.org/cen/docs/2016/sen-hlgmr2016-2.pdf> (consultado en Agosto 2018).
- [6] “Global Production of Molybdenum-99 and Future Prospects” - National Academy of Sciences
<https://www.nap.edu/read/23563/chapter/6#71>
- [7] Recopilación de diversas páginas web (consultadas Sep-2018):
<http://www.etitudela.com/Electrotecnia/downloads/introduccion.pdf>
<http://www4.ujaen.es/~egimenez/FUNDAMENTOSFISICOS/semiconductores.pdf>
<https://iesvillalbahervastecnologia.files.wordpress.com/2008/04/materiales-semiconductores.pdf>
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Solids/dope.html>
<https://curiosoando.com/que-es-un-semiconductor-extrinseco>
<https://aprendemostecnologia.org/2008/04/02/materiales-semiconductores/>
- [8] El Dopado de Semiconductores - M Olmo R Nave – HyperPhysics.
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Solids/dope.html>
- [9] “Las tecnologías Facts y HVDC, idóneas para la generación de electricidad en altamar”.
<https://www.energias-renovables.com/eolica/las-tecnologias-facts-y-hvdc-idoneas-para-20140216>.
- [10] Incorporación de dispositivos FACTS y transmisión HVDC en el cálculo de flujos de potencia.
González Carranza Mario Andrés - Quito, mayo 2016.
<http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/17183/1/2016AJIEE-14.pdf>

- [11] TECDOC-1681 Neutron transmutation doping of silicon at research reactors - Vienna, 2012. IAEA (International Atomic Energy Agency).
https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1681_web.pdf
- [12] Transmutation Si-doping Facilities – IAEA (International Atomic Energy Agency).
<https://nucleus.iaea.org/RRDB/Content/Util/SiDoping.aspx> – consultado Agosto 2018.
- [13] 4th International Nuclear Chemistry Congress - 14 - 19 September, Maresias, SP, Brazil. Dr. John W. Bennett - OPAL-ANSTON.
http://www.acquacon.com.br/4thincc/apresentacoes/1609/16h20_john_bennett_dia_16.pdf
- [14] Diseño preliminar neutrónico del aplanador de flujo para el dopaje de silicios en el RA-10. Cintas A., Bazzana S.
Departamento de Reactores y Radiaciones - Instituto Balseiro (UNCuyo) .
Gerencia de Ingeniería Nuclear - Centro Atómico Bariloche – CNEA.
https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/46/127/46127070.pdf
- [15] Comunicación interna – Agustín Coleff.
- [16] Characteristics of self-powered neutron detectors used in power reactors. William H. Todt, Sr.
Imaging and Sensing Technology Corporation Horseheads, New York, 14845, USA.
<https://www.oecd-nea.org/science/rsd/ic96/4-2.pdf>
- [17] Radiation Detection and Measurement - Fourth Edition - Glenn F. Knoll.
- [18] IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Mohamad Hairie B. Rabir et al 2018 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 298 012029. Measurement and simulation of thermal neutron flux distribution in the RTP core.
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/298/1/012029/pdf>
- [19] Vanadium, rhodium, silver and cobalt self-powered neutron detector calculations by RAST-K v2.0. Farrokh Khoshahval, Minyong Park, Ho Cheol Shin, Peng Zhang , Deokjung Lee.
https://www.researchgate.net/publication/320363946_Vanadium_rhodium_silver_and_cobalt_self-powered_neutron_detector_calculations_by_RAST-K_v20
- [20] Comunicación interna – Marcelo Miller y Facundo González.
- [21] Consejos para la soldadura – SISA (Soldaduras industriales SA) - www.sisa-brazing.com
Fundamentos de la soldadura - <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn49.html>
- [22] Comunicación interna - Paula M. Curotto.
Gerencia de Área Aplicaciones de la Tecnología Nuclear - CNEA - Reactor RA-3.

Abreviaturas y definiciones

Acero inoxidable AISI 304L

El tipo 304 es el más utilizado de los aceros inoxidables austénicos (cromo/níquel). En la condición de recocido, es fundamentalmente no magnético y se torna magnético al trabajarse en frío. El acero inoxidable Tipo 304L se prefiere en las aplicaciones de soldadura para excluir la formación de carburos de cromo durante el enfriamiento en la región afectada por el calor de la soldadura. Estas aleaciones representan una excelente combinación de resistencia a la corrosión y facilidad de fabricación.

Atracción capilar (capillary attraction):

La fuerza que empuja a un líquido a través de dos superficies paralelas.

Brazing:

Es también conocida como "soldadura fuerte", y consiste en un proceso de unión térmica en el que el metal de aporte se calienta hasta su fusión fluyendo por capilaridad entre la holgura que existe entre los materiales a soldar, uniendo sus superficies por atracción atómica y mediante difusión.

El material de aporte tiene un punto de fusión por encima de los 450°C, pero siempre por debajo del punto de fusión de los componentes que va a unir.

Las características físicas y químicas del material de aporte son completamente diferentes de las piezas que va a soldar. Una característica notable de esta técnica es su capacidad para unir materiales disimilares y componentes con masas y tamaños distintos.

DAE o SPND:

Detector Auto Energizado (DAE) es análogo a Self Powered Neutron Detector (SPND).

Electrómetro:

Los electrómetros de estado sólido son a menudo dispositivos multipropósito que pueden medir voltaje, carga, resistencia y corriente. Miden la tensión mediante el "equilibrio de tensión", en el que la tensión de entrada se compara con una fuente de tensión de referencia interna que utiliza un circuito electrónico con una impedancia de entrada muy alta (del orden de 10^{14} ohms). Un circuito similar modificado para actuar como un convertidor de corriente a voltaje permite que el instrumento mida corrientes tan pequeñas (femtoamperes). Combinado con una fuente de tensión interna, el modo de medición de corriente puede adaptarse para medir resistencias muy altas, del orden de 10^{17} ohms.

FACTS (Sistemas Flexibles de Transmisión en Corriente Alterna):

Características y beneficios que en general presentan los dispositivos FACTS:

- Control preciso del flujo de potencia, asegurando un flujo óptimo de potencia, mantener condiciones en situaciones de contingencias o una combinación de ellas.
- Incrementar la cargabilidad de las líneas hasta sus límites térmicos de manera que se aproveche la capacidad total de las mismas.
- Incrementar la seguridad del sistema mediante la reducción de los límites de estabilidad, reducción de límites de corrientes de cortocircuito y sobrecargas y amortiguación de oscilaciones electromecánicas de sistemas de potencia y sus máquinas.
- Proveer mayor flexibilidad para ubicar nueva generación.
- Reducir los flujos de potencia reactiva en las líneas, liberando capacidad para la potencia activa.

Fundente (flux):

Componente químico aplicado a los metales base para protegerlos de la formación de óxido durante el calentamiento, y para favorecer el mojado del metal de aporte.

Gas trazador:

Punto de prueba individual para la prueba de estanqueidad con gas trazador, en nuestro caso utilizamos helio.

HVDC (Alta tensión en Corriente Continua):

Los enlaces HVDC superan algunas de las limitantes que presentan los sistemas AC convencionales y por ende ofrecen algunas ventajas sobre aquellos como las listadas a continuación:

- No existe un límite técnico de la longitud de cable submarino y subterráneo.
- No requiere que los sistemas operen en sincronismo.
- No se necesita incremento de la capacidad de cortocircuito para el equipo de maniobra.
- Inmunidad de los sistemas interconectados a la impedancia, ángulo de fase, frecuencia o fluctuaciones de voltaje.
- Mejora el sistema AC en general en cuanto a estabilidad a la vez que incrementa la capacidad de transmisión entre los dos sistemas gracias a la modulación de la potencia en función de la frecuencia, oscilaciones de potencia y capacidad de la línea.
- El impacto visual se ve considerablemente disminuido en una línea DC, debido a que las estructuras o torres de estas son de menor tamaño.

Holgura de la unión (joint gap):

Distancia existente entre los metales que van a ser unidos.

Inconel 600:

Inconel es una marca de Special Metals Corporation que se refiere a una familia de superaleaciones austeníticas de base níquel-cromo usada para aplicaciones que requieren resistencia a la corrosión y a altas temperaturas. Esta aleación de acero de níquel fue diseñada para ser usada desde temperaturas criogénicas hasta temperaturas elevadas en el rango de 2000° F. No es magnética, tiene excelentes propiedades mecánicas, y muestra una combinación deseable de alta fuerza y buena soldabilidad bajo un amplio rango de temperaturas. Su alto contenido de níquel le permite mantener la resistencia bajo condiciones de reducción, haciéndolo resistente a la corrosión en muchos componentes orgánicos e inorgánicos, tiene una resistencia excelente al agrietamiento por tensión de corrosión causada por el ion cloruro y también provee una excelente resistencia a soluciones alcalinas.

La aleación de Inconel 600 está formada por un 72% níquel, 14-17% cromo, 6-10% hierro, 1% manganeso, 0,5% Cobre, 0,5 Silicio, 0,15% Carbono y otros elementos en menores concentraciones.

LEU:

Uranio de bajo enriquecimiento (Low-enriched uranium), combustible con una concentración inferior al 20% de ²³⁵U.

Limpiador Ultrasónico:

Es un dispositivo de limpieza que utiliza los ultrasonidos (generalmente de 15-400 kHz) y una adecuada solución de limpieza para limpiar objetos delicados. La actividad de ultrasonidos (cavitación) ayuda a la solución a hacer su trabajo.

Material de aporte (brazing alloy):

Material que funde por encima de los 450°C pero por debajo de los metales que van a ser unidos. Debe poseer una buena fluidez que permita su distribución a lo largo de la unión y sea capaz de mojar el material base.

MCNP5:

El Código de Transporte de N-Partículas de Monte Carlo (MCNP) es un paquete de software para simular procesos nucleares desarrollado por Los Alamos National Laboratory.

Nv (flujo de neutrones):

El flujo de neutrones $\phi = nv$ (n es la densidad de neutrones y v es la velocidad), por lo que sus unidades (neutrones/cm³*cm/seg) se suelen representar como: n.cm⁻²seg⁻¹ o simplemente nv.

OPAL:

El reactor australiano de agua liviana en pileta abierta (OPAL, por su sigla en idioma inglés) es un reactor multipropósito de 20 MW que oficialmente empezó a funcionar en abril del 2007, INVAP fue responsable de la provisión del reactor mediante un contrato llave en mano, sus responsabilidades incluyeron el diseño, construcción y puesta en marcha de la planta y todos sus sistemas.

SCCM:

Standard Cubic Centimeters per Minute, es un término de medición de flujo que indica cm³ / min en condiciones estándar de temperatura y presión del fluido.

TIG (Soldadura):

Proceso de fusión por arco bajo gas protector con electrodo no consumible, en el que se produce la fusión del metal base, no se requiere de fundentes ya que el gas inerte lo protege, sin embargo presentan mayores deformaciones y tensiones residuales con pérdidas de propiedades mecánicas causadas por el alto input de calor, en comparación con el brazing.

Existen diferencias a la hora de suministrar el calor a la unión, mientras en las técnicas de fusión se consigue mediante arco eléctrico, haz de electrones, láser etc, en la soldadura fuerte se genera por antorcha, horno, e inducción principalmente.

Oxido de Magnesio:

El óxido de magnesio (MgO), o magnesia, es un compuesto químico mineral sólido higroscópico, su uso extensivo se debe a su alta resistencia dieléctrica y su baja conductividad térmica. El MgO generalmente se tritura y se compacta con un mínimo de huecos o huecos de aire. En este trabajo se utiliza como aislante eléctrico por su alta resistencia al calor y la radiación.

Agradecimientos

Para empezar quiero agradecer especialmente a los que me ayudaron en el taller de Instrumentación y Control del CAE explicándome con paciencia y dedicación todo lo que debía saber y hacer, abriéndome las puertas del taller para posibilitar este trabajo: Facundo, Claudio, Hernán, “El Polaco” y Alejandro. También agradecer a Silvia y Paula que me mostraron y explicaron todos los detalles durante la caracterización de los detectores en el RA-3, convirtiéndose en una de mis mejores experiencias este año.

En particular a mi Director por darme la oportunidad de trabajar con su grupo y confiar en mí para la realización del presente trabajo, esforzándose en la corrección para alcanzar el mejor nivel posible, siempre predispuesto a escucharme y ayudarme a pesar de estar corriendo con muchos temas.

A mis compañeros de la Especialidad que me ayudaron a estudiar y a entender los diversos contenidos, y por esas charlas variadas desde los temas más complejos de la Física hasta debatir sobre el futuro del plan nuclear argentino: Laura, Rebeca, Facundo, Víctor, Alejandro, Tamara, Betina, Juan B, Juan C, Dana, Wilfredo y Eleazar.

Quiero agradecerle también al Instituto Dan Beninson y a la CNEA por haber confiado en mí, dándome la posibilidad de estudiar en sus aulas y por haberme becado para cursar esta Especialidad. He aprovechado al máximo esta gran oportunidad y espero poder devolverle al país algo de lo que me ha dado.

A mis amigos Gabriel y Eva, que a pesar de no comprender exactamente de lo que se trataba el mundo de los reactores me escucharon y me acompañaron desde el comienzo, haciendo que no me sienta tan raro por meterme en este desafío.

A mi papá y mamá por apoyarme y ayudarme desde el principio, como siempre lo han hecho, por interesarse en lo que hacía y no hacerme notar que aun así estaban algo preocupados por todo lo que desconocían de la energía nuclear y las radiaciones. A mis abuelos, que no están para ver este trabajo pero estoy seguro que de alguna otra forma están presentes, en especial a Rafa que siempre motivó mi interés en construir y reparar por mis propios medios, y que se fue antes de poder contarle todo lo que aprendí y conocí en este tiempo. A mi hermano y a Fio que estuvieron corriendo con los preparativos para la llegada de Fede el 8 de octubre, pero aún así estaban listos por cualquier cosa que necesitara.

Último pero no menos importante, a Mayra por haberme soportado todo este tiempo con temas nucleares, los fines de semana de estudio, días de nervios antes de rendir los exámenes. Su apoyo fue fundamental para cumplir este gran objetivo, apostando a mi sueño personal de saber cada vez más de reactores nucleares.

Anexo A: Facilidad Central de irradiación de Columna Térmica del RA-3

La columna térmica es una estructura de grafito (de pureza nuclear) que, en forma de secciones cuadradas escalonadas, atraviesa el blindaje de concreto perimetral al tanque del reactor, llegando hasta las proximidades del núcleo como se muestra en las figuras A y B [22].

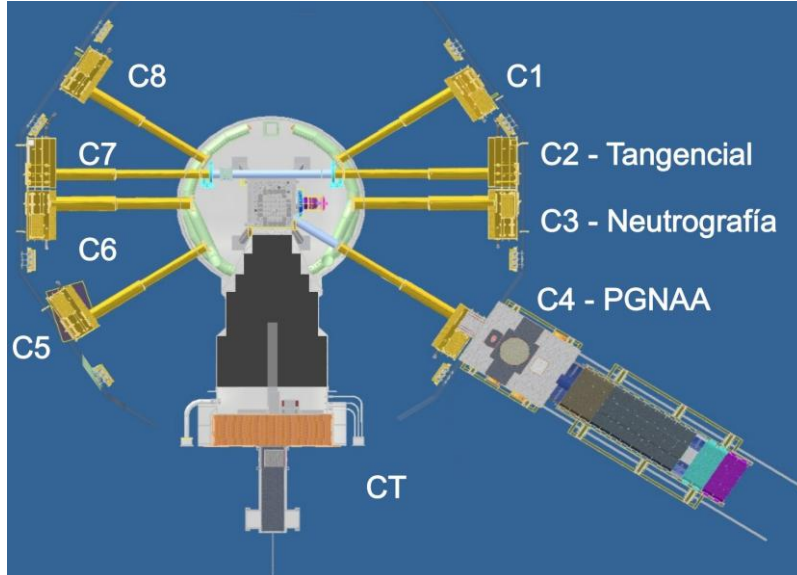


Figura A: Canales de irradiación del RA-3 (CT: columna térmica) [22]

FCCT – Partes principales

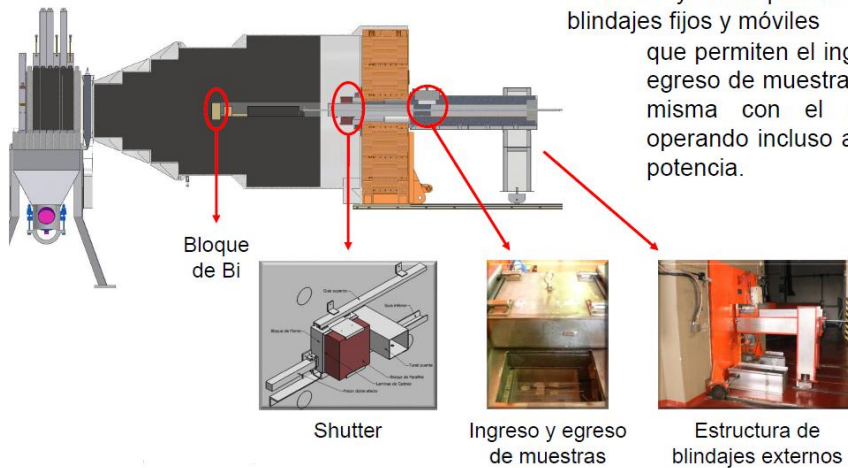


Figura B: Detalle de la Facilidad Térmica del RA-3[22]

El objetivo de esta estructura es disminuir la energía cinética de los neutrones provenientes del núcleo, con el propósito de obtener un campo isotrópico altamente termalizado. La columna posee un túnel central de aproximadamente 17 cm x 15 cm de sección y de 110 cm de largo, por el que puede introducirse una bandeja porta-muestra que atraviesa los diferentes blindajes externos hasta ubicarse haciendo “tope” contra un bloque de bismuto que provee protección contra la radiación gamma, dejando pasar a los neutrones térmicos. El flujo de neutrones térmicos esperado en la cara del porta-muestra más próxima al núcleo es de 1.10^{10} nv (neutrones.cm⁻².seg⁻¹), mientras que cae a 8.10^9 nv en la cara más alejada.