

***“AMPLIFICADOR Y FILTRO DE RUIDO NEUTRONICO”***

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

Autor: Marzano, Leandro Carlos  
Director: Zalcmán, Julio

Marzo 2017



**UNSAM**  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE  
SAN MARTÍN

Índice

<b>Resumen</b> .....	3
<b>Capítulo 1 - Introducción:</b>	
1.1. Generalidades sobre Reactores de Agua Presurizada.....	4
1.2. Particularidades de la Central Nuclear Atucha II.....	5
1.3. Vibraciones Mecánicas Dentro de un Reactor de Agua Presurizada....	8
1.4. Ruido Neutrónico.....	10
1.5. Obtención de las Señales de Ruido Neutrónico.....	11
<b>Capítulo 2: - Sistema de ruido neutrónico implementado en CNA II</b>	
2.1. Objetivo.....	18
2.2. Desafío Técnico del Sistema de Ruido Neutrónico para la CNA II.....	18
2.3. Configuración Elegida.....	19
2.4. Condiciones Respecto de la Seguridad.....	20
2.5. Generalidades del sistema implementado en la CNA II.....	21
<b>Capítulo 3: -Módulo Amplificador y Filtro para Ruido Neutrónico</b>	
3.1. Descripción general del equipo desarrollado.....	22
3.2. Descripción Funcional de Cada Bloque.....	23
3.3. Mediciones de Repuesta en Frecuencia.....	31
3.4. Mediciones en Planta.....	33
<b>Conclusiones</b> .....	37
<b>Referencias bibliográficas</b> .....	38

## Resumen

Es de reconocida importancia en las centrales nucleares, la utilización de sistemas alerta temprana para el monitoreo continuo de los distintos elementos dentro del reactor (estructurales, combustibles, etc.), que afectan y están relacionados directamente a la seguridad. Una técnica usual, es mediante el análisis espectral y registro histórico de las vibraciones mecánicas de la vasija y combustibles, por medio de las señales de “ruido neutrónico”, provenientes de los distintos detectores de flujo dentro y fuera del núcleo, (cámaras de ionización compensadas, detectores auto-energizados usados normalmente para obtener la distribución de flujo), las cuales debidamente acondicionadas son procesadas a tal efecto.

En el caso de la Central Nuclear Atucha II se planteó la necesidad de implementar un sistema de ruido neutrónico, que se adapte al equipamiento existente sin producir perturbaciones o comprometer las señales provenientes de los amplificadores asociados a los detectores de flujo, vinculadas con el control y la seguridad del reactor. Además se lidió con la necesidad de adecuarse a la distribución física de la instalación y la que tendrían las distintas partes del sistema propuesto, que implicaba tendidos de cables dedicados con longitud superior a 60 metros y con más de 150 canales de monitoreo.

Para ello se propuso un sistema compuesto por dos módulos con capacidad de lograr el objetivo de transmitir las señales de corriente alterna, de muy bajo nivel, en un entorno electromagnéticamente muy adverso, desde la ubicación donde se encuentran los amplificadores de los detectores hasta el punto donde se encuentra el sistema de adquisición de datos para el análisis espectral. Se describirá en el presente trabajo, de manera general, el sistema completo con las características especiales que requiere su diseño, y se profundizará en particular en el módulo responsable de la recepción y acondicionado de la señal para su posterior digitalización, (amplificador y filtro de ruido neutrónico), describiendo las diferentes etapas que lo componen y las razones que llevaron a la elección del esquema utilizado en cada una de ellas. Finalmente se presentarán mediciones experimentales realizadas en planta.

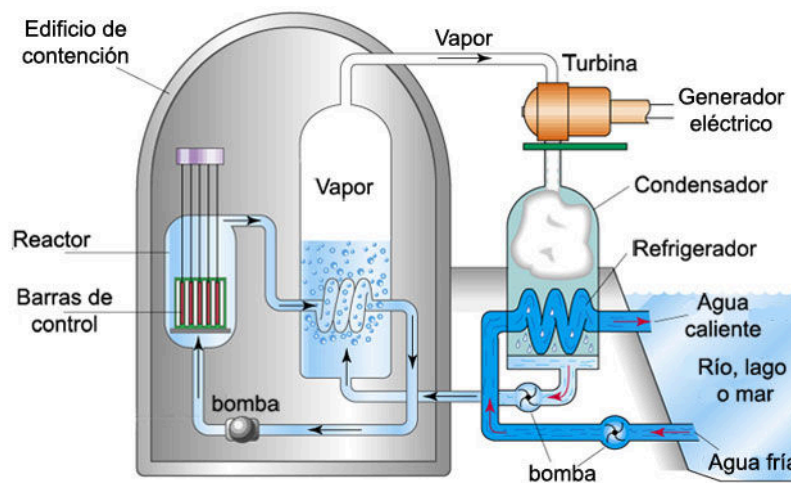
## CAPITULO 1

### Introducción

En este capítulo se brindará el marco introductorio sobre las vibraciones mecánicas que se producen en un reactor de potencia del tipo agua presurizada, el modo que estas pueden medirse utilizando el ruido neutrónico, y la importancia de estas en la evaluación de las componentes en el núcleo del reactor.

#### 1.1. Generalidades sobre Reactores de Agua Presurizada

En la Fig. 1.1 se presenta un esquema básico de una Central Nuclear de Agua Presurizada.



**Figura 1.1:** Esquema simplificado de una central del tipo agua presurizada

En este tipo de centrales, el agua proveniente del generador de vapor, ingresa impulsada por bombas al recipiente de presión por las ramas frías del circuito primario, recorre los elementos combustibles desde abajo hacia arriba, incrementado su temperatura desde unos  $280^{\circ}\text{C}$  a  $\sim 310^{\circ}\text{C}$  (ambos parámetros varían de levemente reactor en reactor). Para evitar la ebullición del agua a estas temperaturas, todo el circuito primario, deberá estar presurizado aproximadamente a unas 120 atmósferas.

Luego de pasar por el núcleo del reactor, el agua caliente circula hasta el generador de vapor. Allí mediante un intercambiador de calor, el agua del circuito primario cede parte de su energía al agua del circuito secundario.

Dado que el circuito secundario se encuentra a menor presión (50~70 atm), en el intercambio de energía, se producirá vapor a aproximadamente 280°C que luego será usado para impulsar las turbinas, que acopladas a un generador eléctrico, serán las responsables de producir la energía eléctrica que finalmente entregará la planta.

En este proceso, el agua del circuito primario, que perdió energía en el intercambio con el circuito secundario, es extraída del generador de vapor y recirculada a presión por las bombas primarias al recipiente de presión del reactor.

El agua del circuito secundario, luego de pasar por las turbinas (que contienen etapas de alta y baja presión para mejorar el rendimiento), pasa por los condensadores de vapor, en donde el agua es nuevamente llevada al estado líquido y enviada a presión mediante bombas al generador de vapor para reiniciar el ciclo.

En los condensadores de vapor, se realiza el intercambio de calor entre el circuito secundario y el circuito terciario que conecta con el último sumidero de calor, generalmente un río (Paraná como en el caso de C.N. Atucha I y II), un lago (como en el caso de la C.N. Embalse), o mediante el uso de torres de enfriamiento.

Una característica importante de los reactores de agua presurizada, es que los tres circuitos se encuentran separados el uno del otro, es decir no hay intercambio de fluido entre el primario, el secundario y el terciario. De este modo el agua del circuito primario, que es radiactiva (por activación del agua, impurezas, gases en solución, etc.), queda confinada, no pasa por la turbina ni sale del edificio de contención.

## 1.2. Particularidades de la Central Nuclear Atucha II

La Central Nuclear Atucha II (CNA II) es una central del tipo agua pesada presurizada (o PHWR: Pressurized Heavy Water Reactor en Inglés). Esto quiere decir que utiliza agua pesada, tanto como moderador y como refrigerante del núcleo, funcionando en circuitos separados dentro del recipiente de presión.

Las centrales Atucha I y II son únicas en su tipo a nivel mundial y fueron diseñadas por Siemens A.G.

En la Fig. 1.2 se presenta el esquema simplificado de la Central Atucha II.



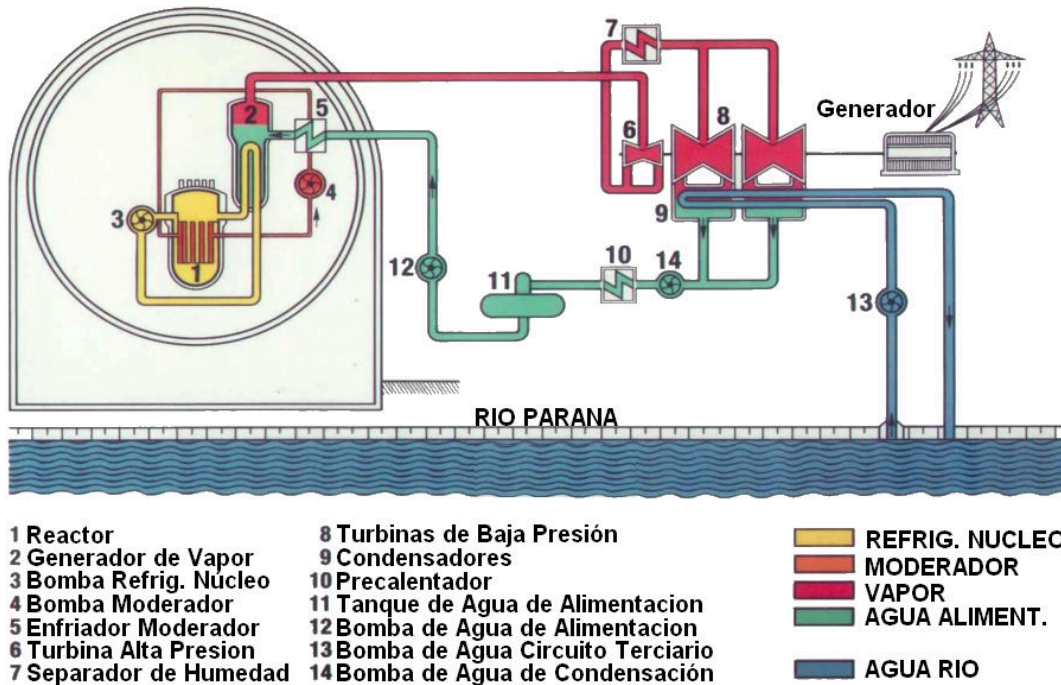


Figura 1.2: Esquema simplificado de la Central Atucha II

En la Fig. 1.2 puede observarse el circuito del moderador separado del circuito del refrigerante primario. En el núcleo del reactor, el moderador se encuentra ubicado en un tanque con bombas de circulación e intercambiadores de calor independientes, mientras que el refrigerante primario, circula a través de los elementos combustibles ubicados dentro de canales. Hay un intercambio de fluidos entre moderador y refrigerante controlado por orificios en diversos puntos del tanque moderador (que comunican con el plenum superior e inferior por donde circula el refrigerante).

### 1.2.1. Elementos Internos del Núcleo

El objetivo de esta sección es presentar las distintas partes ubicadas dentro del recipiente de presión que conforman el núcleo del reactor a fin de tener una magnitud de cantidad de elementos mecánicos que lo componen.

El núcleo del reactor PHWR de Atucha II, es de forma cilíndrica, compuesto por 451 elementos combustibles ubicados dentro de canales por donde circula el refrigerante primario de Deuterio (agua pesada). Cada elemento combustible contiene 37 barras de Zircaloy-4 rellenas con pastillas de Uranio natural y posicionadas mediante distanciadores metálicos tal como puede verse en la Fig. 1.2.1a.

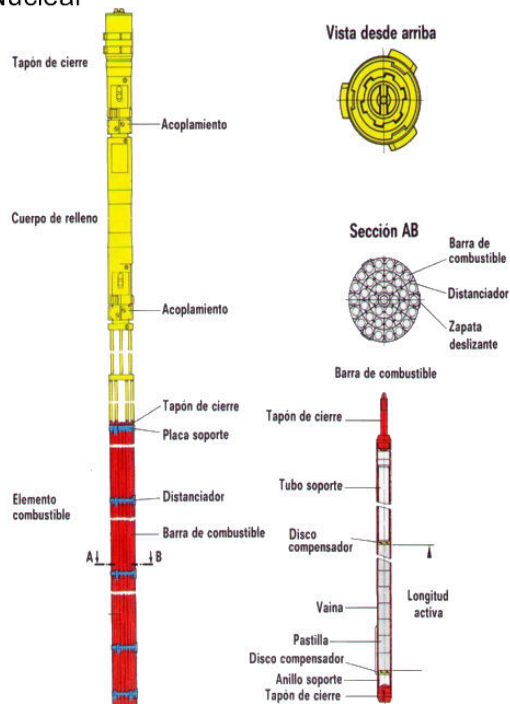


Figura 1.2.1a – Detalle de un elemento combustible.

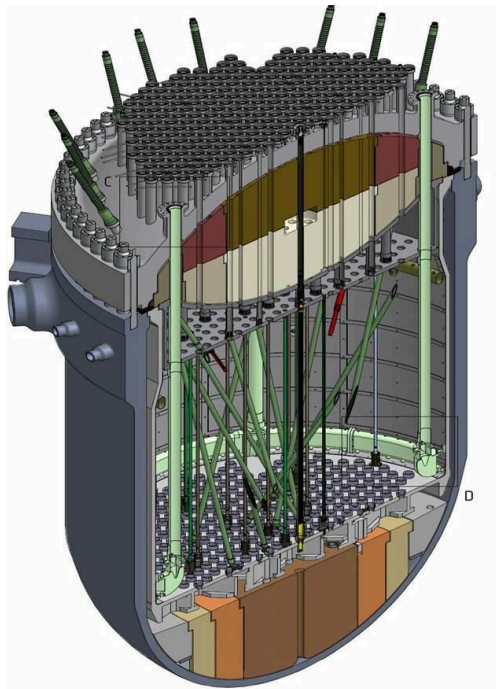


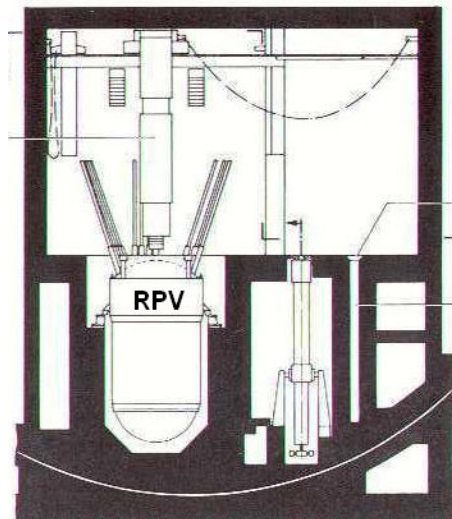
Figura 1.2.1b – Corte longitudinal del recipiente de presión.

En la Fig. 1.2.1b se encuentra representado un corte longitudinal del recipiente de presión, puede ver el tanque del moderador, los tubos guía inclinados de las barras de control y seguridad (en verde oscuro). También pueden verse los cuerpos de relleno en la parte superior e inferior del recipiente de presión y en color negro un canal donde se aloja un elemento combustible.

### 1.3. Vibraciones Mecánicas Dentro de un Reactor de Agua Presurizada

En reactores de potencia, el flujo de refrigerante induce vibraciones mecánicas en el conjunto del núcleo y sus elementos internos (canales, barras de combustible, tubos guía, etc.).

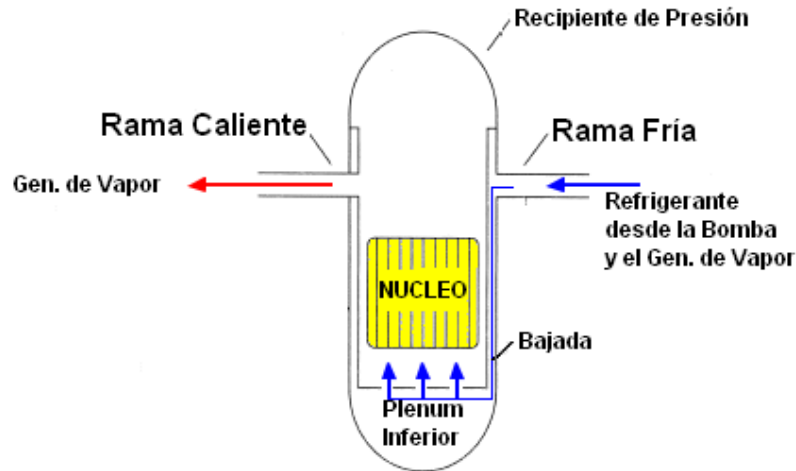
En el caso por ejemplo de los recipientes de presión con fijación en su parte superior - ver Fig. 1.3a - , este puede adoptar un comportamiento pendular.



**Figura 1.3a:** Esquema de fijación del recipiente de presión en Atucha II.

El barril del núcleo (Core-Barrel), asimilable al tanque del moderador en la Central Nuclear Atucha II, se encuentra fijado en la parte superior del recipiente de presión y está sometido al impacto directo del refrigerante al ingresar por las boquillas de entrada, más aun teniendo en cuenta que este se ve obligado a girar 90° para descender por las bajadas (Downcomers) para ingresar por la parte inferior del núcleo como se muestra en la Fig. 1.3b. La fuerza que realiza el refrigerante se traduce en movimiento del barril del núcleo.

Esto produce también el movimiento de sus elementos internos, como por ejemplo canales de refrigeración, tubos guías para las barras de control y elementos combustibles.

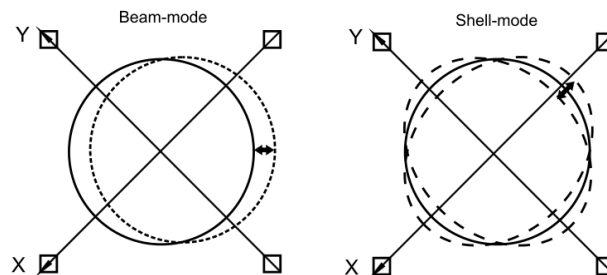


**Figura 1.3b:** Acción del refrigerante sobre el barril del núcleo.

Los elementos combustibles pueden moverse no solo debido al movimiento del barril del núcleo, sino también a debido al flujo ascendente de refrigerante a alta velocidad que pasa por las boquillas de distribución.

### 1.3.1. Modos de Vibración y Frecuencias Típicas.

Los modos típicos de vibración para el recipiente de presión y el barril del núcleo son el modo pendular (Beam-Mode) y el modo carcasa (Shell-Mode), en la Fig. 1.3.1 se representa de manera simplificada cada uno de estos modos.



**Figura 1.3.1:** Modos de vibración típicos para el recipiente de presión y el barril del núcleo.

Para el caso del modo pendular, la frecuencia de vibración ronda los 8Hz, mientras que para el caso del modo carcasa, la frecuencia se encuentra alrededor de los 20Hz.

Para los elementos combustibles, el modo típico de vibración es pendular (Beam-mode). Estos se ven excitados por el movimiento de los soportes de fijación dentro del núcleo y/o el flujo de refrigerante. La forma de vibración dependerá si la fijación es únicamente en la parte superior y se encuentra libre en la parte inferior (caso Atucha I y II), o viceversa, anclado en la parte inferior y libre en la parte superior (típico PWR).

Para el caso de Atucha I y II la frecuencia de vibración de los elementos combustibles es ronda los 15Hz, y para los canales de refrigeración se encuentra entre 2 y 3Hz.

#### 1.4. Ruido Neutrónico

Las vibraciones mecánicas del reactor y sus elementos internos, descritas en las secciones previas, son difíciles de medir por técnicas convencionales (como el uso de acelerómetros) debido a los elevados niveles de radiación, temperatura y presión presentes en el núcleo. Sin embargo esta información se encuentra enmascarada en la señal de los detectores de flujo neutrónico, y convenientemente separada, puede procesarse por intermedio de las técnicas de análisis de ruido.

La influencia de las vibraciones en el sistema es muy pequeña, por lo tanto no contribuyen sustancialmente al flujo neutrónico, pero mediante la ayuda de técnicas de medición y análisis de esas variaciones débiles presentes en él (denominadas *ruido neutrónico*), puede extraerse la información sobre el comportamiento de los elementos del reactor y analizar las vibraciones mecánicas normales de estos, así como vibraciones indeseadas o anómalas (por ejemplo barras de combustible con juego excesivo en su fijación). De este modo se pueden prevenir fallas por fatiga de materiales, desgaste, etc., de ahí su utilización para sistemas de alerta temprana.

En la Fig. 1.4 se representa de manera cualitativa el ruido neutrónico superpuesto sobre el valor medio de flujo.

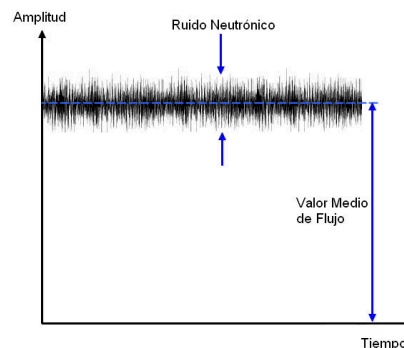


Figura 1.4: Representación del ruido neutrónico.

Cabe aclarar que el ruido neutrónico contiene otras componentes (no solo las debidas a las vibraciones mecánicas) que están relacionadas con la potencia de reactor, variaciones de temperatura del moderador y otros procesos, pero no serán objeto de estudio de este trabajo.

### 1.5. Obtención de las Señales de Ruido Neutrónico

En los reactores nucleares, existen detectores de flujo neutrónico ubicados dentro y fuera del recipiente de presión.

Se los denomina “In-Core” a los que se encuentran ubicados dentro del núcleo, mientras que a los que se encuentran fuera de la vasija, se los llama “Ex-Core”. Estos detectores se usan normalmente en la planta para conocer el valor y la distribución de flujo neutrónico, así como para los sistemas de seguridad.

#### 1.5.1. Detectores “In-Core”

Los detectores “In-Core”, en el caso de Atucha II, se encuentran montados en lanzas, que se ubican en tubos guía dedicados dentro del recipiente de presión. Son del tipo auto-energizados, o SPND por sus siglas en inglés “Self Powered Neutron Detector”. En ellos, un electrodo de un material específico, en este caso Vanadio, al ser sometido a un flujo de neutrones térmicos, se activa por captura neutrónica y genera una corriente eléctrica que es proporcional al flujo de neutrones térmicos al que está sometido, en la Fig 1.5.1a se presenta una vista en corte de este tipo de detectores en donde puede verse en la parte central el electrodo de material activo.



Figura 1.5.1a: Detector SPND

Dado que dentro del núcleo del reactor pueden existir variaciones locales de flujo, los detectores In-Core, permiten conocer la distribución axial y radial del mismo.

Desde el punto de vista de análisis de vibraciones, las señales de los detectores In-Core, son usadas para evaluar las vibraciones de los elementos internos del núcleo, como por ejemplo los canales de refrigeración, los elementos combustibles y tubos guía de instrumentación.

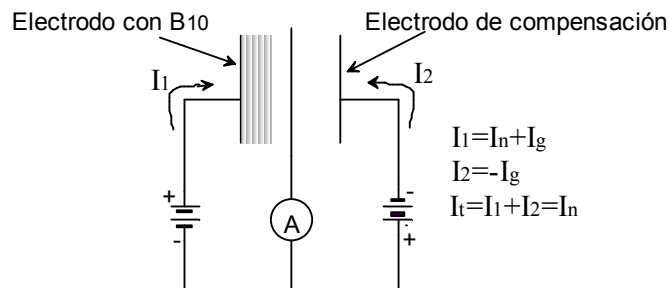
En la Fig. 1.5.1b se puede apreciar una lanza de instrumentación In-Core del tipo SPND de Vanadio.



**Figura 1.5.1b:** Lanza de instrumentación In-Core (Mod. CNEA F100).

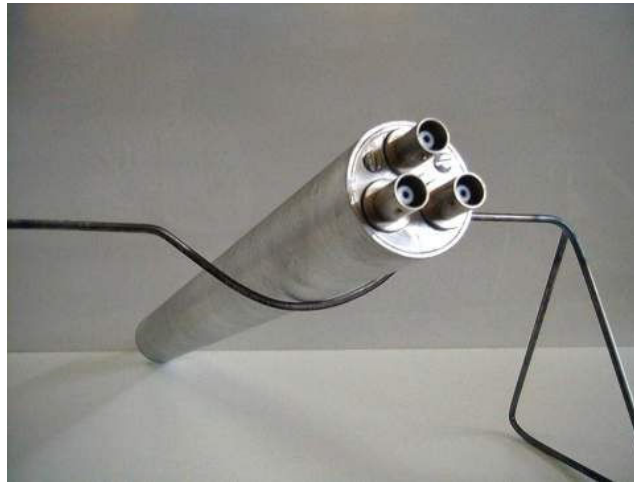
### 1.5.2. Detectores “Ex-Core”

Estos detectores se encuentran ubicados por fuera del recipiente de presión y en el caso de Atucha II son Cámaras de Ionización Compensadas (C.I.C.). Este tipo de detectores cuenta con dos electrodos, uno con recubrimiento de  $B^{10}$ , y otro sin recubrimiento, de esta manera la cámara entrega a su salida una corriente eléctrica que es proporcional al flujo de neutrones térmicos, mientras que la contribución a la corriente por la radiación gamma es cancelada en el propio detector. En la Fig. 1.5.2a se representa esquemáticamente la compensación de corriente.



**Figura 1.5.2a:** Esquema de compensación de corriente en una CIC.

En la Fig. 1.5.2b se aprecia una cámara de ionización compensada, en donde se pueden ver los 2 terminales de polarización (positiva y negativa), y el terminal de corriente de salida.



**Figura 1.5.2b:** Cámara de Ionización Compensada (Mod. CNEA F120).

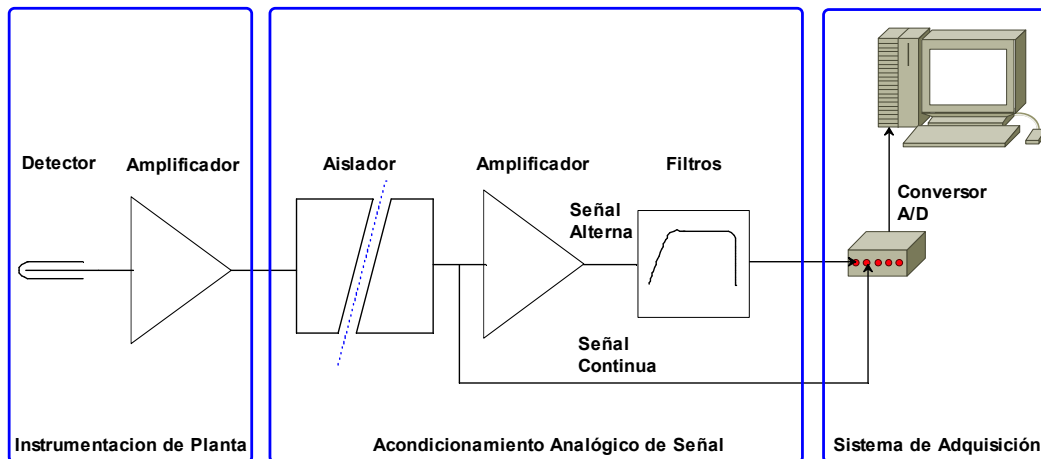
Las señales de los detectores Ex-Core, son usadas principalmente para el análisis de vibraciones de ciertas partes internas del reactor, como por ejemplo canales de refrigeración, barril del núcleo (o tanque del moderador), así como vibraciones del recipiente de presión.

### 1.5.3. Procesamiento de las Señales de los Detectores

En ambos tipos de detectores, las señales de corriente (del orden del nano al micro Ampere) son enviadas mediante cables blindados a sus respectivos amplificadores. Estos las procesan convirtiéndolas de corriente a tensión, aumentando su nivel y entregando a su salida una señal que es proporcional al flujo neutrónico.

Estas señales de tensión provenientes de los amplificadores de planta se envían luego mediante aisladores a los equipos de acondicionamiento analógico donde son amplificadas y procesadas para separar sus componentes de corriente continua, corriente alterna y posterior filtrado. Las señales de salida de estos equipos serán luego utilizadas para evaluar las vibraciones del reactor mediante técnicas de análisis espectral haciendo uso de equipos de adquisición y procesamiento digital (transformada de Fourier).

En la Fig. 1.5.3a se representa un esquema básico de procesamiento de señales de ruido neutrónico para análisis de vibraciones.



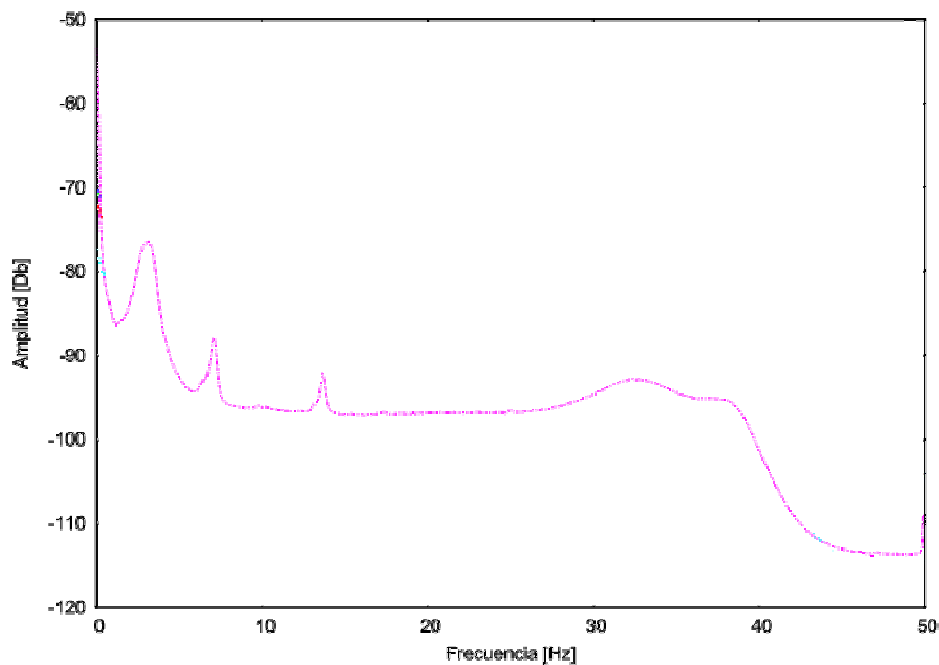
**Figura 1.5.3a:** Diagrama básico de sistema de procesamiento de señales de ruido neutrónico.

Función de cada bloque:

- **Detector y Amplificador de Planta:** Son los equipos de instrumentación utilizados en la central para la medición de flujo neutrónico, tanto para seguridad como para conocer la distribución de flujo en el núcleo. Los amplificadores se encargan de convertir la señal de corriente de los detectores en una señal de tensión y tienen un ancho de banda de 20 a 200Hz según el tipo de detector (SPND o CIC respectivamente).
- **Aislador:** Permite separar galvánicamente las señales de los amplificadores de planta (que son de seguridad) del sistema de Acondicionamiento y Adquisición (que son equipos no relacionados con la seguridad por no enviar señales de actuación para protección del reactor). De esta manera el sistema de procesamiento de señales, queda aislado de los equipos de planta y cualquier inconveniente que pueda surgir con ellos no impacta en la seguridad de planta ni en su disponibilidad.
- **Amplificador y Filtro:** Filtra y amplifica las señales de corriente alterna (ruido neutrónico) en el orden de 100 a 1000 veces y adapta su ancho de banda al rango de las señales bajo estudio y requisitos del sistema de adquisición (entre 0,1 y 40Hz).

- *Sistema de Adquisición:* Convierte las señales analógicas de corriente alterna (ruido neutrónico) y corriente continua (valor medio de flujo neutrónico importante para normalizar el espectro), en señales digitales que serán luego procesadas por equipos informáticos mediante transformada de Fourier, para obtener los espectros que contienen las frecuencias de vibración de los distintos elementos.

En la Fig. 1.5.3b se presenta a modo de ejemplo un espectro de frecuencias, en donde se pueden apreciar los picos pertenecientes frecuencias de vibración de diferentes elementos mecánicos del reactor.



**Figura 1.5.3b:** Espectro de frecuencias obtenido de señales de ruido neutrónico (pertenciente a Atucha I).

Se ampliará en los capítulos posteriores las funciones específicas de cada bloque en el sistema implementado en Atucha II, así como las señales que entran y salen de ellos.

#### 1.5.4. Análisis de las señales adquiridas

Históricamente el dominio de las frecuencias es el preferido para el análisis de las señales de ruido neutrónico. En ellos se basan los sistemas de alerta temprana.

##### Transformada en el Dominio de Frecuencia

El software adquiere datos de amplitud (mediante conversor analógico-digital) en intervalos regulares de tiempo  $\Delta t$ .

Para poderlos llevar al dominio de la frecuencia se utilizan algoritmos basados en la Transformada de Fourier.

Para una señal estacionaria  $x(t)$ , su Transformada de Fourier es:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt$$

Para poder realizar la Transformada de Fourier se divide la señal en intervalos de tiempo de longitud  $T$ , lo que equivale a multiplicar la función  $x(t)$  por una función  $w(t)$ , llamada ventana, con valores igual a uno en el intervalo  $[0, T]$  y cero fuera de este intervalo, con esto se obtiene la Transformada Finita de Fourier:

$$X(f, T) = X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) w(t) e^{-j2\pi ft} dt = \int_0^T x(t) e^{-j2\pi ft} dt$$

El software realiza un análisis sobre muestras digitales de la señal adquiridas en intervalos regulares  $\Delta t$ :  $x(0)$ ,  $x(\Delta t)$ ,  $x(2\Delta t)$ ... $x((N-1)\Delta t)$ , lo que resulta en la versión discreta de la ecuación anterior, DFT (Discrete Fourier Transform):

$$X(f) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} x(n\Delta t) e^{-j2\pi f \cdot n\Delta t}$$

Esta ecuación implica un continuo de frecuencias, la frecuencia máxima, por el teorema de Nyquist, es  $F_n$ . El rango de definición para la frecuencia está acotada en el intervalo  $[0, F_n]$ . El muestreo discreto nos limita a un número finito de puntos de la señal en el intervalo  $[0, T]$ , por lo que se puede expresar el espectro en forma discreta:

$$X(k) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} x(n\Delta t) e^{-j2\pi(k\Delta f)(n\Delta t)} \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Donde  $f = k \Delta f$ ,  $F_n = \Delta f (N)$  y  $\Delta f$ : resolución espectral.

Por el teorema de Nyquist:

$$f_s = 2f_N \Rightarrow f_N = \frac{f_s}{2} \Rightarrow f_N = \frac{1}{2\Delta t} \text{ con } f_s = \frac{1}{\Delta t}$$

Por otro lado el periodo de muestreo es:

$$T = N\Delta t \Rightarrow \Delta t = \frac{T}{N}$$

La forma más común de obtener los valores discretos de frecuencia es tomando:

$$\Delta f = \frac{1}{T}$$

Entonces:

$$f_N = \frac{1}{2\Delta t} = \frac{N}{2T} = \frac{N}{2} \Delta f$$

Esto quiere decir que  $k$  puede tomar los valores de 0 hasta  $N/2$ ;  $k=0$  representa el aporte de la componente de corriente continua al espectro de la señal.

Por lo tanto, la representación del espectro de frecuencia de la señal está dada por:

$$X(k) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} x(n\Delta t) e^{-j2\pi(k\frac{1}{T})(n\frac{T}{N})} \quad k = 0,1,2,3,\dots,\frac{N}{2}$$

$$X(k) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} x(n\Delta t) e^{-j2\pi\frac{k.n}{N}} \quad k = 0,1,2,3,\dots,\frac{N}{2}$$

La ecuación anterior es la Transformada de Fourier Discreta (DFT). Para obtenerla con un número reducido de operaciones aritméticas se utiliza un algoritmo denominado Transformada Rápida de Fourier (FFT).

Una vez transformada la información adquirida del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, es posible graficar la Densidad Espectral de Potencia (PSD por sus siglas en inglés), respecto de la frecuencia en Hz. De esta manera se visualizarán distintos picos, algunos de los cuales pueden interpretarse como las frecuencias de vibración de los elementos en el núcleo del reactor (ver Fig. 1.5.3b).

## CAPITULO 2

### Sistema de ruido neutrónico implementado en CNA II

#### 2.1. Objetivo

El objetivo del presente trabajo es el desarrollo de un módulo electrónico de instrumentación nuclear para la amplificación y filtrado de señales de ruido neutrónico, que forma parte del sistema de alerta temprana de la Central Nuclear Atucha II.

#### 2.2. Desafío Técnico del Sistema de Ruido Neutrónico para la CNA II

En el caso de la CNA II se planteó la necesidad de implementar un sistema de ruido neutrónico (con la planta ya en operación) que lidiara con los problemas de ubicación física que existían.

Como se describió en el capítulo introductorio, se utiliza la señal que suministran los amplificadores de planta para realizar el análisis y en el caso particular de Atucha II la ubicación de estos es distinta y distante a aquella en la que se encuentran los equipos de acondicionamiento analógico de la misma.

El recorrido promedio de los cables que se utilizan para transmitir las señales es de 60 metros, desde la sala de instrumentación en que se encuentran los amplificadores de planta hasta el recinto, ubicado detrás de sala de control, en que se encuentra el sistema de instrumentación de alerta temprana. Sumado a este recorrido extenso, se añade el ruido eléctrico e interferencias, presentes en toda instalación industrial, ya que el tendido de cables se hizo con la planta en operación y por lo tanto no está ubicado en bandejas dedicadas, si no en aquellas bandejas disponibles, compartidas con otros cables.

Por lo que se propuso una solución para poder transmitir las señales de ruido neutrónico hasta el sistema de análisis, sin comprometer la seguridad e integridad de las señales planta.

### 2.3. Configuración Elegida

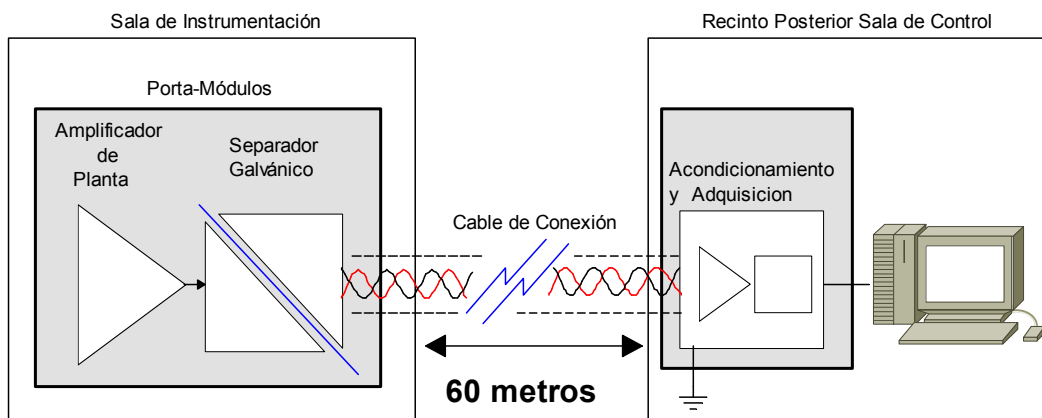
Para lograr con éxito la transmisión de las señales de ruido neutrónico (corriente alterna) y el valor de flujo asociado a cada detector en particular (corriente continua), se optó por separar en dos módulos los equipos de acondicionamiento:

- Separador Galvánico y Transmisor
- Receptor, Amplificador y Filtro

El Separador Galvánico se encuentra ubicado en la sala de instrumentación, en un porta-módulos compartido con los amplificadores de planta.

El Amplificador y Filtro está ubicado en el recinto detrás de sala de control, en un rack especialmente acondicionado a tal fin, en conjunto con el sistema de adquisición de datos.

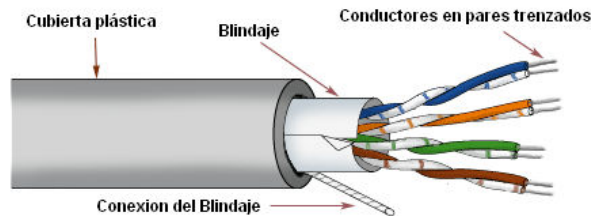
En la Fig. 2.3a se representa en un diagrama en bloques simplificado.



**Figura 2.3a:** Diagrama en bloques de la configuración elegida.

Para la transmisión de señales se eligió utilizar un lazo de corriente de 4-20mA que brinda mayor inmunidad a interferencias electromagnéticas y no presenta inconvenientes con la longitud del cable.

El cable elegido a su vez es un multipar trenzado para instrumentación con blindaje. El uso de multipar es para enviar varias señales por cable (canales). El trenzado entre conductores permite lograr mayor inmunidad a interferencias electromagnéticas inducidas. En la Fig. 2.3b se exhibe un cable similar al utilizado.



**Fig. 2.3b:** Cable utilizado para la conexión de los equipos desde sala de instrumentación hasta el recinto de adquisición.

**A modo de conclusión con esta configuración se logró:**

- *Minimizar el tamaño y la complejidad de los equipos electrónicos en sala de instrumentación, donde el espacio físico era limitado.*
- *Transmitir la señal de flujo neutrónico y ruido neutrónico por un solo par de cables, y ya que el sistema cuenta con varios canales disminuir el cableado que debía realizarse que era uno de los requisitos del proyecto.*
- *Reducir la influencia de la interferencia electromagnética e independizar al sistema de la longitud del cable al utilizar la transmisión de la señal en modo lazo de corriente (lazo 4-20mA).*

**2.4. Condiciones Respecto de la Seguridad**

Dado que las señales de los amplificadores de planta no pueden perturbarse ya que estas son utilizadas para funciones de control y protección del reactor, el módulo Separador Galvánico, tiene requisitos muy específicos en cuanto a su diseño, a saber:

- *Alta impedancia de entrada:* de modo no cargar eléctricamente las etapas de salida de los amplificadores
- *Aislación entre entrada y salida de 500 Volt de corriente alterna:* Esto permite que cualquier inconveniente surgido en el cableado o en los equipos de acondicionamiento y adquisición, (que no son considerados de seguridad) no se vea reflejado como una perturbación o perdida de señal en la salida de los amplificadores de planta
- *Salida de corriente completamente aislada:* La salida de corriente hacia los módulos Amplificadores y Filtro se encuentra aislada no solo respecto de la entrada si no también respecto de la fuente de energía que la provee de alimentación. Con esto se busca que ante una falla o perturbación en el cableado, esta no se propague a la alimentación de sala de instrumentación.

## 2.5. Generalidades del sistema implementado en la CNA II.

El sistema cuenta en total con 150 señales pertenecientes a distintos detectores dentro y fuera del núcleo.

Cada módulo Separador Galvánico cuenta con 3 canales, por lo tanto se requirió 50 módulos y 50 cables de 3 pares trenzados cada uno.

Estas 150 señales se presentan en un tablero de conexión (llamado “patchera”) en donde se conectan a las entradas de los distintos Amplificadores y Filtros.

El sistema de recepción y acondicionamiento de señal tiene 32 módulos Amplificador y Filtro que generan 64 señales (corriente alterna y corriente continua) que son enviadas luego al sistema de adquisición digital.

Los módulos Amplificador y Filtro se encuentran montados en chasis de 19” (racks) y a su vez estos están montados en un armario en conjunto con el equipo de adquisición.

## CAPITULO 3

### Módulo Amplificador y Filtro para Ruido Neutrónico

#### 3.1. Descripción general del equipo desarrollado.

Este módulo tiene como función acondicionar, para su posterior análisis espectral, las señales provenientes de los amplificadores de los detectores de flujo neutrónico. Separando sus componentes de corriente continua y corriente alterna, incrementando su amplitud y reduciendo su ancho de banda, a las frecuencias de interés para el estudio de las vibraciones mecánicas de los elementos del reactor.

Para ello cuenta con un amplificador de ganancia ajustable y filtros pasa banda con frecuencias de corte seleccionables a fin de obtener el rango dinámico óptimo de la señal de salida.

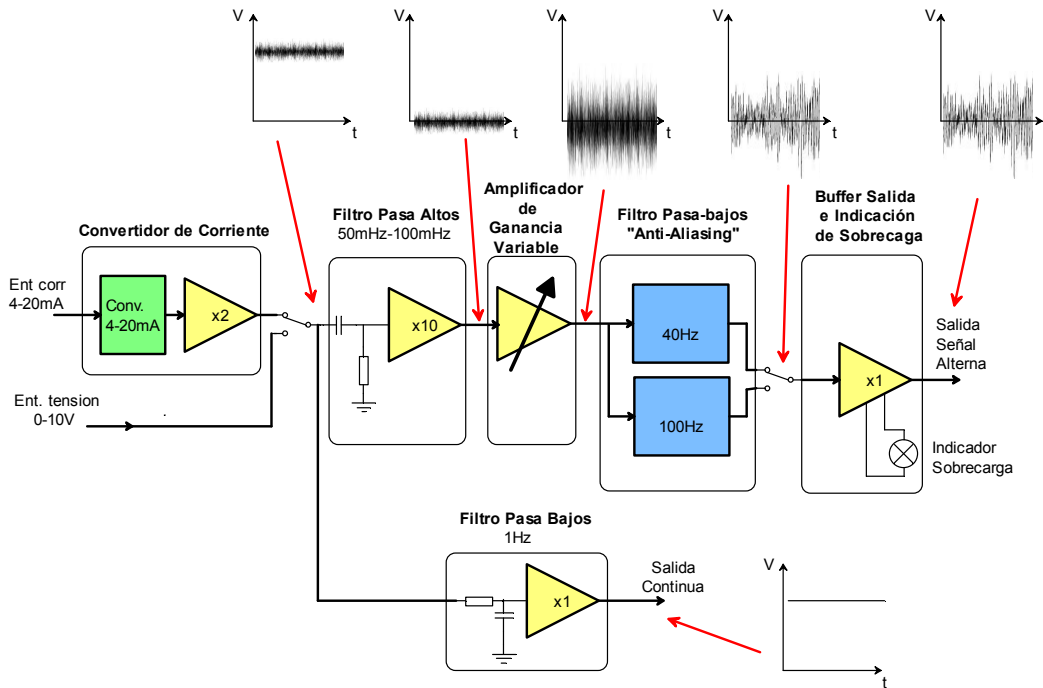
El módulo posee entradas de tensión y corriente con rangos máximos de 0 a 10V y 4 a 20mA respectivamente. La entrada de tensión le brinda flexibilidad al módulo además de facilitar los ensayos de funcionamiento. El sistema implementado en la CNA II utiliza únicamente la entrada de corriente por los motivos detallados en el capítulo anterior.

Cuenta con dos salidas: la salida de Señal de Ruido Neutrónico, con un rango de  $\pm 10V_{pico}$  y ancho de banda ajustable, y una salida auxiliar de tensión continua filtrada (frecuencia de corte superior 1Hz), que provee la información correspondiente al valor medio de flujo, y es utilizada por el sistema de adquisición para normalizar el espectro, independizándolo de la potencia del reactor.

La salida de señal de ruido neutrónico posee un filtro pasabajos denominado "anti-aliasing", de frecuencia de corte seleccionable en 40Hz o 100Hz, y una atenuación de 80dB/década.

Posee además, un indicador luminoso de sobrecarga que se enciende cuando la señal de salida de alterna supera los 10V pico. El objetivo del mismo es notificar al operador del sistema que esta salida se encuentra fuera del rango permitido del módulo debiéndose ajustar la ganancia y así evitar la distorsión de la señal, y/o posibles daños en la etapa de entrada del sistema de adquisición.

En la Fig. 3.1 se presenta el diagrama en bloques del módulo y la forma de onda de las señales presentes.



**Figura 3.1:** Diagrama en bloques del módulo y señales características de cada etapa.

### 3.2. Descripción Funcional de Cada Bloque.

#### 3.2.1. Convertidor de Corriente

Esta etapa recibe la señal de corriente, en el rango de 4 a 20mA, proveniente de los módulos separadores galvánicos y entrega en su salida una señal de tensión de 0 a 10V. La señal contendrá la componente de continua, proporcional al nivel de flujo neutrónico, y además la señal de alterna (ruido neutrónico). Ambas señales serán luego separadas, amplificadas y filtradas.

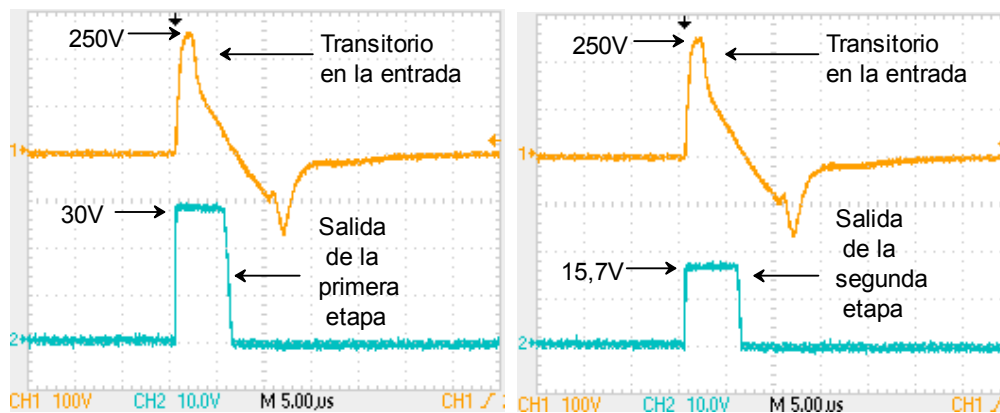
La conversión corriente - tensión la lleva a cabo el receptor de corriente RCV420 (U101), y su salida es amplificada por dos para obtener una salida de 0 a 10V con una corriente de entrada de 4 a 20mA.

Una parte muy importante de este bloque es la red de protección de entrada ya que esta se encuentra conectada al separador galvánico mediante un cable muy largo (ver capítulo previo), por lo tanto se diseñó un circuito de entrada capaz de soportar transitorios eléctricos en ráfagas  $\leq 250V$  pico y descargas electrostáticas  $\leq 2000V$  y así evitar daños en el módulo.

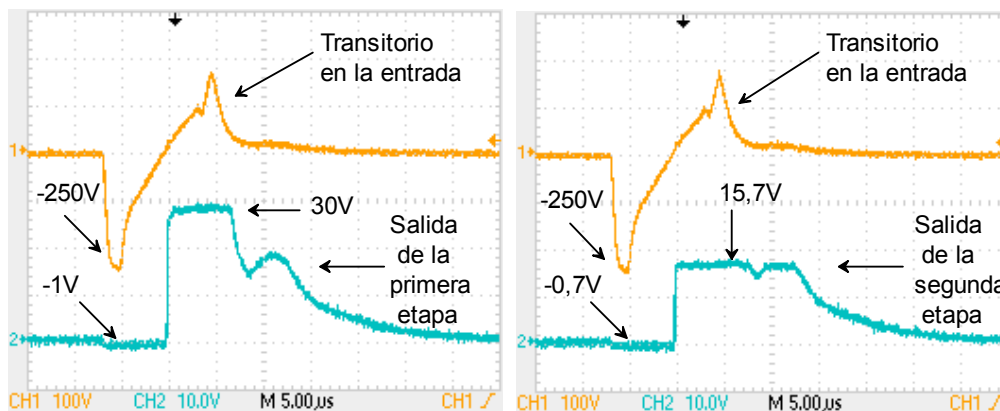
Esta red de protección actúa en dos etapas, la primera compuesta por un diodo supresor de transitorios unidireccional y una resistencia para transitorios (Surge Resistor) de  $22\Omega$ , limita el valor del pico del transitorio a 30V para pulsos de entrada positivos y -1V para pulsos negativos. Luego una segunda etapa compuesta por una resistencia de  $33\Omega$  y un juego de diodos limitan finalmente la excursión del transitorio a una tensión entre 15,7V y -0,7V en la entrada del RCV420, valores que son tolerados sin inconvenientes.

Para la verificación inicial del diseño, se utilizó un simulador de transitorios eléctricos que genera picos de 250V y con un ancho aproximado de  $7\mu\text{S}$ .

En la Fig. 3.2.1a y b se representa mediante la captura con osciloscopio, la señal aplicada a la entrada del circuito, y luego las señales en las etapas uno y dos de la red de protección. Dado que los transitorios pueden tener polaridad positiva o negativa el ensayo se realizó con pulsos de ambas polaridades.



**Figura 3.2.1a:** Ensayo de red de protección de entrada para transitorios positivos de 250V pico.

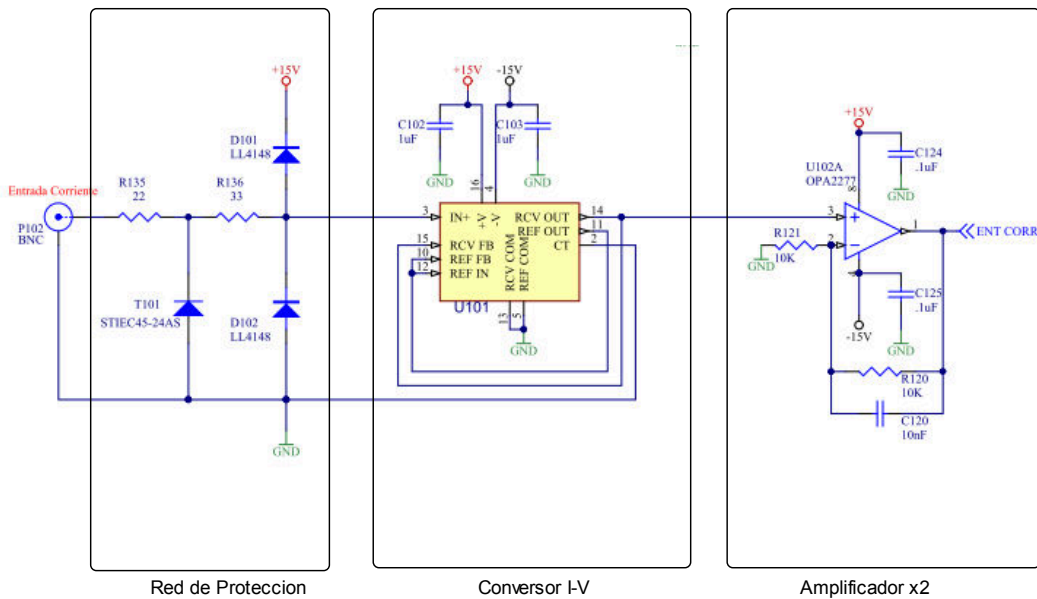


**Figura 3.2.1b:** Ensayo de red de protección de entrada para transitorios negativos de 250V pico.

Luego de verificado el diseño, el módulo completo se ensayó en los laboratorios de compatibilidad electromagnética LEDE de la Facultad de Ingeniería de Universidad de La Plata, para certificar que este no sufría deterioros al ser sometido a transitorios electromagnéticos y descargas electrostáticas.

El módulo también acepta una entrada directa de tensión de 0 a 10V, para mayor flexibilidad en el uso y facilitar los ensayos de funcionamiento en banco.

En la Fig. 3.2.1c se presenta el circuito esquemático de esta etapa, con la distinción de las distintas sub etapas que lo componen.

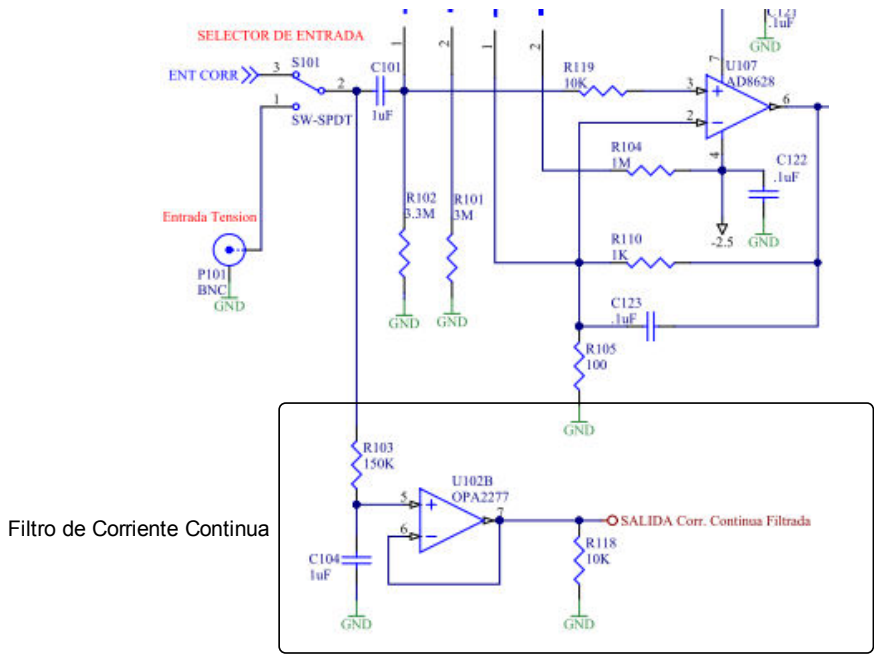


**Figura 3.2.1c:** Convertidor de Corriente y su red de protección.

### 3.2.2. Filtro Pasa Bajos de 1Hz para Salida de Corriente Continua

Aquí se separa la componente de continua de la señal (proporcional al valor medio de flujo), proveniente de alguna de las dos entradas del módulo.

Se hace uso de un filtro pasabajos de primer orden con frecuencia de corte de 1Hz y ganancia unitaria. La salida del filtro está disponible como la salida de continua del módulo y es la que utiliza el sistema de adquisición para realizar la normalización del espectro. En la Fig. 3.2.2 se presenta el diagrama esquemático de esta etapa.



**Figura 3.2.2:** Filtro Pasa Bajos de 1Hz para Salida de Continua.

### 3.2.3. Filtro Pasa Altos

Esta etapa es la responsable de extraer la componente de alterna (ruido neutrónico) de la señal de entrada para su posterior amplificación y filtrado.

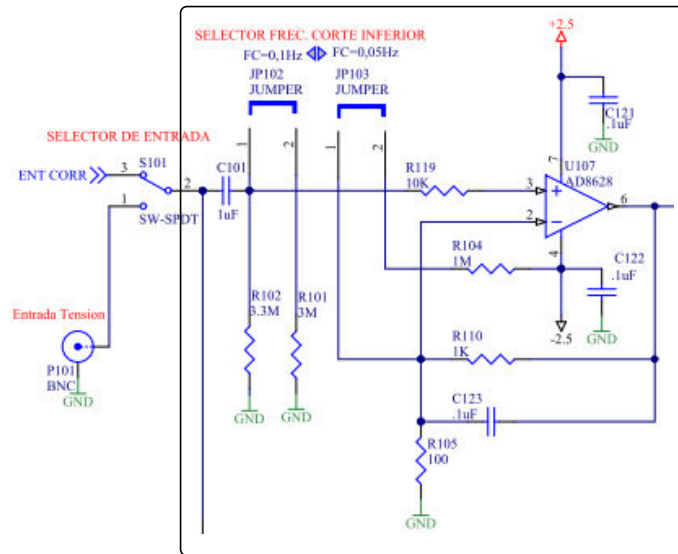
Para ello se utilizó un amplificador operacional (U107) de baja corriente de polarización con anulación automática de la tensión de desbalance de entrada (Offset Null), debido a que es un requisito minimizar la componente residual de tensión continua (Offset) en la señal, para evitar que a máxima ganancia, esta tensión le quite rango dinámico a la salida de alterna.

Dado que la diferencia entre los valores de tensión continua y de la señal alterna (ruido neutrónico) es del orden de 10.000 veces, el capacitor de filtro (C101) fue cuidadosamente seleccionado. Se utilizó uno con dieléctrico plástico de muy baja corriente de pérdida (resistencia de aislación superior 200GΩ), y de baja dispersión en su valor de capacidad (menos de 2%) dado que con ella se fija la frecuencia de corte del filtro pasa altos de primer orden.

La frecuencia de corte inferior de esta etapa, tiene dos valores configurables, 0,1 y 0,05Hz.

Además posee una ganancia aproximada de 10 veces y la frecuencia de corte superior es 1500Hz.

En la Fig. 3.2.3a se presenta el diagrama esquemático de esta etapa.



Filtro de Corriente Alterna

**Figura 3.2.3a:** Filtro Pasa Altos.

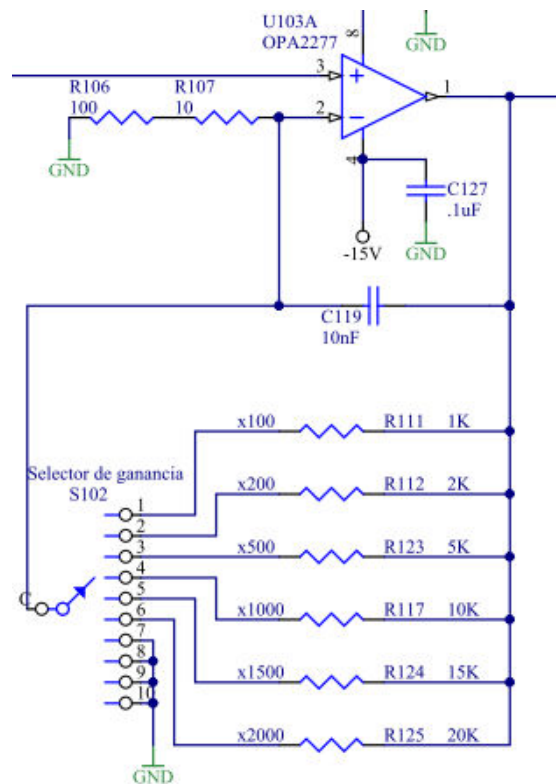
Dado que U107 requiere una tensión de alimentación que no supere los 5V, buena estabilidad, y bajo ruido, el módulo incorpora una fuente de alimentación interna adicional tipo shunt basada en la referencia TL431 (U108 y U109) para proveer los +/-2,5V necesarios para la alimentación de esta etapa.



**Figura 3.2.3b:** Fuente de Alimentación +/-2,5V para U107.

### 3.2.4. Amplificador de Ganancia Variable

Esta etapa realiza la amplificación final de la señal de alterna, pudiéndose ajustar su ganancia de 10 a 200 mediante una llave selectora, lo que representa una ganancia total de alterna ajustable de 100 a 2000 veces.



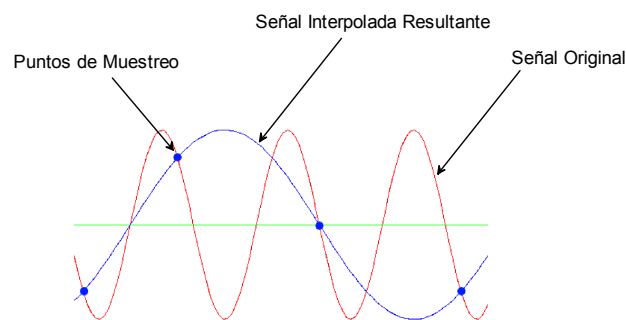
**Figura 3.2.4:** Amplificador de Ganancia Variable.

### 3.2.5. Filtro Pasa Bajos “Anti-Aliasing”

El efecto de aliasing o Efecto Nyquist es el fenómeno que surge del proceso de muestreo de señales analógicas, y como consecuencia de esto, señales de alta frecuencia se presentan como señales de baja frecuencia (frecuencias alias). El teorema de Nyquist fija como condición para la correcta reconstrucción de una señal, que la frecuencia de muestreo ( $f_s$ ) para digitalizar dicha señal de una frecuencia dada ( $f_{señal}$ ), debe ser al menos del doble de esta frecuencia ( $f_s = 2 \times f_{señal}$ ), o lo que sería equivalente a decir que el ancho de banda de adquisición, debe ser al menos el doble del ancho de banda de la señal a digitalizar.

El uso del filtro “Anti-Aliasing” previo a la digitalización es necesario ya que al discretizar una señal, aparece una réplica espectral de la misma desplazada a la frecuencia de muestreo y sus múltiplos. Sin el uso de estos filtros esta replica espectral puede mezclarse con las señales de interés.

En la Fig. 3.2.5a se representa el efecto de aliasing.



**Figura 3.2.5a:** Efecto de Aliasing.

Esta etapa por lo tanto se encarga del filtrado de la señal de alterna para adecuarla a los requisitos del sistema de adquisición (anti-aliasing), atenuando las componentes de frecuencia superior a la frecuencia de corte. Se cuenta con dos filtros separados, uno con frecuencia de corte superior de 100Hz, y otro con frecuencia de 40Hz.

Se optó por utilizar dos filtros separados, en lugar de un único filtro ya que esto último implicaría una llave de conmutación mucho más compleja y de este modo se optimizó el diseño de cada filtro para la frecuencia de corte elegida.

Dada la complejidad de estos filtros por los requisitos impuestos (planicidad, atenuación y facilidad para producción en serie), se utilizaron herramientas de simulación y diseño asistido de filtros por software (provisto por los fabricantes de semiconductores Texas Instruments y Analog Devices respectivamente). De este modo se logró obtener gran planicidad en la banda pasante, 80dB por década de atenuación y baja dispersión en las frecuencias de corte, todo esto utilizando componentes de valores comerciales y sin necesidad de ajustes posteriores al armado.

Ambos filtros tienen ganancia unitaria en la banda pasante.

El objetivo de tener dos frecuencias de corte ubicadas en 40Hz y 100Hz es evaluar la componente interferente de frecuencia de línea (50Hz) presente en el sistema.

La frecuencia de corte de 40Hz es el modo de operación normal, mientras que la frecuencia de corte de 100Hz se usa solo para evaluar la influencia de los 50Hz.

La razón por la cual el filtrado se realiza después del amplificador de ganancia variable es evitar la amplificación de la tensión de desbalance de entrada residual (Offset) que pudiese aparecer en las salidas de los filtros y evitar que la conmutación de la frecuencia de corte se realice con niveles bajos de señal (la llave de selección de frecuencia de corte superior se encuentra actualmente en la salidas de los filtros donde el nivel de señal es máximo).

Con esta configuración se obtiene un muy bajo nivel de continua residual en la salida de alterna del módulo. Por otra parte las señales no deseadas fuera de banda, provenientes de etapas anteriores, son suprimidas por la elevada atenuación de los filtros, minimizando las componentes más allá de la frecuencia de corte seleccionada (que podrían afectar la adquisición).

En la Fig. 3.2.5b se encuentra el diagrama esquemático de esta etapa, donde están presentados en la rama superior el filtro de 40Hz y en la parte inferior la rama correspondiente al filtro de 100Hz, además de la llave que selecciona una u otra rama.

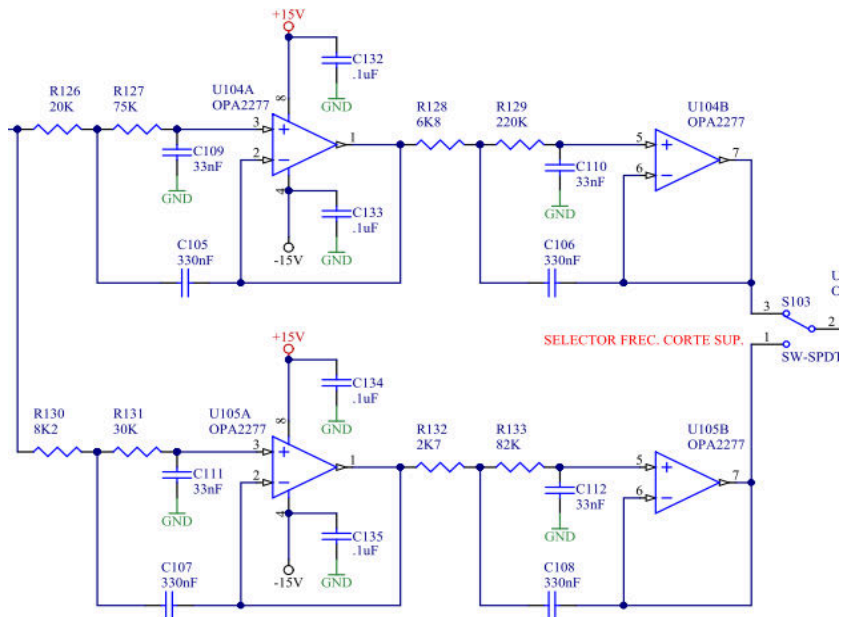


Figura 3.2.5b: Filtro Pasa Bajos “Anti-Aliasing”.

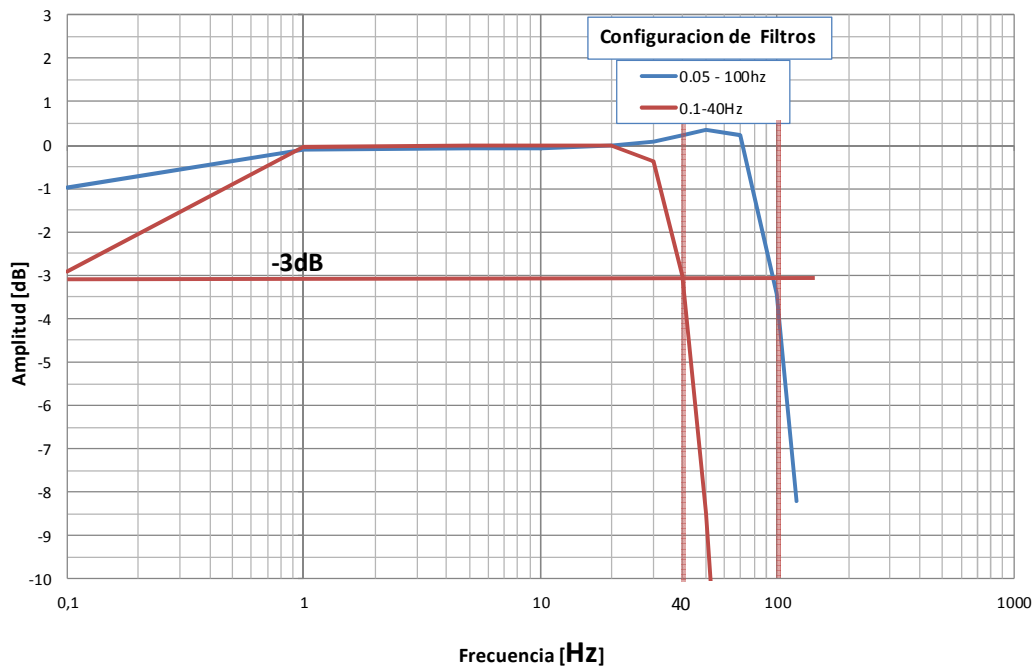


0.9106	0.7266	0.1
1.0094	1.0102	1
1.0117	1.0138	5
1.0122	1.0157	10
1.0208	1.0162	20
1.0313	0.9724	30
1.0479	0.7179	40
1.0614	0.3825	50
1.0473	0.1011	70
0.6877	0.0188	100
0.3973	0.0047	120
0.05 - 100hz	0.1-40Hz	Frec Med.
[Volts]	[Volts]	[Hz]

Ganancia x 1000  
 Modo entrada: Tension  
 Tension entrada: 1mVp

**Tabla 3.3:** Valores registrados de respuesta en frecuencia.

En la Fig. 3.3 se representa la respuesta en frecuencia del módulo con los valores obtenidos en la tabla 3.3.



**Figura 3.3:** Gráfico de respuesta en Frecuencia.

En el gráfico de respuesta en frecuencia se puede apreciar la planicidad de la banda pasante (ondulación <0,5dB), la atenuación del filtro “Anti-Aliasing” y la exactitud en las frecuencias de corte, esto sin necesidad de realizar ajustes en el circuito, lo que facilita la fabricación en serie y la puesta en marcha.

### 3.4. Mediciones en Planta.

Para realizar estas mediciones se aprovechó una parada programada de la planta. Se instaló en sala de instrumentación, un porta-módulos de prueba que incluía un Separador Galvánico y todos los módulos de instrumentación de planta que lo acompañan en operación normal para lograr la mayor aproximación a la condición real de trabajo.

Se conectó la entrada del Separador Galvánico, a un conjunto generador de pruebas para inyectar señales de amplitud y frecuencia conocidas, y del orden que tendrán las señales que existirán en operación normal.

En el recinto posterior a sala de control, se instaló un módulo Amplificador y Filtro, en el lugar donde operarán normalmente, con una fuente de alimentación dedicada, y una correcta puesta a tierra, punto clave para minimizar la interferencia de frecuencia de línea (50Hz).

Para la interconexión entre módulos, se utilizó uno de los cables del tipo par trenzado mallado ya tendidos en planta para el sistema de alerta temprana, con una longitud de aproximada de 60 metros.

La adquisición de señales se hizo con un osciloscopio digital de ancho de banda 60Mhz y haciendo uso de su función FFT (Transformada Rápida de Fourier).

En la Fig. 3.4 se muestra la conexión de equipos para la realización del ensayo en planta.

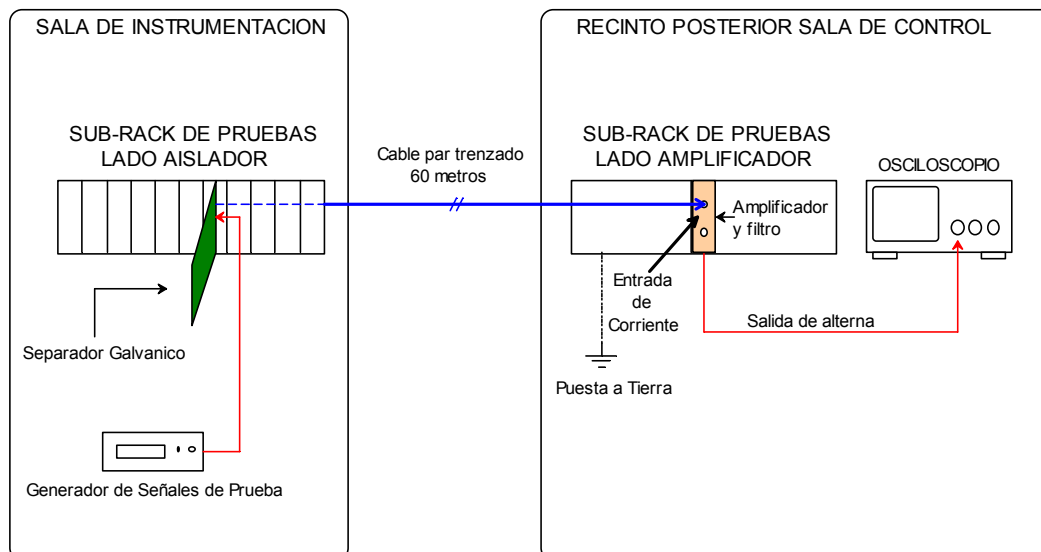


Figura 3.4: Conexión de equipos para ensayo en planta.

### 3.4.1. Condiciones generales de ensayo

- Conexión a tierra del lado amplificador (a chasis de armario)
- Ganancia del amplificador 2000
- Filtro pasa bajos en 40Hz
- Tensión de entrada continua al Separador Galvánico 9V (simula el valor de tensión de salida de los amplificadores de planta a plena potencia y garantiza que el lazo de corriente 4-20mA trabaje correctamente)

### 3.4.2. Señal de prueba senoidal de 1mVpp y 10Hz

Se inyectó para la prueba una señal senoidal de 1mV pico a pico y 10Hz a la entrada del Separador Galvánico.

En la Fig. 3.4.2a se observa la forma de onda obtenida a salida del Amplificador y Filtro. Se obtuvo como era de esperar una señal de 2V pico a pico (1mVpp x 2000) y 10Hz de frecuencia.

En la figura 3.4.2b, se presenta el espectro de frecuencias en la salida de alterna, haciendo uso de la función FFT del osciloscopio. Se observa una diferencia entre la señal transmitida y el piso de ruido de más de 40dB (100 veces) y entre la señal y la componente de frecuencia de línea (50Hz) de 30dB (32 veces).

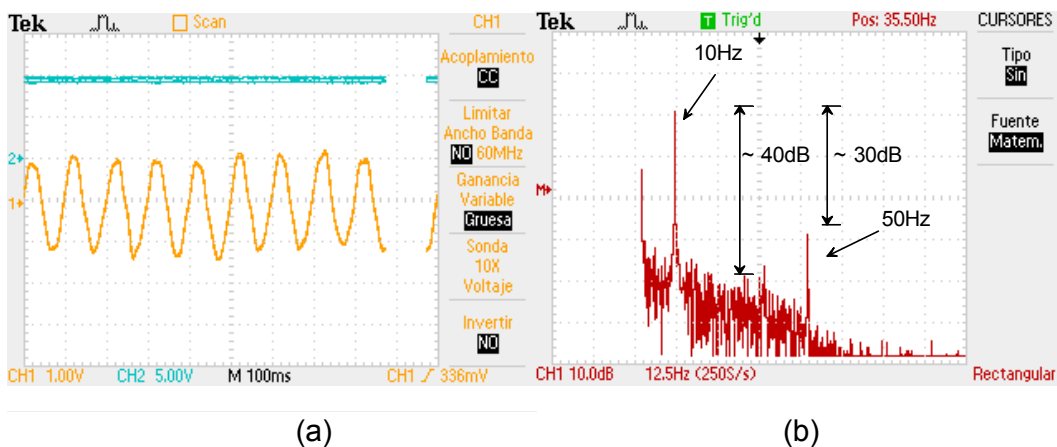
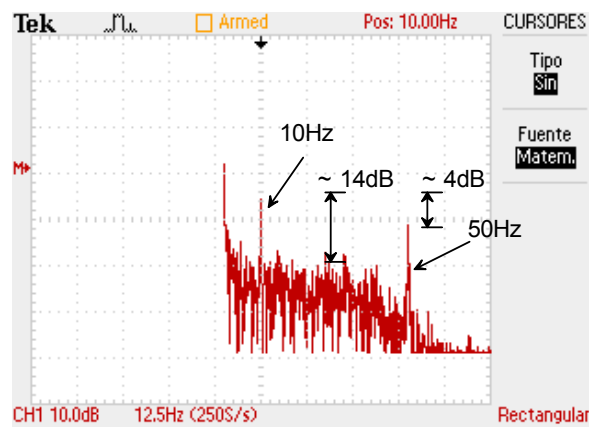


Figura 3.4.2 (a y b): Ensayo con 1mVpp y 10Hz.

### 3.4.3. Señal de prueba senoidal de 50 $\mu$ Vpp y 10Hz

Para esta prueba se inyectó una señal de 50 $\mu$ Vpp a la entrada del Separador Galvánico. El objetivo era evaluar si señales tan pequeñas podían aun detectarse. Para el análisis de la señal recuperada a la salida del módulo se utilizó el modo de FFT ya que con estos valores de señal se hace imposible una medición en el dominio temporal por quedar enmascarados por el ruido del sistema.

En la Fig. 3.4.3 se presenta el análisis espectral usando la función de FFT. Se puede observar una diferencia de 14dB (5 veces) entre la señal y el piso de ruido, y de aproximadamente 4dB (1,6 veces) entre la señal y la componente de 50Hz. Si se tiene en cuenta la atenuación del filtro anti-alias ubicado en 40Hz, se podría asumir que el “ripple” de 50Hz que ingresa al amplificador es entonces también del orden de las decenas de micro volts.



**Figura 3.4.3:** Ensayo para señal de 50  $\mu$ Vpp y 10Hz.

### 3.4.4. Señal de prueba senoidal de 200 $\mu$ Vpp y 3Hz

A pedido del personal de planta se realizó una prueba con una señal a la entrada del Separador Galvánico de 200 $\mu$ Vpp y una frecuencia de 3Hz. El objetivo era estudiar el comportamiento del sistema a una frecuencia inferior, y con un valor de amplitud cercano a las señales de los detectores tipo SPND. Al igual que en el ensayo previo solo se registró la medición usando la función de FFT por los motivos antes descriptos.

Se obtuvo como se muestra en la Fig. 3.4.4, una relación de 28dB (25 veces) entre la señal y el piso de ruido, y de 14dB (5 veces) entre la señal y el “ripple” de 50Hz (no representado en la imagen capturada).

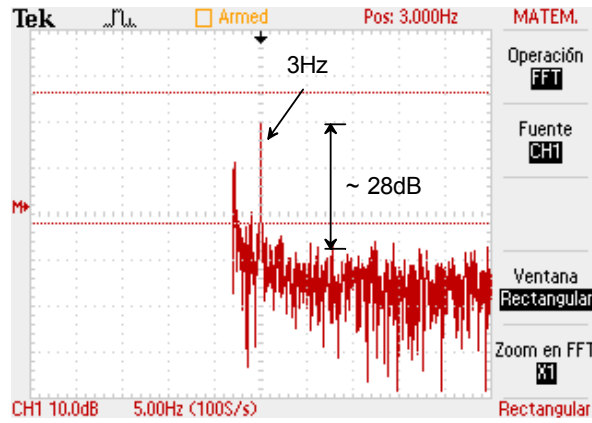


Figura 3.4.3: Ensayo para señal de 200  $\mu$ Vpp y 3Hz.

## CONCLUSIONES

Con posterioridad a la verificación del diseño con simulaciones de software, ensayos de los prototipos en laboratorio y pruebas en planta, se procedió a los ensayos de Tipo para la calificación como equipo de calidad nuclear, a saber:

- Ensayos de condiciones ambientales, tanto de almacenamiento como de operación.
- Ensayo de estabilidad a largo plazo.
- Ensayos de vibración e impacto (shock).
- Ensayos de compatibilidad electromagnética.

En todos estos ensayos, el equipo diseñado se comportó de manera satisfactoria.

Se inició luego la producción de 34 módulos, de los cuales 32 se encuentran actualmente operando en la CNA II como parte del sistema de alerta temprana, con excelentes resultados, y a la espera de la validación formal por parte del operador de la central (Núcleo Eléctrica Argentina S.A.). Los dos equipos restantes se encuentran almacenados para repuesto, o futuros ensayos.

Todos los equipos fueron sometidos a ensayos funcionales completos, para verificar que cada una de sus partes y funciones cumplan las especificaciones técnicas.

El sistema desarrollado por la Subgerencia de Instrumentación y Control de la CNEA, con ingeniería y producción nacional (a excepción de los componentes electrónicos), suplió una necesidad por parte del operador de la central originada en un requisito impuesto por la agencia regulatoria (ARN), a una fracción del costo de su contra parte importada (equipos Europeos).

## REFERENCIAS

- [1] S. Jaffar Shah, *Field Wiring and Noise Considerations for Analog Signals*, National Instruments, Application Note 025 (1992).
- [2] A. Carrera, R. de la Rosa, *Programmable Gain Amplifiers with DC Suppression and Low Output Offset for Bioelectric Sensors*, Universidad de Valladolid (2013).
- [3] P. W. Nicholson, *Nuclear Electronics*, John Wiley & Sons (1974).
- [4] IAEA, *Modern Instrumentation and Control for Nuclear Power Plants: A Guidebook*, TECHNICAL REPORTS SERIES No. 387 (1999)
- [5] D. Fry, J. March-Leuba, F. Sweeney, *Use of Neutron Noise for Diagnosis Of In-Vessel Anomalies in Light-Water Reactors*, Oak Ridge Nat. Lab. (1984).
- [6] Maxim Integrated Products, *Filter Basics: Anti-Aliasing*, Application Note 928 (2002).
- [7] G. Calleros, *Diseño conceptual de un Sistema de análisis de señales de flujo neutrónico para diagnosticar vibraciones mecánicas en la Central Laguna Verde*, Tesis de Maestría en Reactores Nucleares, CNEA-UTN FRBA (2001).
- [8] G. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, Third Edition, John Wiley & Sons (2000).
- [9] L. Marzano, *Memoria Descriptiva del Amplificador y Filtro de Ruido Neutrónico Mod. CNEA E070-A1*, CNEA MD-06Y-088 Rev. 0 (2016).
- [10] J. Zalcmán, *Guía de Pruebas y Ensayos para Equipos y Módulos destinados a instalaciones Nucleares*, CNEA IN-06Y-121 Rev.1 (2015).