

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE CIENCIAS



**CALIBRACIÓN DE LA POTENCIA TÉRMICA DEL  
REACTOR NUCLEAR RP-10 MEDIANTE LA TÉCNICA DE  
RUIDO NEUTRÓNICO A BAJA POTENCIA**

**PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN  
CIENCIAS EN FÍSICA**

PRESENTADA POR:

Paolo Giovanni Tataje Bazalar

ASESOR

Dr. Heriberto Abraham Sánchez Córdova

CO-ASESOR

Dr. Agustín Ricardo Zuñiga Gamarra

LIMA-PERÚ  
2021

*A mi querido hijo, Giovanni Tataje*

# Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que colaboraron directamente en el desarrollo de este trabajo de investigación:

Principalmente a mis padres, Liliana Bazalar y Luis Tataje, por su apoyo incondicional durante mi etapa de estudiante.

A mi compañera de vida Alexandra Mendoza, por su constante motivación en la continuación de los estudios de grado.

A mi asesor el Dr. Heriberto Sánchez, por su apoyo académico durante el transcurrir de esta tesis y por su motivación personal.

A mi co-asesor el Dr. Agustín Zuñiga, a mis compañeros de laboratorio el Ing. Juan Suica, el Mg. Gianfranco Huaccho y el Lic. Javier Quispe por compartir con mi persona los documentos requeridos y necesarios para la aplicación de esta técnica así como sus experiencias como profesionales.

A mi querido amigo el Mg. Alejandro Condori, por brindarme su valioso tiempo en aquellas interminables conversaciones sobre los aspectos técnicos del presente trabajo.

Al Laboratorio de Física Experimental de Reactores (LABFER) del Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), por considerarme como parte del laboratorio en la modalidad de investigador invitado.

Al Programa de Becas del Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (Fondecyt) bajo el contrato N° 167 FONDECYT-UNI, porque sin esta gran iniciativa el trabajo desarrollado no hubiera sido posible.

# Lista de abreviaturas

CIC: Cámara de Ionización Compensada

MRP: Modelo del Reactor Puntual

CM4: Cámara de Marcha 4

PSD: Densidad Espectral de Potencia (Power Spectral Density)

APSD: Autodensidad Espectral de Potencia (Auto Power Spectral Density)

CPSD: Densidad Espectral Cruzada de Potencia (Cross Power Spectral Density)

NAPSD: Autodensidad Espectral de Potencia Normalizada (Normalized Auto Power Spectral Density)

NCPSD: Densidad Espectral Cruzada de Potencia Normalizada (Normalized Cross Power Spectral Density)

DFT: Transformada Discreta de Fourier (Discrete Fourier Transform)

FFT: Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform)

IPEN: Instituto Peruano de Energía Nuclear

ADC: Conversor Análogo-Digital (Analog-to-Digital Converter)

PRE-PES: Puesta en Servicio Preliminar.

PES: Puesta en Servicio.

CNEA: Comisión Nacional de Energía Atómica.

# Índice de contenidos

Agradecimientos	ii
Lista de abreviaturas	iii
Índice de contenidos	iv
Índice de figuras	vii
Índice de tablas	ix
Resumen	x
Abstract	xi
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes . . . . .	2
1.2. Justificación . . . . .	2
1.3. Objetivos . . . . .	2
1.4. Planteamiento del Problema . . . . .	2
<b>2. Conceptos Matemáticos</b>	<b>3</b>
2.1. Introducción . . . . .	3
2.2. Señales de ruido . . . . .	3
2.2.1. Funciones aleatorias . . . . .	4
2.3. Teoría de análisis temporal . . . . .	4
2.3.1. Sistemas lineales invariantes en el tiempo . . . . .	4
2.3.2. Función impulso unitario . . . . .	5
2.3.3. Funciones de correlación . . . . .	6
2.4. Teoría de análisis frecuencial . . . . .	7
2.4.1. Transformada de Fourier . . . . .	7
2.4.2. Teorema de convolución . . . . .	7
2.4.3. Función de transferencia . . . . .	8
2.4.4. Contenido de energía y densidad de energía . . . . .	9
2.4.5. Contenido de potencia y densidad espectral de potencia (PSD) . . . . .	10
2.4.6. Transformada discreta de Fourier (DFT) . . . . .	11
<b>3. Conceptos Físicos</b>	<b>12</b>
3.1. Introducción . . . . .	12
3.2. Principios de un reactor nuclear . . . . .	12

3.3.	Modelo del reactor puntual (MRP)	13
3.4.	Cinética puntual	13
3.4.1.	Definición de los parámetros cinéticos	14
3.5.	Fundamentos de ruido neutrónico	16
<b>4.</b>	<b>Descripción y Medidas de Calidad del Sistema de Medición</b>	<b>22</b>
4.1.	Introducción	22
4.2.	Sistema de medición	22
4.2.1.	Cámara de ionización compensada (CIC)	22
4.2.2.	Fuentes de alto voltaje	24
4.2.3.	Convertor corriente-voltaje	24
4.2.4.	Filtro de la componente continua	24
4.2.5.	Amplificador de fluctuaciones	24
4.2.6.	Filtro anti-aliasing	24
4.2.7.	Convertor análogo-digital (ADC)	25
4.3.	Medición de calidad de las CIC	25
4.3.1.	Medición de la resistencia de aislamiento	25
4.3.2.	Medición de corriente propia	27
<b>5.</b>	<b>Obtención de Ruido Neutrónico</b>	<b>29</b>
5.1.	Introducción	29
5.2.	Selección de la zona de irradiación	29
5.3.	Medición y obtención de ruido neutrónico	30
<b>6.</b>	<b>Algoritmo para el Procesado de Ruido Neutrónico</b>	<b>35</b>
6.1.	Introducción	35
6.2.	Uso de Python	35
6.3.	Fundamento físico del procesado de ruido neutrónico	35
6.4.	Conformación del algoritmo	36
6.4.1.	Principal.py	36
6.4.2.	Minimos.py	38
6.4.3.	Gauss.py	40
6.5.	Descripción del algoritmo elaborado	43
<b>7.</b>	<b>Resultados y Análisis</b>	<b>46</b>
7.1.	Introducción	46
7.2.	Resultados para el núcleo número 48	46
7.2.1.	PRE-PES-5	46
7.3.	Análisis de los resultados del núcleo número 48	56
7.4.	Resultados para el núcleo número 8	57
7.5.	Análisis de los resultados del núcleo número 8	65
<b>8.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>66</b>
8.1.	Recomendaciones	67
8.2.	Trabajos futuros	68
<b>A.</b>	<b>Demostración matemática del contenido de energía</b>	<b>69</b>

<b>B. Demostración de las ecuaciones de la cinética puntual</b>	<b>70</b>
B.1. Balance de la población instantánea . . . . .	70
B.2. Balance de la población tardía . . . . .	71
B.3. Balance de la densidad neutrónica . . . . .	71
B.4. Balance de la concentración de precursores . . . . .	72
<b>C. Demostración de los parámetros nucleares involucrados</b>	<b>73</b>
C.1. Fluctuación de la densidad neutrónica normalizada . . . . .	73
C.2. Relación entre el parámetro A y la tasa de fisiones . . . . .	74
<b>D. Análisis de las incertidumbres</b>	<b>76</b>
D.1. Desviación estándar experimental . . . . .	76
D.2. Propagación de errores . . . . .	77
D.2.1. Propagación de errores en funciones de única variable . . . . .	77
D.2.2. Propagación de errores en función de varias variables . . . . .	77
D.3. Promedio ponderado . . . . .	79
<b>Bibliografía</b>	<b>80</b>

# Índice de figuras

2.1. Señal continua acompañada de ruido. . . . .	4
2.2. Descripción gráfica de los sistemas lineales. . . . .	5
2.3. Función impulso unitario. . . . .	6
2.4. Función de transferencia. . . . .	8
2.5. Condiciones de la definición de PSD. . . . .	10
4.1. Estructura interior de la CIC. . . . .	23
4.2. CIC del Laboratorio de Física Experimental de Reactores - IPEN. . . . .	24
4.3. Esquema de la cadena de medición. . . . .	25
4.4. Configuración para medición de aislamiento de la CIC. . . . .	26
4.5. Configuración para medición de corriente propia de la CIC. . . . .	27
5.1. Disposición de la boca de tanque del reactor nuclear RP-10. . . . .	29
5.2. Configuración del núcleo número 48. . . . .	30
5.3. Configuración del núcleo número 8. . . . .	30
5.4. Disposición esperada de las CIC PRE-PES-5. . . . .	31
5.5. Disposición real de las CIC PRE-PES-5. . . . .	31
5.6. Configuración esperada del sistema de medición. . . . .	32
5.7. Configuración real del sistema de medición. . . . .	32
5.8. Gráfica de datos del archivo S02-4-1.RUI. . . . .	33
6.1. Ventana Principal. . . . .	37
6.2. Ventana secundaria de los parámetros nucleares. . . . .	37
6.3. Ajuste a la curva experimental. . . . .	38
6.4. Ejemplo de ajuste por módulo Minimos.py. . . . .	40
6.5. Gráfica de ajuste por el módulo Minimos.py. . . . .	40
6.6. Ejemplo de ajuste por el módulo Gauss.py. . . . .	42
6.7. Gráfica de ajuste por módulo Gauss.py. . . . .	43
6.8. Diagrama de flujo del algoritmo elaborado. . . . .	44
6.9. Archivo <i>S05-N1-1.LBF</i> . . . . .	45
7.1. Ajuste de la Potencia (W) vs CIC 1 (A) (PRE-PES-5). . . . .	49
7.2. Ajuste de la Potencia (W) vs CIC 2 (A) (PRE-PES-5). . . . .	50
7.3. Ajuste de la Potencia (W) vs CM4 (A) (PRE-PES-5). . . . .	51
7.4. Ajuste de la CIC (A) vs CM4 (PRE-PES-5). . . . .	52
7.5. Ajuste $f^{(q)}$ (C) vs CIC 1 (A) (PRE-PES-5). . . . .	54
7.6. Ajuste $f^{(q)}$ (C) vs CIC 2 (A) (PRE-PES-5). . . . .	54
7.7. Estimaciones de $\alpha_I$ para diferentes potencias (PRE-PES-5). . . . .	55
7.8. Ponderación del $\alpha_I$ (PRE-PES-5). . . . .	56
7.9. Potencia (W) vs CIC (A) (PES) . . . . .	59

7.10. Ajuste de la CIC (A) vs CM4 (A) (PES). . . . .	60
7.11. Ajuste de la Potencia (W) vs CM4 (A) (PES). . . . .	61
7.12. Ajuste de los valores de $f^{(q)}$ (C) vs CIC (A). . . . .	63
7.13. Valores de $\alpha_I$ (1/s) vs Potencia (W) (PES). . . . .	64
7.14. Valores ponderados de $\alpha_I$ (1/s) vs Potencia (W) (PES). . . . .	64

# Índice de tablas

4.1. Resistencia de aislamiento antes del mantenimiento. . . . .	26
4.2. Resistencia de aislamiento después del mantenimiento. . . . .	27
4.3. Mediciones de corriente propia. . . . .	28
7.1. Mediciones PRE-PES-5 con algoritmo elaborado. . . . .	47
7.2. Mediciones PRE-PES-5 con FERCIN-3. . . . .	48
7.3. Potencia (W) vs CIC 1 (A) (PRE-PES-5) . . . . .	48
7.4. Potencia (W) vs CIC 2 (A) (PRE-PES-5) . . . . .	49
7.5. Potencia (W) vs CM4 (A) (PRE-PES-5) . . . . .	50
7.6. CM4 (A) vs CIC 1 (A) $\wedge$ CIC 2 (A) (PRE-PES-5) . . . . .	51
7.7. Factor de calibración del CM4 (PRE-PES-5) . . . . .	52
7.8. $f^{(q)}$ (C) vs CIC 1 (A) (PRE-PES-5) . . . . .	53
7.9. $f^{(q)}$ (C) vs CIC 2 (A) (PRE-PES-5) . . . . .	53
7.10. Estimación de la constante $\alpha_I$ (PRE-PES-5). . . . .	55
7.11. Ponderaciones de la constante $\alpha_I$ (PRE-PES-5) . . . . .	56
7.12. Análisis de resultados de potencia térmica (PRE-PES) . . . . .	56
7.13. Análisis de resultados de la constante $\alpha_I$ (PRE-PES) . . . . .	57
7.14. Mediciones PES con Algoritmo. . . . .	58
7.15. Potencia (W) vs CIC (A) (PES) . . . . .	59
7.16. CM4 (A) vs CIC (A) . . . . .	60
7.17. Potencia (W) vs CM4 (A) (PES) . . . . .	61
7.18. Factor de calibración del CM4 (PES) . . . . .	62
7.19. $f^{(q)}$ (C) vs CIC (A) (PES) . . . . .	62
7.20. Estimación de la constante $\alpha_I$ (PES). . . . .	63
7.21. Ponderación de la constante $\alpha_I$ (PES). . . . .	65

# Resumen

El trabajo realizado tiene como objetivo calibrar en potencia térmica el núcleo del reactor nuclear peruano RP-10 mediante la técnica de ruido neutrónico, que utiliza la estimación de parámetros cinéticos hallados experimentalmente. El desarrollo de esta actividad se llevó a cabo durante el plan de arranque de la puesta en servicio del nuevo núcleo del RP-10.

Para ello, se utilizaron dos cámaras de ionización compensadas (CIC) en posiciones estratégicas dentro del reactor, con la finalidad de obtener en cada una de las CIC, la intensidad de corriente que genera la detección de neutrones. Las mediciones se realizaron en dos grupos diferentes llamados PRE-PES y PES, donde el primer grupo se llevó a cabo con la finalidad de encontrar características asociadas entre la estimación de la potencia térmica y el flujo neutrónico térmico en la posición de la CIC. Mientras que el segundo grupo de mediciones se hizo para calibrar el CM4 de la nueva configuración nuclear.

De forma paralela, se desarrolló un algoritmo con una interfaz gráfica en Python 3.7. Este algoritmo permitió el rápido procesamiento de los archivos obtenidos experimentalmente y por lo tanto una óptima calibración, los resultados obtenidos mediante el algoritmo que desarrollamos fueron comparados con los resultados obtenidos usando el programa FERCIN-3, validado por la CNEA, y también fueron validados mediante balance térmico, que es otra de las técnicas de medición utilizadas para la medición de la potencia térmica.

De forma complementaria a la calibración, se pudo obtener la constante de decaimiento de los neutrones instantáneos ( $\alpha_I$ ), variable fundamental en la operación segura del reactor. Así como también se pudo observar su variación en un estado subcrítico del mismo.

**Palabras clave:** TÉCNICA DE RUIDO NEUTRÓNICO, CÁMARAS DE IONIZACIÓN COMPENZADAS, POTENCIA TÉRMICA, PYTHON, CÁMARA DE MARCHA 4, CONSTANTE DE DECAIMIENTO DE LOS NEUTRONES INSTANTÁNEOS

# Abstract

The work done has as purpose the calibration in power the core of peruvian nuclear reactor RP-10 using the neutron noise technique, by means of estimation of certain nuclear parameters found experimentally. The development of this activity was conducted during the start-up of the implementation plan in service of the new core of the RP-10.

For this, it used two compensated ionization chambers in strategic positions within the reactor, with the purpose of obtaining in each one of the CIC, the current intensity generated by the detected neutrons. Measurements were made in two different groups called PRE-PES and PES, where the first was carried out in order to find associated characteristics between the estimation of thermal power and thermal neutron flux at the position of the CIC. While the second fulfills the function of calibrating the CM4 of the new nuclear configuration.

At the same time, an algorithm was developed with a graphical interface in Python 3.7. This algorithm allowed the rapid processing of files obtained experimentally and therefore an optimal calibration, which was compared with a program validated by CNEA called FERCIN-3 and later also validated with another thermal power measurement technique called thermal balance.

As a complement to the calibration, it was possible to obtain the decay constant of the prompt neutrons ( $\alpha_I$ ), a fundamental variable in the safe operation of the reactor. Moreover, it was also possible to observe its variation in a sub-critical state of the reactor.

**Keywords:** NEUTRON NOISE TECHNIQUE, COMPENSATED IONIZATION CHAMBERS, THERMAL POWER, PYTHON, CHAMBER CHANNEL 4, DECAY CONSTANT OF THE PROMPT NEUTRONS

# Capítulo 1

## Introducción

Todas las mediciones que se realizan presentan una componente de ruido, la cual usualmente no es tomada en consideración puesto que el ruido no contribuye a la descripción del sistema medido.

Sin embargo, como es bien sabido, el ruido de una señal contiene información sobre los procesos que ocurren en el sistema. Es por esto que analizar el ruido permite abordar problemas determinados. Encontrándose aplicaciones en medicina, economía, industria química y en los reactores nucleares [1].

En el caso de los reactores nucleares las aplicaciones van desde la vigilancia y monitorización de sensores [1] hasta la estimación de variables fundamentales asociadas a la seguridad del reactor nuclear.

Esta técnica es una herramienta ampliamente utilizada para la estimación de parámetros cinéticos, como lo son: la constante de decaimiento de los neutrones instantáneos ( $\alpha_I$ ), la fracción efectiva de neutrones tardíos ( $\beta_{ef}$ ) y la tasa de fisiones [2] , [3]. Asimismo, se puede estimar el correcto funcionamiento de la cámara de ionización utilizada en la medición ( $f^{(q)}$ ) y la eficiencia de la misma ( $\varepsilon$ ) [4].

Para nuestro caso en particular, buscamos estimar la potencia térmica del reactor mediante la tasa de fisiones. Para ello se deben cumplir ciertas condiciones, que según [4] son :

- i La fluctuación de la densidad de fisiones debe ser la fuente dominante de la parte correlacionada del ruido neutrónico. Esta condición se cumple midiendo a potencias bajas ( $< 10$  kW).
- ii La medición se debe realizar simultáneamente con dos detectores, esto es para aumentar la precisión de la misma y evitar la dependencia espacial producto de la posición de las barras de control.
- iii La eficiencia ( $\varepsilon$ ) debe estar en el siguiente intervalo  $\beta_{ef}^2 \leq \varepsilon \leq 10^{-3}$ , donde para el RP-10  $\beta_{ef} \approx 0,0079185$  [5]. Esta condición se cumple ubicando los detectores cerca del núcleo.

## 1.1. Antecedentes

- Cambio del núcleo y su configuración dentro del reactor RP-10. El cambio se dio en la matriz del combustible desde Óxido de Uranio ( $U_3O_8$ ) a Siliciuro ( $U_3Si_2$ )
- La puesta en servicio del nuevo núcleo.

## 1.2. Justificación

- Calcular la potencia térmica del reactor con precisión es de suma importancia para la operación segura de este.
- La exactitud de estos cálculos permitirá que otras mediciones dependientes de la potencia presenten reducida incertidumbre.
- Es importante que el estado peruano como país que aplica la tecnología nuclear, maneje sus propios recursos intelectuales y como consecuencia permita la generación de nuevo conocimiento.

## 1.3. Objetivos

- Utilizar la técnica de ruido neutrónico para estimar la potencia térmica del reactor nuclear mediante los datos medidos de corriente en las cámaras de ionización compensadas introducidas en el reactor y al mismo tiempo estimar la constante  $\alpha_I$ .
- Elaborar un programa de procesamiento que le facilite al usuario realizar la estimación de potencia térmica.
- Calibrar en potencia la cámara de marcha 4 (CM4) correspondiente al reactor nuclear, considerando que la CM4 se toma como referencia al fijar la potencia de operación.

## 1.4. Planteamiento del Problema

Cada vez que se realiza una modificación en el núcleo del reactor esto conlleva a una nueva calibración en potencia térmica de la cámara de marcha 4 (CM4). El cambio de combustible no es exento a esto, por el contrario, es de mayor importancia dada su condición de nuevo.

Por otro lado, el reactor nuclear RP-10 no dispone de un programa de cálculo de potencia térmica por ruido neutrónico de elaboración propia, motivo por el cual en el presente trabajo se buscó la elaboración del mismo.

# Capítulo 2

## Conceptos Matemáticos

### 2.1. Introducción

Las señales físicas en general presentan propiedades temporales y a su vez se encuentran conformadas por componentes de diversas frecuencias [1], éstas propiedades son las que nos brindan esencialmente la información característica del sistema analizado.

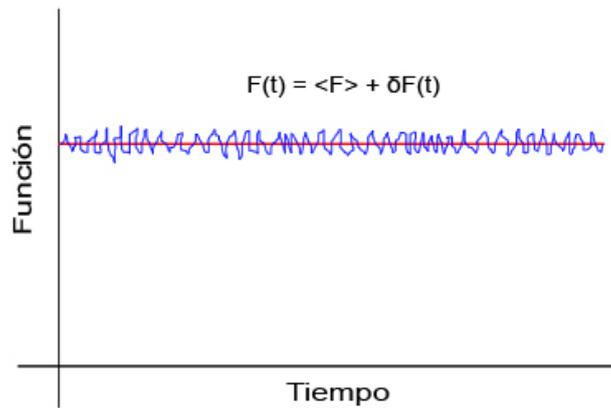
Por lo tanto, las señales de ruido pueden ser analizadas desde un punto de vista temporal o frecuencial [6], generalmente se separan los análisis en sus correspondientes dominios para un mejor procesamiento.

En términos generales todas las mediciones físicas que se realizan presentan una componente continua, que puede ser representada analíticamente mediante una función, y una aleatoria o discreta, que obedece a las herramientas estadísticas, la cual es la que denominamos ruido; usualmente se busca obtener una señal lo más limpia de ruido posible [7].

Sin embargo, se sabe que el ruido contiene información característica propia de los sucesos que tienen lugar en el sistema [1], lo cual será aprovechado en este trabajo para estimar la tasa de fisiones que se generan al poner en funcionamiento el reactor en diferentes potencias. Para llevar a cabo con éxito el presente trabajo debemos fortalecer los fundamentos matemáticos utilizados.

### 2.2. Señales de ruido

Como se mencionó, las señales pueden describir una amplia variedad de fenómenos físicos [7]. Sin embargo, durante una medición se ven involucradas señales continuas y aleatorias, siendo esta última la llamada ruido. Esto puede ser mejor apreciado en la -Figura 2.1-.



**Figura 2.1:** Señal continua acompañada de ruido.

Estas señales de ruido en su gran mayoría son indeseadas y suelen ser filtradas. No obstante, para el desarrollo de esta tesis, estas señales de ruido corresponden a la esencia del trabajo.

Las señales de ruido no se pueden describir analíticamente. Por lo tanto, cuando se les desea analizar se procede a obtener solo el ruido, lo cual se logra mediante el filtrado de la señal continua.

Estas mediciones, generalmente, consisten en registros de una duración total  $T$  conformadas por  $N$  muestras, tomadas en un intervalo de tiempo  $\Delta t$  llamado tiempo de muestreo. La inversa de este tiempo de muestreo es la frecuencia de muestreo ( $F_S = \frac{1}{\Delta t}$ ). Es importante saber que cuanto más detalle se desee obtener de la señal, mayor ha de ser la frecuencia de muestreo [1].

### 2.2.1. Funciones aleatorias

Existen diversos tipos de señales cuya evolución no se puede predecir en el tiempo, es decir que no presentan un patrón definido, como el ruido para nuestro caso en específico [6]. Sin embargo, mediante el análisis temporal o frecuencial (según corresponda) se pueden obtener resultados determinados que permitan un mejor entendimiento de estas señales. Por ejemplo, mediante el análisis temporal (funciones de correlación) podremos saber si dos señales tienen como origen un mismo sistema. Mientras que por el análisis frecuencial podremos aprovechar las propiedades estadísticas (transformada de Fourier) que simplifican las ecuaciones obtenidas en el dominio temporal.

Para una mejor comprensión se desarrollan a continuación la teoría de análisis temporal (dominio del tiempo) y la teoría de análisis frecuencial (dominio de la frecuencia).

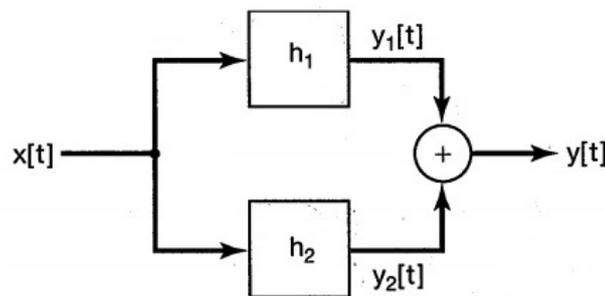
## 2.3. Teoría de análisis temporal

### 2.3.1. Sistemas lineales invariantes en el tiempo

Para poder definir este apartado, comenzaremos introduciendo el significado de invariancia en el tiempo y linealidad.

- **Invariancia en el tiempo** Se hace referencia a un sistema cuyo comportamiento y características se mantienen fijos en el tiempo [7].
- **Linealidad** Un sistema lineal es el que posee la propiedad de superposición, es decir que si una entrada al sistema está conformado por la suma de varias señales, entonces obtendremos a la salida del mismo la suma de cada una de las respuestas del sistema a las señales [7].

De forma general un sistema lineal invariante en el tiempo puede definirse como un proceso por el cual las señales de entrada son transformadas por el sistema [1], obedeciendo este a la propiedad de superposición y manteniéndose invariable en el tiempo. En la -Figura 2.2- se puede apreciar la descripción gráfica de un sistema lineal.



**Figura 2.2:** Descripción gráfica de los sistemas lineales.[7]

La linealidad de un sistema puede ser expresada matemáticamente de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 y_1[t] &= h_1 x[t] \\
 y_2[t] &= h_2 x[t] \\
 y[t] &= y_1[t] + y_2[t] = (h_1 + h_2)x[t]
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Por otro lado, un sistema es considerado invariante en el tiempo si su respuesta no depende del momento en el que es excitado [1], [7]. Formalmente se expresa:

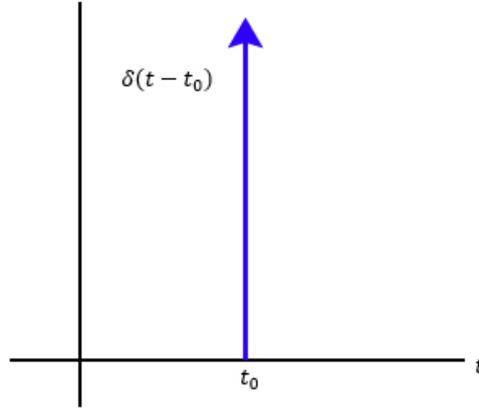
$$y[t] = (h_1 + h_2)x[t] \Rightarrow y[t - t_0] = (h_1 + h_2)x[t - t_0]
 \tag{2.2}$$

Los sistemas que cumplen las dos condiciones mencionadas anteriormente (-Ecuación 2.1- , -Ecuación 2.2- ) son denominados sistemas lineales invariantes en el tiempo. Siendo, generalmente, el análisis de ruido uno de ellos [1].

### 2.3.2. Función impulso unitario

Llamada también función Delta de Dirac, este arreglo matemático permite describir sistemas de resultados muy intensos cuyo actuar en el tiempo es sumamente pequeño, como se muestra en la -Figura 2.3-. Matemáticamente se generaliza de la siguiente manera:

$$\delta(t - t_0) = \begin{cases} \infty & \text{si } t = t_0 \\ 0 & \text{si } t \neq t_0 \end{cases}$$



**Figura 2.3:** Función impulso unitario.

A continuación se describen dos propiedades de esta función:

$$\int_0^{\infty} \delta(t - t_0) dt = 1 \quad (2.3)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} x(t)\delta(t - \tau) dt = x(\tau) \quad (2.4)$$

Discretizando las ecuaciones anteriores, tenemos:

$$\sum_{\kappa=0}^{\infty} \delta[n - \kappa] = 1 \quad (2.5)$$

$$\sum_{\kappa=-\infty}^{\infty} x[\kappa]\delta[n - \kappa] = x[n] \quad (2.6)$$

### 2.3.3. Funciones de correlación

Las funciones de correlación expresan matemáticamente el vínculo entre dos funciones que en principio, son de orígenes distintos. Se representan mediante las dos siguientes ecuaciones:

$$\bar{\phi}_{12}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x_1(\tau)x_2(t - \tau)d\tau \quad (2.7)$$

$$\phi_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x_1(\tau)x_2(t - \tau)d\tau \quad (2.8)$$

La primera ecuación se utiliza para funciones continuas, mientras que la segunda se utiliza para funciones que son nulas en la mayor parte del tiempo pero en pequeños diferenciales de tiempo presenta alguna componente (pulsos, ráfagas, etc.) [6]. Por otro lado, si las funciones correlacionadas son las mismas esto se denomina autocorrelación, mientras que si son diferentes hablamos de una correlación cruzada.

Algunas características sustanciales de una señal no son observables en el dominio del tiempo, por tal motivo es conveniente trabajarlas en el dominio frecuencial donde

sí se pueden obtener estas características. Para intereses del trabajo introduciremos algunos conceptos.

## 2.4. Teoría de análisis frecuencial

### 2.4.1. Transformada de Fourier

Considerando la función  $g(t)$  (en el dominio del tiempo) la transformada de Fourier se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$G(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t)e^{-i\omega t} dt \quad (2.9)$$

Esta operación usualmente se denota con la letra  $\mathcal{F}$ , representando la transformada de Fourier de la siguiente forma:

$$\mathcal{F}\{g(t)\} = G(\omega)$$

De igual manera se define la transformada inversa de Fourier como:

$$g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega)e^{i\omega t} d\omega \quad (2.10)$$

De forma análoga a la -Ecuación 2.9- la operación de la transformada inversa de Fourier generalmente se denota por  $\mathcal{F}^{-1}$  [6] :

$$\mathcal{F}^{-1}\{G(\omega)\} = g(t)$$

### 2.4.2. Teorema de convolución

Este teorema permite obtener la respuesta temporal de un sistema si se conoce su respuesta  $h(t)$  cuando la entrada es el impulso unitario  $\delta(t)$ . Es decir, matemáticamente:

$$\mathcal{F}\{h(t)\} = H(\omega)\mathcal{F}\{\delta(t)\}$$

Se sabe que la transformada de Fourier del impulso unitario con  $t_0 = 0$  resulta la unidad. Por lo tanto:

$$\mathcal{F}\{h(t)\} = H(\omega)(1) = H(\omega)$$

Por otro lado, si las señales de entrada y salida del sistema son  $x(t)$  y  $y(t)$  respectivamente, la salida en el dominio frecuencial puede expresarse como:

$$Y(\omega) = H(\omega)X(\omega) \quad (2.11)$$

Podemos encontrar  $y(t)$  directamente a partir de  $x(t)$  y del impulso  $h(t)$ , mediante la siguiente ecuación.

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)x(t - \tau)d\tau = h(t) * x(t) \quad (2.12)$$

Lo representado anteriormente se denomina *producto de convolución* entre  $h(t)$  y  $x(t)$ , operación realizada en el dominio temporal. Tomando la transformada de Fourier de

la -Ecuación 2.12- y utilizando la -Ecuación 2.11-.

$$\mathcal{F}\{y(t)\} = \mathcal{F}\{h(t) * x(t)\} = H(\omega)X(\omega) = \mathcal{F}\{h(t)\} \mathcal{F}\{x(t)\} \quad (2.13)$$

De la ecuación anterior notamos que la transformada de Fourier de un producto de convolución es igual al producto de sus transformadas. Formalmente [6]:

$$\mathcal{F}\{h(t) * x(t)\} = \mathcal{F}\{h(t)\} \mathcal{F}\{x(t)\} \quad (2.14)$$

### 2.4.3. Función de transferencia

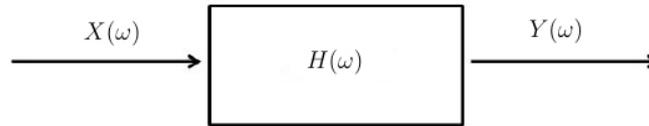
Como se visualizó en el anterior apartado hay una relación entre la señal de salida y la señal de entrada en el dominio frecuencial, matemáticamente:

$$Y(\omega) = H(\omega)X(\omega)$$

Despejando  $H(\omega)$ , obtenemos:

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} \quad (2.15)$$

Siendo esta la función de transferencia, la cual es característica para cada sistema. La representación gráfica se muestra en la -Figura 2.4-.



**Figura 2.4:** Función de transferencia. [1]

Una definición más rigurosa que nos da una idea generalizada de la expresión de una función de transferencia, es aquella donde se considera un sistema lineal cuya señal de entrada es  $x(t)$ , con señal de salida  $y(t)$  y con la siguiente ecuación diferencial que rige el sistema lineal:

$$a_n \frac{d^n x(t)}{dt^n} + \dots + a_1 \frac{dx(t)}{dt} + a_0 x(t) = b_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + \dots + b_1 \frac{dy(t)}{dt} + b_0 y(t)$$

Podemos expresar la relación entre la señal de salida y la señal de entrada mediante el espectro de frecuencias. Considerando que  $X(\omega)$  y  $Y(\omega)$  son respectivamente la transformada de Fourier de  $x(t)$  y  $y(t)$ , adicionalmente a ello utilizando la fórmula de transformación de derivadas, la cual está dada por:

$$\mathcal{F}\left\{\frac{d^n f(t)}{dt^n}\right\} = (i\omega)^n \mathcal{F}\{f(t)\} \quad (2.16)$$

Obtenemos:

$$[a_n(i\omega)^n + \dots + a_1(i\omega) + a_0]X(\omega) = [b_n(i\omega)^n + \dots + b_1(i\omega) + b_0]Y(\omega)$$

Llegamos a la siguiente relación:

$$\frac{Y(\omega)}{X(\omega)} = \frac{a_n(i\omega)^n + \dots + a_1(i\omega) + a_0}{b_n(i\omega)^n + \dots + b_1(i\omega) + b_0}$$

Donde al utilizar la -Ecuación 2.15- obtenemos una expresión generalizada de la función de transferencia [6]:

$$H(\omega) = \frac{a_n(i\omega)^n + \dots + a_1(i\omega) + a_0}{b_n(i\omega)^n + \dots + b_1(i\omega) + b_0} \quad (2.17)$$

#### 2.4.4. Contenido de energía y densidad de energía

La potencia  $P(t)$  que disipa una tensión  $g(t)$  entre los terminales de una resistencia  $R$ , está dada por:

$$P(t) = \frac{g(t)^2}{R}$$

La integral en el tiempo de la ecuación anterior nos cuantifica la energía disipada del sistema, formalmente:

$$U = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{g(t)^2}{R} dt$$

Si consideramos que el valor de la resistencia  $R$  es  $1 \Omega$  y asumiendo que  $G(\omega)$  es la transformada de Fourier de  $g(t)$  (ver -Apéndice A-), se obtiene:

$$U = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |G(\omega)|^2 d\omega \quad (2.18)$$

La ecuación anterior es la llamada *contenido de energía*, también es conocida como la igualdad de Plancherel, que básicamente es análoga a la igualdad de Parseval [1], [6], [7]. Por otro lado, podemos reescribir la -Ecuación 2.18- reemplazando la frecuencia angular  $\omega$  por la frecuencia  $f$  ( $\omega = 2\pi f$ ), obteniendo:

$$U = 2 \int_0^{\infty} |G(2\pi f)|^2 df$$

Donde la función mostrada a continuación es la llamada *densidad de energía* [6].

$$S(f) = 2|G(2\pi f)|^2 \quad (2.19)$$

Las relaciones obtenidas en este apartado se muestran a continuación.

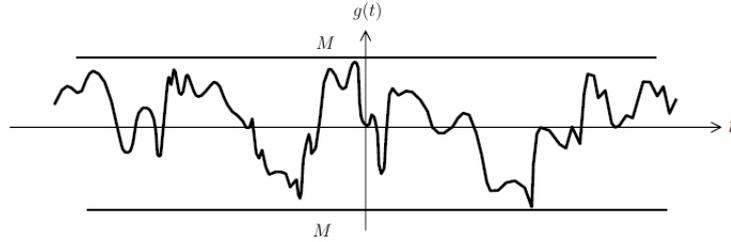
$$U = \int_{-\infty}^{\infty} [g(t)]^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |G(\omega)|^2 d\omega = \int_0^{\infty} S(f) df$$

### 2.4.5. Contenido de potencia y densidad espectral de potencia (PSD)

Se puede definir la densidad espectral de potencia de una función  $g(t)$  si [6]:

- $|g(t)| < M$  tal que  $M > 0$
- el promedio de  $g(t)$  es nulo.
- el contenido de energía no es finito.

Lo mencionado anteriormente es descrito gráficamente en la - Figura 2.5-.



**Figura 2.5:** Condiciones de la definición de PSD. [6]

Para aplicar la identidad de Plancherel es necesario restringir el intervalo de trabajo, generando así una nueva función  $g'(t)$  de cuadrado integrable.

$$g'(t) = \begin{cases} g(t) & \text{si } |t| \leq T/2 \\ 0 & \text{si } |t| > T/2 \end{cases}$$

Dada esta discretización, notamos que para cada  $T$  la función  $g'(t)$  es de cuadrado integrable, por tal efecto, se puede aplicar:

$$\int_{-\infty}^{\infty} [g'(t)]^2 dt = \int_{-T/2}^{T/2} [g(t)]^2 dt = \int_0^{\infty} S'(f) df$$

Se define el *contenido de potencia* como el valor cuadrático medio de la función  $g(t)$ , matemáticamente:

$$\psi^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} [g(t)]^2 dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^{\infty} \frac{S'(f)}{T} df \quad (2.20)$$

Por otro lado, si la integral del último miembro de la ecuación anterior converge uniformemente respecto a  $T$ , pueden permutarse el límite y la integral [6], obteniendo:

$$\psi^2 = \int_0^{\infty} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{S'(f)}{T} df$$

La función que se encuentra dentro del integrando se llama *densidad espectral de potencia* (PSD). La cual, al aplicar la -Ecuación 2.19- y sabiendo que  $G'(\omega)$  en la transformada de Fourier de  $g'(t)$  presenta la forma siguiente.

$$PSD(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{S'(f)}{T} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2|G'(\omega)|^2}{T} \quad (2.21)$$

### 2.4.6. Transformada discreta de Fourier (DFT)

La transformada discreta de Fourier, como su nombre lo indica, es utilizada para señales discretas. Para ello se muestrea la función en intervalos iguales. Además de ello se reemplaza la integral por una sumatoria, pues como se sabe, en esencia son lo mismo [1], [6], [8]. Tenemos entonces:

$$G(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t)e^{-i\omega t} dt \rightarrow DFT(\omega) = \sum_{n=0}^{\infty} g[n]e^{-i\omega n} \quad (2.22)$$

De igual forma se define la transformada discreta inversa de Fourier:

$$DFT^{-1}(\omega) = g[n] = \sum_{n=0}^{\infty} DFT(\omega)e^{i\omega n} \quad (2.23)$$

Se puede definir la frecuencia angular mediante la frecuencia de muestreo de la siguiente forma:

$$\omega_0 = \frac{2\pi F_S}{n} \quad (2.24)$$

Por otro lado, dado que se trabajará con señales de ruido es que se discretizarán las funciones obtenidas anteriormente:

- Contenido de energía

$$U = \sum_{n=0}^{\infty} [g(n)]^2 = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=0}^{\infty} |DFT(\omega)|^2 \quad (2.25)$$

- Densidad de energía

$$S(f) = 2|DFT(2\pi f)|^2 \quad (2.26)$$

- Contenido de potencia

$$\psi^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{n=0}^T [g(n)]^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \sum_{n=0}^T \frac{2|DFT(2\pi f)|^2}{T} \quad (2.27)$$

- Densidad espectral de potencia

$$PSD(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2|DFT(\omega)|^2}{T} \quad (2.28)$$

En muchos de los casos para estimar la transformada discreta de Fourier se utiliza un algoritmo llamado transformada rápida de Fourier (FFT)[1]. Este algoritmo viene incorporado en muchas de las librerías que se utilizan en los diferentes entornos de trabajo que existen para las multitudes de lenguajes de programación.

# Capítulo 3

## Conceptos Físicos

### 3.1. Introducción

La física de reactores nos brinda la oportunidad de poder explicar y predecir los fenómenos que toman lugar en el reactor nuclear. En este capítulo se dará paso a la explicación de los fundamentos físicos que conlleva la ejecución de la técnica de ruido neutrónico, así como la deducción de sus ecuaciones partiendo del modelo del reactor puntual.

### 3.2. Principios de un reactor nuclear

El principio fundamental de un reactor nuclear es controlar la reacción de fisión que toma lugar en el núcleo del reactor y utilizar las diferentes facilidades que este nos brinda. Para ello los reactores nucleares se clasifican en cuatro grupos, los cuales son:

- **Reactor de potencia**, su finalidad es la obtención de energía eléctrica mediante la energía térmica que es liberada a partir de la fisión nuclear (energía nuclear) [9],[10].
- **Reactor de investigación**, nos permite obtener flujos altos de neutrones y gammas para diferentes aplicaciones, así como también facilita el estudio de parámetros nucleares y termohidráulicos [9],[10].
- **Reactor de ensayo**, permite la prueba de materiales y subsistemas [9],[10].
- **Reactor de conjuntos críticos**, es utilizado básicamente para simular un reactor de potencia o investigación, su objetivo es analizar modelos de cálculos y corroborarlos experimentalmente [9],[10].

En el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), se cuenta con un reactor de investigación con una potencia térmica nominal de 10 *MW*, este se encuentra conformado por un tanque con agua liviana desmineralizada que cumple funciones de moderador de los neutrones producidos en las fisiones así como de disipador del calor generado en dichas fisiones. También dispone de barras de control conformadas por elementos como el cadmio que presentan una sección eficaz de absorción para neutrones térmicos elevada. Estas barras de control son capaces de cesar la reacción nuclear dependiendo del porcentaje de la barra insertada en el tanque. El núcleo posee reflectores de berilio

y grafito, así como cajas de irradiación. El combustible nuclear utilizado es el  $U^{235}$  enriquecido al 19,75 %.

A continuación se introducirán brevemente algunos conceptos que serán utilizados concerniente a la física de reactores.

### 3.3. Modelo del reactor puntual (MRP)

Un reactor nuclear puede ser descrito desde el punto de vista físico si se puede predecir el comportamiento de la densidad neutrónica ( $N(t)$ ), pues esta es la que nos permitirá saber como está funcionando la reacción de fisión. Es de simple intuición física relacionar que la densidad neutrónica del reactor depende de la tasa de neutrones producidos ( $P(t)$ ) y de la tasa de los neutrones que llegan a destruirse ( $D(t)$ ), formalmente esto se expresa:

$$\frac{dN(t)}{dt} = P(t) - D(t)$$

Donde se pueden deducir tres casos:

- $P(t) < D(t)$  : Estado subcrítico
- $P(t) = D(t)$  : Estado crítico
- $P(t) > D(t)$  : Estado hipercrítico

El modelo del reactor puntual considera un reactor en estado crítico, estacionario y con un nivel de potencia bajo, en que pueda desprejarse los fenómenos de realimentación. Posterior a ello, en cierto instante ( $t = t_0$ ) se produce un desbalance tal que ( $P(t) \neq D(t)$ ) [4], [9], [10]. Donde a partir de ello se estudia la evolución de la densidad neutrónica  $N(\vec{r}, E, t)$ , obteniéndose como resultado:

$$N(\vec{r}, E, t) = \varphi(\vec{r}, E) \cdot p(t) \tag{3.1}$$

Siendo,  $\varphi(\vec{r}, E)$  la función de distribución energética de la densidad neutrónica y  $p(t)$  la evolución de la potencia.

La -Ecuación 3.1- denota la separabilidad de variables entre las de espacio-energía y temporal. Según [9] la evolución de la densidad neutrónica es la misma en cualquier punto del reactor, para cualquier energía y coincide con la evolución de la potencia.

### 3.4. Cinética puntual

La cinética puntual estudia el comportamiento no estacionario del reactor producido por un desequilibrio entre  $P(t)$  y  $D(t)$ . Donde para una mejor comprensión se describirán los parámetros cinéticos con los que se trabaja.

### 3.4.1. Definición de los parámetros cinéticos

- Fracción efectiva de los neutrones tardíos ( $\beta_{ef}$ ).

$$\beta_{ef} = \frac{N_{Rt}}{N_{It} + N_{Rt}}$$

Siendo  $N_{Rt}$  el número de neutrones tardíos térmicos y  $N_{It}$  el número de neutrones instantáneos térmicos.

- Tiempo de vida media de los neutrones en el reactor ( $T_n$ ).

$$T_n = \frac{N(t)}{D(t)}$$

- Constante de multiplicación efectiva ( $k$ )

$$k = \frac{P(t)}{D(t)}$$

- Constante de multiplicación efectiva del medio infinito ( $k_\infty$ )

$$k_\infty = \frac{P(t)}{A(t)}$$

Donde  $A(t) = D(t) + E(t)$ , siendo  $A(t)$  la absorción de neutrones,  $D(t)$  la destrucción de neutrones y  $E(t)$  el escape de los mismos.

- Tiempo entre reproducciones ( $\Lambda$ )

$$\Lambda = \frac{N(t)}{P(t)} = \frac{T_n}{k}$$

- Reactividad absoluta ( $\rho$ )

$$\rho = \frac{P(t) - D(t)}{P(t)} = \frac{k - 1}{k}$$

Esta variable expresa la fracción de neutrones que se tiene como excedente en el reactor.

- Reactividad en dólares ( $\$$ )

$$\$ = \frac{\rho}{\beta_{ef}}$$

Por medio de esta variable se expresa la relación entre la fracción de neutrones excedentes en el reactor con la fracción de neutrones tardíos.

- Tiempo entre reproducciones reducido ( $\Lambda^*$ )

$$\Lambda^* = \frac{\Lambda}{\beta_{ef}}$$

Nuestro objetivo en específico es escribir las ecuaciones de balance para la densidad neutrónica  $N(t)$  y para la concentración de precursores  $C(t)$ . Siendo este último la concentración de elementos que dan pase a la generación de nuevos neutrones, en general a los tardíos. Para ello, asumimos tres instantes:

- $t < 0$  En todo ese instante el reactor se mantiene en estado crítico ( $k = 1 \Rightarrow \rho = 0$ ), formalmente:

$$\frac{dN(t)}{dt} = 0 \wedge \frac{dC(t)}{dt} = 0$$

- $t \leq 0$  El momento anterior indica que  $N(t)$  y  $C(t)$  tienen que ser constante. Obteniendo:

$$N(t) = N_0 = N_{0R} + N_{0I} \quad (3.2)$$

$$C(t) = C_0 = C_{0R} + C_{0I} \quad (3.3)$$

Donde  $N_{0R}$  es la densidad neutrónica tardía inicial y  $N_{0I}$  es la densidad neutrónica instantánea inicial. Por otro lado,  $C_{0R}$  son los precursores iniciales que dan origen a neutrones tardíos y  $C_{0I}$  a los instantáneos.

- $t > 0$  Este instante representa una alteración en el reactor que bien puede ser una inserción o extracción repentina de las barras de control. Resultando en el tiempo:

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{dN_R(t)}{dt} + \frac{dN_I(t)}{dt} \quad (3.4)$$

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{dC_R(t)}{dt} + \frac{dC_I(t)}{dt} \quad (3.5)$$

Siendo  $N_R(t)$  la densidad neutrónica tardía y  $N_I(t)$  la densidad neutrónica instantánea. Mientras que  $C_R(t)$  representa a los precursores que darán paso a neutrones tardíos y  $C_I(t)$  a los instantáneos.

Con las condiciones anteriores se pueden escribir las ecuaciones de la cinética puntual, las cuales son:

- I Balance de la población instantánea**, la cual describe la variación entre la población instantánea  $N_I(t)$  mediante la población inicial al momento de la alteración, ver -Apéndice B.1- .

$$\frac{dN_I(t)}{dt} = \frac{(\beta - 1)}{\Lambda^*} N_I(t) \quad (3.6)$$

Haciendo:  $\alpha_I = \frac{|\beta - 1|}{\Lambda^*}$ . Donde  $\alpha_I$  : es la constante de evolución de los neutrones instantáneos.

- II Balance de la población tardía**, describe la variación de la población tardía con respecto a los precursores, formalmente (ver -Apéndice B.2-).

$$\frac{dN_R(t)}{dt} = \lambda C(t) - \frac{N_R(t)}{T_n} \quad (3.7)$$

- III Balance de la densidad neutrónica**, utiliza las dos ecuaciones anteriores en conjunto con la -Ecuación 3.4- para describir la evolución de la densidad neutrónica

ca (ver -Apéndice B.3-).

$$\frac{dN(t)}{dt} = \left(\frac{\$ - 1}{\Lambda^*}\right)N(t) + \lambda C(t) \quad (3.8)$$

**IV Balance de la concentración de precursores**, de forma análoga que los anteriores describe mediante una ecuación la relación entre precursores y densidad neutrónica ( ver -Apéndice B.4-).

$$\frac{dC(t)}{dt} = \beta_{ef}k \frac{N(t)}{T_n} - \lambda C(t) \quad (3.9)$$

Luego de obtener las ecuaciones es necesario aplicar la normalización a la densidad neutrónica y a la concentración de precursores. Estas se definen mediante [9]:

$$n(t) = \frac{N(t)}{N_0} \quad (3.10)$$

$$c(t) = \frac{C(t)}{C_0} \quad (3.11)$$

Reemplazando estas normalizaciones, en las -Ecuaciones 3.8 y 3.9-:

$$\frac{dn(t)}{dt} = \left(\frac{\$ - 1}{\Lambda^*}\right)n(t) + \lambda c(t) \quad (3.12)$$

$$\frac{dc(t)}{dt} = \frac{n(t)}{\Lambda^*} - \lambda c(t) \quad (3.13)$$

### 3.5. Fundamentos de ruido neutrónico

La fisión nuclear que toma lugar en el reactor es basada en el  $U^{235}$ , el cual al absorber un neutrón térmico libera 2.5 neutrones rápidos [11] y aproximadamente 200 MeV (no toda esta energía se libera en la fisión, parte queda en los fragmentos de fisión inestables) de energía media por cada fisión ( $\gamma$ ) además de productos de fisión. Estos neutrones rápidos son termalizados por el agua liviana presente en el reactor con la finalidad de continuar con una reacción nuclear autosostenida.

Como se mencionó en los objetivos del Capítulo 1, se busca estimar mediante la presente técnica la potencia térmica del reactor. Como consecuencia de ello, notamos en el anterior párrafo que se libera una determinada cantidad de energía por cada fisión que al multiplicarse por la tasa de fisiones ( $F$ ) nos da como resultado la potencia térmica. Matemáticamente.

$$p = \gamma F \quad (3.14)$$

En la -Ecuación 3.14- observamos que para hallar la potencia térmica bastaría con estimar la tasa de fisiones, donde para ello se utilizarán dos cámaras de ionización compensada (CIC). Estas cámaras de ionización son capaces de solo detectar los neutrones y discriminar la radiación gamma, su funcionamiento será explicado con detalle en el Capítulo 4. Por otro lado, sabemos que la corriente eléctrica producida en estas

cámaras es proporcional a los neutrones detectados.

$$I(t) = \bar{I} + \delta I(t) \quad (3.15)$$

Los neutrones detectados al mismo tiempo son proporcionales a la densidad neutrónica normalizada y concentración de precursores normalizados existentes en ese instante en el reactor.

$$n(t) = 1 + \delta n(t) \quad (3.16)$$

$$c(t) = \bar{c} + \delta c(t) \quad (3.17)$$

Como se mencionó anteriormente, se sabe de que el ruido en una medición conlleva información sobre los parámetros que gobiernan al sistema, esto se puede observar mediante las funciones de correlación. Sin embargo, dado que trabajamos con un sistema (reactor nuclear) del que conocemos las ecuaciones que lo rigen, podemos comenzar con aplicar esta hipótesis a las ecuaciones ya conocidas. Para ello consideramos que la fluctuación de los parámetros nucleares puede deberse a la acción de una *fente equivalente de ruido neutrónico*. Esta fuente equivalente debe agregarse a la ecuación de balance de la población neutrónica normalizada (-Ecuación 3.12-) como una fuente adicional que modifica la evolución de la misma [2], [3], [9], [10].

$$\frac{d[\delta n(t)]}{dt} = \left(\frac{\$ - 1}{\Lambda^*}\right)\delta n(t) + \lambda\delta c(t) + x(t) \quad (3.18)$$

$$\frac{d[\delta c(t)]}{dt} = \frac{\delta n(t)}{\Lambda^*} - \lambda\delta c(t) \quad (3.19)$$

Donde  $x(t)$  viene a ser la *fente equivalente de ruido neutrónico*. Luego, tomando la transformada de Fourier, haciendo  $s = i\omega$  y ordenando variables (ver -Apéndice C.1-), obtenemos:

$$\delta n(\omega) = \frac{-x(\omega)}{\frac{1}{\Lambda^*}[(\$ - 1 + \frac{\lambda^2}{(\lambda^2 + \omega^2)}) - i\omega(\Lambda^* + \frac{\lambda}{\lambda^2 + \omega^2})]} \quad (3.20)$$

Dado que buscamos hallar parámetros fundamentales del sistema, analizamos la fluctuación anterior por medio de la función de correlación:

$$\bar{\phi}_{ij}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \delta n_i(t)\delta n_j(t + \tau)dt \quad (3.21)$$

Tomando la transformada de Fourier, damos paso a la densidad espectral de potencia de la densidad neutrónica normalizada (-Ecuación 2.21-). Considerando  $i=j$ , tenemos la autodensidad espectral de potencia de la densidad neutrónica normalizada (NAPSD).

$$NAPSD(\omega) = 2 \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\delta n^*(\omega)\delta n(\omega)}{T} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2|\delta n(\omega)|^2}{T} \quad (3.22)$$

Reemplazando la -Ecuación 3.20- en la obtenida anteriormente (-Ecuación 3.22-), resulta:

$$NAPSD(\omega) = \frac{2x^*(\omega)x(\omega)(\Lambda^*)^2}{[(\$ - 1 + \frac{\lambda^2}{(\lambda^2 + \omega^2)})^2 + \omega^2(\Lambda^* + \frac{\lambda}{\lambda^2 + \omega^2})^2]} \quad (3.23)$$

Cuando  $\omega \gg \lambda$ , se obtiene la *aproximación instantánea* ( $\lambda$  es la constante de decaimiento medio de los precursores de neutrones tardíos, donde para  $U^{235} \approx 0,4Hz$ ) [12].

$$NAPSD(\omega) = \frac{2x^*(\omega)x(\omega)}{\frac{1}{(\Lambda^*)^2}[(\beta - 1)^2 + \omega^2(\Lambda^*)^2]} \quad (3.24)$$

Donde se hace:

$$A = \frac{2x^*(\omega)x(\omega)}{\alpha_I^2} \quad (3.25)$$

Obteniendo como resultado:

$$NAPSD(\omega) = \frac{A}{(1 + \frac{\omega^2}{\alpha^2})} \quad (3.26)$$

Sin embargo, lo mostrado anteriormente solo pertenece a la parte correlacionada, pues además de ello existe una parte no correlacionada que se le debe sumar a la ecuación anterior.

$$NAPSD(\omega) = \frac{A}{(1 + \frac{\omega^2}{\alpha^2})} + Rd \quad (3.27)$$

El término  $Rd$ , se denomina *ruido de detección normalizado* y aparece como consecuencia de la detección. Este proceso involucra la absorción del neutrón, lo cual implica la suma de un término proporcional a la *delta de Dirac* ( $\delta(t)$ ) en la función de correlación. En el dominio frecuencial ( $NAPSD$ ) implica sumar una constante debido a que  $\mathcal{F}[\delta(t)] = 1$  [4], [9], [10].

Lo descrito hasta el momento, nos permite estimar la densidad espectral de potencia de la densidad neutrónica normalizada con un solo detector. Sin embargo, habíamos mencionado que eran necesario dos de ellos para mejorar la precisión y para evitar dependencia espacial debido a la posición con respecto a la barras de control. Por ello, se define la densidad espectral de potencia cruzada de la densidad neutrónica normalizada ( $NCPSD$ ) como:

$$NCPSD^{I_1 I_2}(\omega) = \frac{CPSD^{I_1 I_2}(\omega)}{\bar{I}_1 \bar{I}_2} = \frac{A}{(1 + \frac{\omega^2}{\alpha^2})} \quad (3.28)$$

Donde:  $CPSD$  es la densidad espectral de potencia cruzada de la densidad neutrónica. Para este caso, el término  $Rd$  desaparece dado que los procesos de detección en ambas cámaras son independientes entre sí [4],[9], [10].

Las -Ecuaciones 3.27 y 3.28- nos arrojan la constante de decaimiento de los neutrones instantáneos ( $\alpha_I$ ) y el parámetro  $A$ . Es este último parámetro el que está relacionado con la tasa de fisiones que toma lugar en el reactor mediante la siguiente ecuación (ver -Apéndice C.2-) [4], [9], [10], [13], [14] :

$$A = 2 \frac{D(1 - \beta_{ef})L_1}{F\beta_{ef}^2} \quad (3.29)$$

Siendo  $D$  el llamado *factor de Diven*,  $L_1$  es un factor geométrico que depende de cada reactor y  $\beta_{ef}$  es la fracción efectiva de los neutrones tardíos. Por otro lado, la potencia

térmica del reactor definida en la -Ecuación 3.14-:

$$p = \gamma F$$

Donde  $\gamma$  era la energía media liberada por fisión ( $\approx 200 \text{ MeV} \approx 3,2 \times 10^{-11} \text{ J}$  para  $U^{235}$ ). Reemplazando la -Ecuación 3.29- en la mostrada anteriormente, tenemos:

$$p = \frac{2\gamma D(1 - \beta_{ef})L_1}{A\beta_{ef}^2} \quad (3.30)$$

Para el caso del RP-10  $D = 0,795$ ,  $L_1 = 1,18$  [15] y  $\beta_{ef} = 0,0079185$  [5] . De forma análoga, se puede estimar la función de transferencia del reactor, haciendo [9], [10]:

$$x(\omega) = \frac{\delta\$(\omega)}{\Lambda^*} \quad (3.31)$$

La ecuación anterior se reemplaza en la -Ecuación 3.20-, resultando:

$$\delta n(\omega) = \frac{-\frac{\delta\$(\omega)}{\Lambda^*}}{\frac{1}{\Lambda^*}[(\$( - 1 + \frac{\lambda^2}{(\lambda^2 + \omega^2)}) - i\omega(\Lambda^* + \frac{\lambda}{\lambda^2 + \omega^2})]} \quad (3.32)$$

Sin embargo, en condiciones de criticidad ( $\$ = 0$ ), reagrupamos la ecuación anterior, obteniendo:

$$\delta n(\omega) = \frac{\frac{\delta\$(\omega)}{\Lambda^*}}{\frac{1}{\Lambda^*}[1 - (\frac{\lambda^2}{(\lambda^2 + \omega^2)}) + i\omega(\Lambda^* + \frac{\lambda}{\lambda^2 + \omega^2})]} \quad (3.33)$$

Las unidades de  $[\delta n(\omega)] = [\delta\$(\omega)] = \frac{1}{\text{Hz}} = \text{seg}$ . Por lo tanto, podemos expresar la ecuación anterior como:

$$\delta n(\omega) = H_0(\omega)\delta\$(\omega) \quad (3.34)$$

Notamos que al comparar las dos últimas ecuaciones, tenemos la función de transferencia.

$$H_0(\omega) = \frac{1}{[1 - (\frac{\lambda^2}{(\lambda^2 + \omega^2)}) + i\omega(\Lambda^* + \frac{\lambda}{\lambda^2 + \omega^2})]} \quad (3.35)$$

La función de transferencia relaciona la fluctuación de la densidad neutrónica (que en el MRP concuerda con la fluctuación de la potencia) con la fluctuación de la reactividad [4]. Para  $\omega \gg \lambda$ , se tiene [12] :

$$H_0(\omega) \approx \frac{1}{1 + i\omega\Lambda^*} \quad (3.36)$$

Por otro lado, una vez ya definidas las ecuaciones para la estimación de la potencia y la función de transferencia del reactor, vamos a proceder con formalizar la forma que adopta la eficiencia de los detectores. Para ello partimos de la definición general de eficiencia de un detector.

$$\varepsilon = \frac{\# \text{Neutrones detectados}}{\# \text{Neutrones emitidos}}$$

Que bien podemos expresarlo de la siguiente forma también:

$$\varepsilon = \frac{\#Neutrones\ detectados/seg}{F} \quad (3.37)$$

Siendo  $F$  la tasa de fisiones. Por tal motivo, bastaría con darle forma al numerador de la ecuación anterior.

Para ello partimos del hecho que la detección de un neutrón en la cámara produce una carga promedio  $\bar{q}$  y por consiguiente, la detección de  $N$  neutrones producirá una carga promedio total  $N\bar{q}$ .

$$\begin{aligned} 1 \text{ (neutrón detectado)} &\longrightarrow \bar{q} \\ N \text{ (neutrones detectados)} &\longrightarrow N\bar{q} \end{aligned}$$

Por lo tanto, si lo dividimos en el tiempo, obtenemos:

$$\begin{aligned} \frac{N\bar{q}}{t} = \frac{\bar{Q}}{t} = \bar{I} \\ \#Neutrones\ detectados/seg = \frac{\bar{I}}{\bar{q}} \end{aligned} \quad (3.38)$$

Juntando las -Ecuaciones 3.37 y 3.38- resulta finalmente que la eficiencia está dada por:

$$\varepsilon F = \frac{\bar{I}}{\bar{q}} \Rightarrow \varepsilon = \frac{\bar{I}}{F\bar{q}} \quad (3.39)$$

Para darle forma, introducimos la relación del ruido no correlacionado ( $Rd$ ) con la relación corriente-carga [9], [10]:

$$\frac{\bar{I}}{\bar{q}} = \frac{2Be}{Rd} \quad (3.40)$$

Donde  $Be$  es el llamado factor de Bennett.

Por otro lado, utilizando las -Ecuaciones 3.39, 3.40 y 3.29- para reemplazar la tasa de fisiones, obtenemos:

$$\varepsilon = \frac{2Be}{RdF} = \frac{2BeA\beta_{ef}^2}{2RdD(1 - \beta_{ef})L_1} \quad (3.41)$$

Sin embargo, el factor de Bennett se define como:

$$Be = \frac{\bar{q}^2}{(\bar{q})^2} \approx 1 \quad (3.42)$$

Mientras que el valor de  $D(1 - \beta_{ef})L_1$  utilizando los datos referenciales para el RP-10, es:

$$D(1 - \beta_{ef})L_1 = (0,795)(1 - 0,0079185)(1,18) = 0,931 \approx 1 \quad (3.43)$$

Resultando la eficiencia:

$$\varepsilon \approx \frac{A}{Rd}\beta_{ef}^2 \quad (3.44)$$

De esta última ecuación podemos suponer dos casos:

- ( $Rd < A$ ) Lo que indicaría que la lectura del ruido correlacionado es mayor que la del ruido no correlacionado, esperando una buena resolución en el procesamiento.
- ( $Rd > A$ ) Esto supondría un mal funcionamiento de la cámara, donde el ruido no correlacionado sobrepasa al correlacionado.

Para asegurarnos que la cámara mantenga una buena lectura durante su funcionamiento se define un último parámetro de medición denotado como  $f^{(q)}$  y definido matemáticamente como [2], [3], [4], [9], [10]:

$$f^{(q)} = \frac{Rd\bar{I}}{2} \quad (3.45)$$

Donde si utilizamos la -Ecuación 3.40- obtendremos que:

$$f^{(q)} = \bar{q}Be = \bar{q} \left( \frac{\bar{q}^2}{\bar{q}^2} \right) \approx \bar{q}$$

Lo cual indicaría que la cámara generaría una carga aproximada  $\bar{q}$  por cada neutrón detectado en cada una de las mediciones realizadas. Si en caso el valor  $f^{(q)}$  variara drásticamente con cada medición, esto indicaría que se está obteniendo diferentes valores de carga por cada neutrón detectado que en otras palabras indicaría un mal funcionamiento de la cámara.

Dada la cantidad de estimaciones que se van a dar mediante la medición de pocas variables se da paso al método de propagación de errores para poder reportarlas con sus incertidumbres adecuadas en el -Apéndice D-.

# Capítulo 4

## Descripción y Medidas de Calidad del Sistema de Medición

### 4.1. Introducción

Para poder realizar el procesamiento de las mediciones adecuadamente, se debe conocer el funcionamiento del sistema de medición. En el presente capítulo se explica el funcionamiento de cada una de las partes y en forma conjunta, así como el respectivo protocolo seguido para estimar los parámetros de calidad del sistema de medición.

### 4.2. Sistema de medición

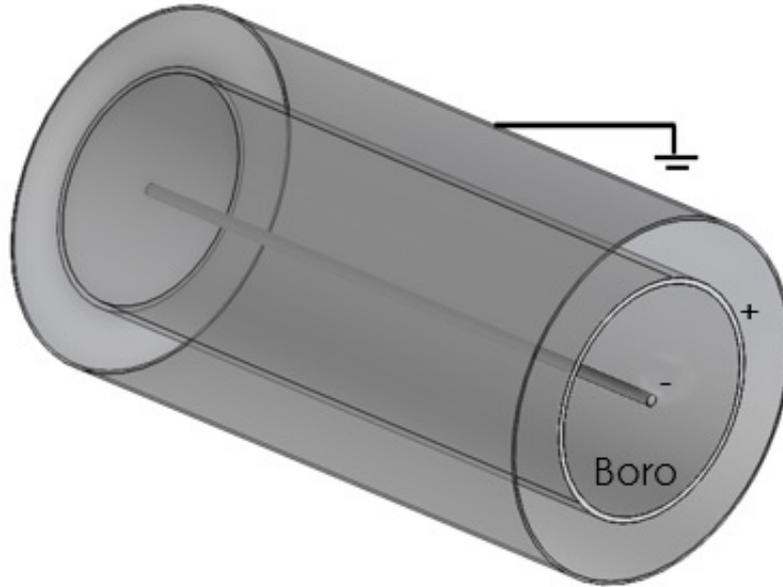
El sistema de medición utilizado consta de ocho partes, las cuales son: Las cámaras de ionización compensada (CIC), las fuentes de alto voltaje, el convertor corriente-voltaje, filtro de la componente continua, amplificador de fluctuaciones, filtro anti-aliasing, convertor análogo-digital (ADC) y la computadora.

#### 4.2.1. Cámara de ionización compensada (CIC)

Las CIC constan de dos secciones, una sensible a radiación gamma, mientras que otra sensible a neutrones. La región sensible a neutrones es debido a una lámina de Boro que obedece a la siguiente reacción nuclear.



Donde la partícula alfa resultante de la reacción nuclear es la que produce el pulso detectable. En la -Figura 4.1- se muestra la estructura interior de la CIC.



**Figura 4.1:** Estructura interior de la CIC.

Notamos que la zona sensible a neutrones se encuentra entre los electrodos positivo y negativo, esto trae como consecuencia que la partícula alfa generada se dirija hacia el electrodo negativo percibiéndose una corriente  $I_n$ . Mientras que por otro lado, la zona sensible a radiación gamma es la conformada por el electrodo positivo y el chasis del detector (conectado a tierra), esto genera que los átomos ionizados del gas presente en el detector se dirijan hacia el chasis del mismo produciéndose una corriente  $I_g$ .

Sin embargo, debido a que el detector ha sido elaborado con Aluminio de alta pureza, la radiación gamma es capaz de colarse en la zona sensible a neutrones produciendo corriente aproximada a  $I_g$  en el electrodo negativo el cual se suma a la corriente  $I_n$ .

Si la corriente total generada en la zona sensible a neutrones es  $I_{Neutrones}^{Zona}$ , mientras que la corriente total producida en la zona sensible a gammas es  $I_{Gammas}^{Zona}$ , tenemos entonces:

$$I_{Neutrones}^{Zona} - I_{Gammas}^{Zona} \approx (I_n + I_g) - (I_g) \approx I_n$$

Estos detectores fueron diseñados para medir radiación neutrónica dentro del reactor donde se encuentran todo tipo de radiaciones, siendo la más penetrante de estas la radiación gamma. Es fácil inferir que el nombre de *cámara de ionización compensada* se debe a que es capaz de restar la corriente aproximada que genera la radiación gamma en la zona sensible a neutrones [16]. En la -Figura 4.2- se muestran las CIC pertenecientes al Laboratorio de Física Experimental de Reactores del IPEN.



**Figura 4.2:** CIC del Laboratorio de Física Experimental de Reactores - IPEN.

#### 4.2.2. Fuentes de alto voltaje

Las fuentes de alto voltaje se utilizan para polarizar el detector y obtener la señal requerida. Usualmente se utilizan +400 y -400 voltios, que se distribuyen de la siguiente forma en el detector: el electrodo exterior se encuentra conectado a tierra, el electrodo de Boro se encuentra polarizado positivamente, mientras que el electrodo central está polarizado negativamente.

#### 4.2.3. Conversor corriente-voltaje

Su función es básicamente realizar la conversión de corriente a voltaje por medio de una resistencia, el valor de esta resistencia varía entre  $10^2$  y  $10^6 \Omega$ , este valor se elige según convenga en la medición. Este dato es guardado directamente en los archivos a procesar.

#### 4.2.4. Filtro de la componente continua

Consiste básicamente en un filtro paso alto compuesto por un circuito RC. Como su nombre indica, nos permite separar la componente continua de la componente fluctuante obtenida tras la medición. La componente continua es enviada directamente al conversor análogo-digital, mientras que la componente fluctuante aún es procesada.

#### 4.2.5. Amplificador de fluctuaciones

La función principal de este amplificador es multiplicar por una constante "k" la componente fluctuante y enviarla al filtro anti-aliasing. El valor de esta constante es guardado directamente en los archivos a procesar.

#### 4.2.6. Filtro anti-aliasing

Su función es eliminar componentes de frecuencias mayores a la mitad de la frecuencia de muestreo. Básicamente le otorga una forma definida al espectro de datos antes que estos sean enviados al conversor análogo-digital.

### 4.2.7. Conversor análogo-digital (ADC)

Nos permite convertir la señal analógica obtenida (voltaje) en señal digital. En nuestro caso particular el ADC consta de una resolución de 12 bits, lo cual nos permite presentar valores fluctuantes de 0 hasta 4095. En la -Figura 4.3- se presenta el esquema completo de la cadena de medición.

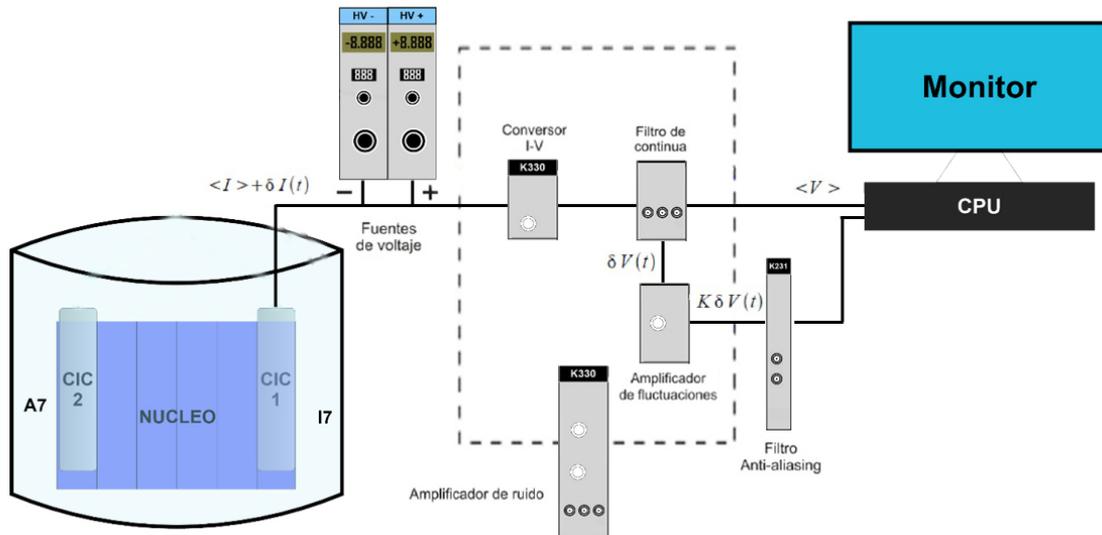


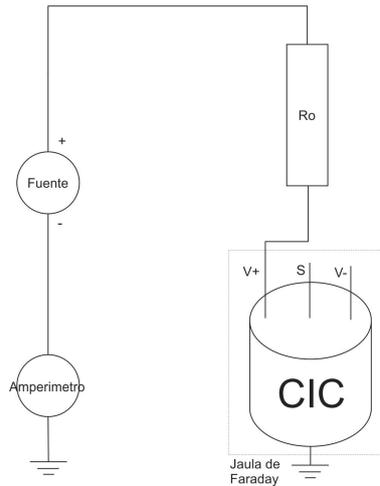
Figura 4.3: Esquema de la cadena de medición [17], [18]

## 4.3. Medición de calidad de las CIC

A continuación se detallará el procedimiento y las mediciones obtenidas de dos de los parámetros de calidad de las cámaras, las cuales corresponden a la resistencia de aislamiento y corriente propia de la cámara.

### 4.3.1. Medición de la resistencia de aislamiento

Esta prueba indica si el aislamiento de los conectores de la CIC se encuentran dentro de los valores recomendados por el fabricante ( $> 10^9 \Omega$ ) [19], caso contrario las CIC son sometidas a un mantenimiento. Para la prueba se utiliza la configuración mostrada en la -Figura 4.4- donde se mide la corriente media que pasa por el amperímetro, teniendo como dato el voltaje proporcionado por la fuente.



**Figura 4.4:** Configuración para medición de aislamiento de la CIC [18]

Siendo  $R_0$  una resistencia de protección ( $\approx 10^8 \Omega$ ),  $V+$  el conector de voltaje positivo,  $V-$  el conector de voltaje negativo y  $S$  el conector de la salida de señal. El procedimiento descrito por el manual, es el siguiente [18], [19]:

- Se fija un voltaje en la fuente, esta no debe superar los propuestos por el fabricante.
- Los valores de la resistencia de  $V+$ ,  $V-$  y  $S$  ( $R+$ ,  $R-$  y  $R_s$ ) se obtienen conectando un electrodo a la vez y a tierra el sistema de pruebas.
- Las mediciones se deben de llevar a cabo a una temperatura entre  $20^\circ C$  y  $25^\circ C$  con humedad relativa entre  $40\%HR$  y  $50\%HR$ .
- Los valores de aceptación son proporcionados por el fabricante, siendo para este caso ( $> 10^9 \Omega$ ).

Se realizaron las mediciones con el electrómetro *Keithley modelo 6517B* [20] donde los valores arrojados se muestran en la - Tabla 4.1- [21], el voltaje utilizado fue de  $400 V$ .

**Tabla 4.1:** Resistencia de aislamiento antes del mantenimiento.

Positivo ( $\Omega$ )	CIC-1		Positivo ( $\Omega$ )	CIC-2	
	Negativo ( $\Omega$ )	Señal ( $\Omega$ )		Negativo ( $\Omega$ )	Señal ( $\Omega$ )
$2.5 \times 10^8$	$1.0 \times 10^8$	$1.1 \times 10^7$	$2.2 \times 10^{10}$	$8 \times 10^{10}$	$9.0 \times 10^8$
$4.0 \times 10^8$	$1.3 \times 10^8$	$1.5 \times 10^7$	$2.1 \times 10^{10}$	$7.5 \times 10^{10}$	$1.4 \times 10^9$
$(3.3 \pm 0.8) \times 10^8$	$(1.2 \pm 0.2) \times 10^8$	$(1.3 \pm 0.2) \times 10^7$	$(2.2 \pm 0.1) \times 10^{10}$	$(7.8 \pm 0.3) \times 10^{10}$	$(1.2 \pm 0.3) \times 10^9$

A simple vista notamos que estas mediciones se encuentran muy dispersas y sobre todo fuera del rango de recomendación por el fabricante (para CIC-1), por tal motivo fueron sometidas a mantenimiento. El cual consiste en colocarlas en un horno a diferentes temperaturas [22] para eliminar el mayor rastro de humedad en ellas. Las mediciones posteriores al mantenimiento se muestran en la -Tabla 4.2- [21], utilizando el mismo voltaje.

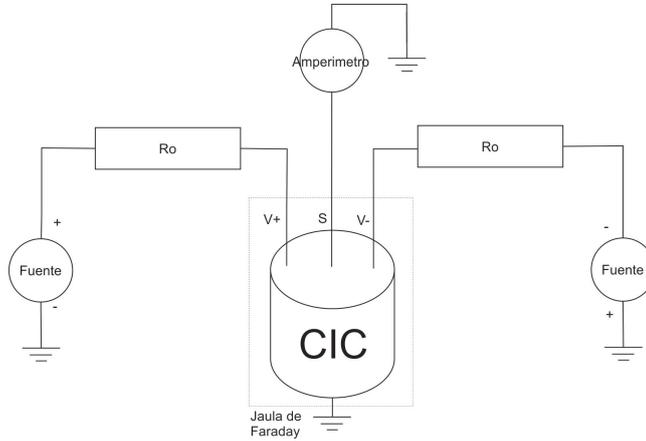
**Tabla 4.2:** Resistencia de aislamiento después del mantenimiento.

CIC-1			CIC-2		
Positivo ( $\Omega$ )	Negativo ( $\Omega$ )	Señal ( $\Omega$ )	Positivo ( $\Omega$ )	Negativo ( $\Omega$ )	Señal ( $\Omega$ )
$5.0 \times 10^9$	$1.3 \times 10^8$	$3.0 \times 10^9$	$6.2 \times 10^{10}$	$6.4 \times 10^{11}$	$5.4 \times 10^9$
$3.7 \times 10^9$	$1.9 \times 10^8$	$3.6 \times 10^9$	$6.8 \times 10^{10}$	$7.0 \times 10^{11}$	$6.5 \times 10^9$
$(4.4 \pm 0.7) \times 10^9$	$(1.6 \pm 0.3) \times 10^8$	$(3.3 \pm 0.3) \times 10^9$	$(6.5 \pm 0.3) \times 10^{10}$	$(6.7 \pm 0.3) \times 10^{11}$	$(6 \pm 0.6) \times 10^9$

Podemos notar un aumento en la resistencia de aislamiento de las cámaras de forma significativa. Una vez terminada esta medición de calidad, pasamos a la siguiente.

### 4.3.2. Medición de corriente propia

Esta prueba nos permite obtener la corriente de la cámara polarizada cuando no está sometida a radiación [19]. Para ello, se utiliza la configuración mostrada en la -Figura 4.5-.



**Figura 4.5:** Configuración para medición de corriente propia de la CIC [18]

Donde el procedimiento descrito por el manual, es el siguiente [18], [19]:

- Se polarizan los electrodos  $V+$  y  $V-$  con los valores de tensión indicados por el fabricante.
- Las mediciones deben ser llevadas a cabo a una temperatura entre  $20^{\circ}C$  y  $25^{\circ}C$ , con humedad relativa entre  $40\%HR$  y  $50\%HR$ .
- Los valores de aceptación son proporcionados por el fabricante, siendo para este caso ( $\leq 10^{-10}A$ ) [19].

Es importante indicar que este parámetro no es una característica intrínseca del detector. Las mediciones se realizaron con el electrómetro *Keithley modelo 6517B* [20] donde los valores arrojados se muestran en la -Tabla 4.3- [21], los voltajes utilizados fueron de  $+400V$  y  $-400V$ .

**Tabla 4.3:** Mediciones de corriente propia.

CIC-1 (A)	CIC-2 (A)
$5.7 \times 10^{-11}$	$6.0 \times 10^{-11}$
$5.4 \times 10^{-11}$	$5.8 \times 10^{-11}$
$5.2 \times 10^{-11}$	$5.2 \times 10^{-11}$
$(5.4 \pm 0.3) \times 10^{-11}$	$(5.7 \pm 0.5) \times 10^{-11}$

Notamos igualmente que en el caso anterior, una gran dispersión en los datos medidos. Sin embargo, estos aún se encuentran dentro de los valores referenciales otorgados por el fabricante.

# Capítulo 5

## Obtención de Ruido Neutrónico

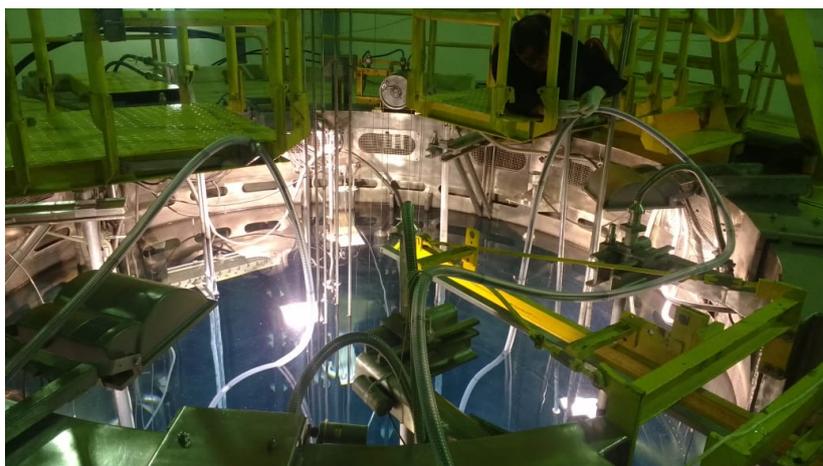
### 5.1. Introducción

En este capítulo se describe la posición de las CIC dentro del tanque del reactor, así como el proceso de medición que se llevó a cabo para la obtención de ruido neutrónico.

### 5.2. Selección de la zona de irradiación

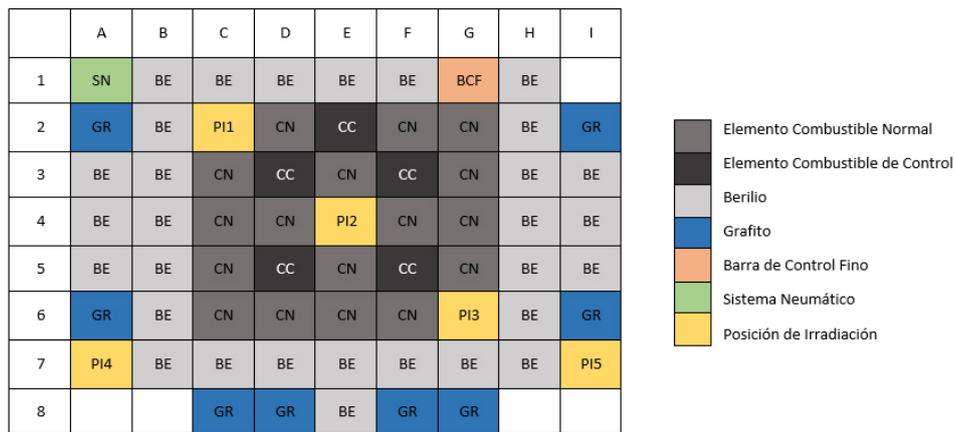
Para poder medir la potencia del reactor nuclear, las CIC deben estar dentro del tanque del reactor. Estas deben estar ubicadas en las posiciones más óptimas posibles, es decir, relativamente cerca de los elementos combustibles normales para evitar interferencias en la medición producto de la posición de las barras de control pero no tan cerca a ellas para evitar, de igual forma, la saturación del detector.

Para ello se muestra en la -Figura 5.1- la disposición usual de la boca de tanque del reactor.



**Figura 5.1:** Disposición de la boca de tanque del reactor nuclear RP-10.

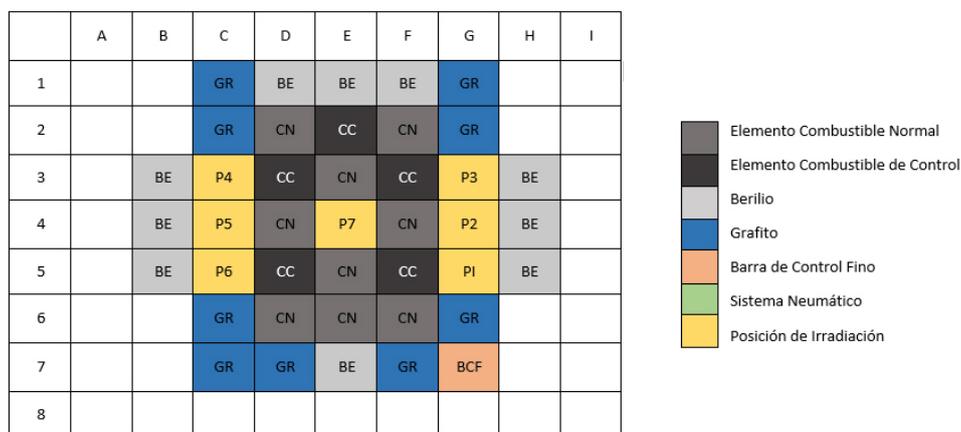
El presente trabajo se llevó a cabo bajo dos configuraciones del núcleo del reactor, siendo éstas las número 48 (-Figura 5.2-) y 8 (-Figura 5.3-). Para la primera configuración se tomó un grupo de mediciones denominado PRE-PES-5. Las posiciones elegidas para estas mediciones fueron las A7 e I7 respectivamente [23].



**Figura 5.2:** Configuración del núcleo número 48.

Las posiciones mencionadas anteriormente se encuentran distribuidas en las diferentes zonas de irradiación.

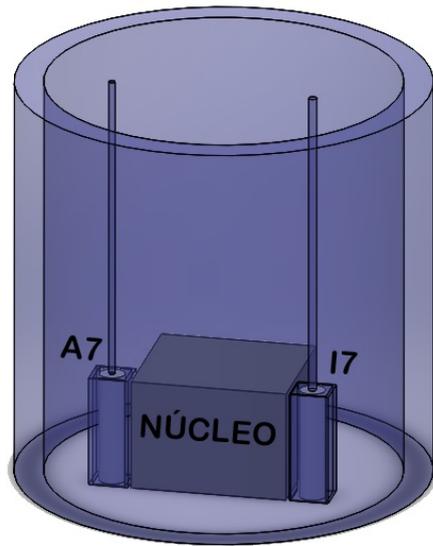
Para la segunda configuración se realizó también un grupo de mediciones para diferentes niveles de potencia con las CIC ubicadas en las posiciones B2 y H6. Las estimaciones resultantes fueron utilizadas para calibrar en potencia térmica una CIC propia del reactor.



**Figura 5.3:** Configuración del núcleo número 8.

### 5.3. Medición y obtención de ruido neutrónico

A continuación se muestran las disposiciones esperada y real de las CIC dentro del tanque del reactor para las mediciones PRE-PES-5. Estas disposiciones se encuentran en la -Figura 5.4 y 5.5 - respectivamente.

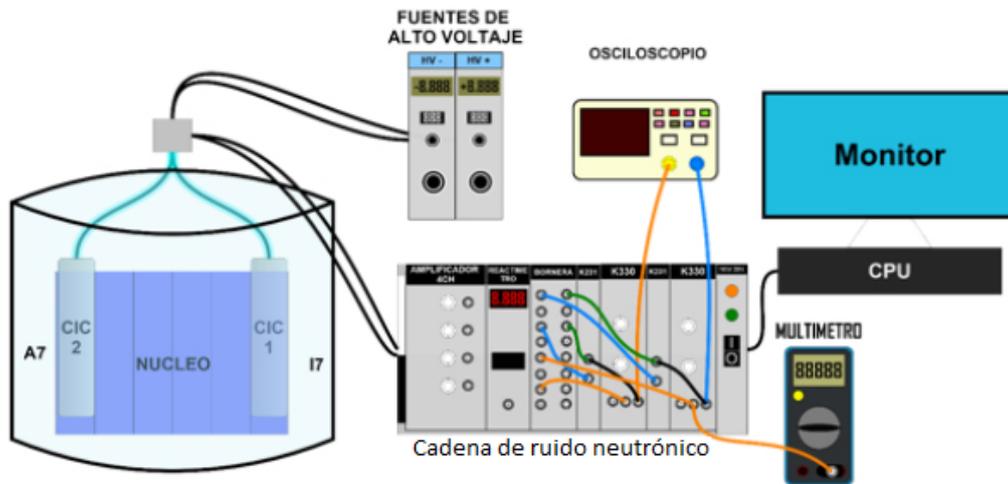


**Figura 5.4:** Disposición esperada de las CIC PRE-PES-5.



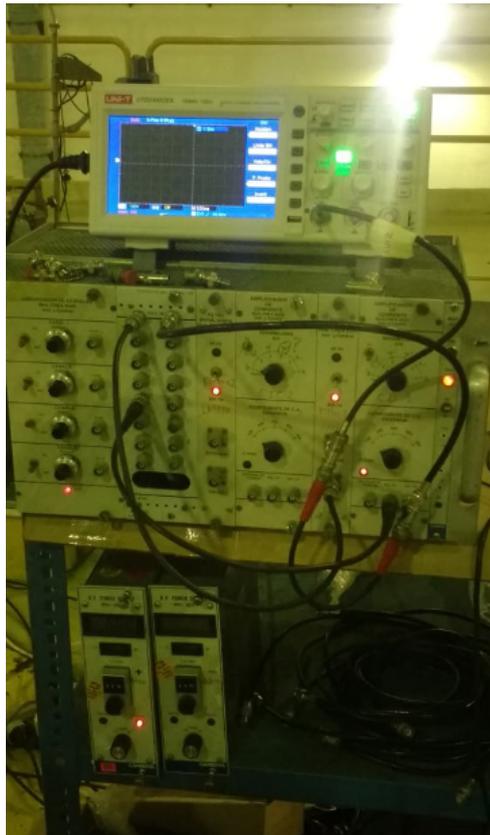
**Figura 5.5:** Disposición real de las CIC PRE-PES-5.

Las CIC serán conectadas al sistema de medición siguiendo el esquema mencionado en el Capítulo 4.2, donde el resultado esperado es el que se muestra en la -Figura 5.6-.



**Figura 5.6:** Configuración esperada del sistema de medición [18]

La configuración esperada es montada en boca de tanque, buscando reducir los espacios para salvaguardar el orden y la seguridad en la medición. En la -Figura 5.7- se puede apreciar la disposición real del sistema de medición.



**Figura 5.7:** Configuración real del sistema de medición.

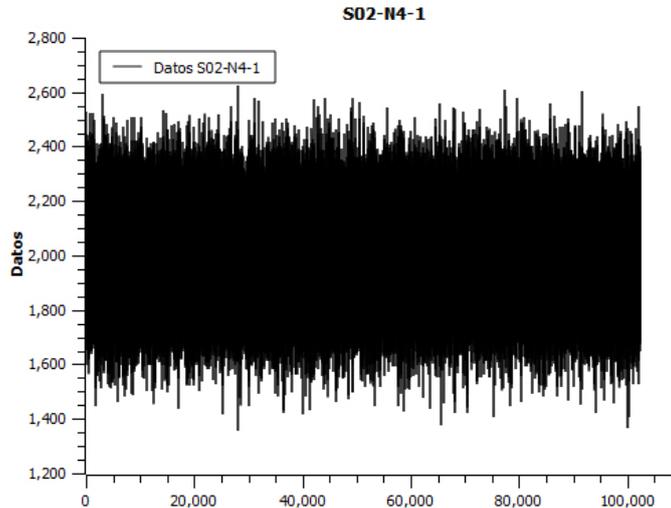
Una vez montado el sistema en general, se energizan las cámaras con +400 V y -400 V. La medición puede ser llevada a cabo por dos frecuencias de muestreo en específico siendo estas 80 Hz y 400 Hz, las cuales son elegidas según nuestro interés.

Las mediciones a 400 Hz nos permiten obtener mayor detalle en la medición, lo cual es necesario al momento de estimar la constante de decaimiento  $\alpha_I$ . Por otro lado, las mediciones a 80 Hz nos facilita la inmediatez de los resultados, siendo suficiente para estimar la potencia térmica.

Una vez en funcionamiento, cada una de las CIC mide la corriente eléctrica que generan los neutrones presentes en el reactor. Esta corriente eléctrica es transformada en voltaje mediante un resistencia "Z". El voltaje obtenido es separado en su parte continua y discreta (ruido), siendo la parte discreta amplificada por una constante "k". Estos valores son introducidos al ADC para convertir la señal analógica (voltaje) en digital. El ADC utilizado presenta una resolución de 12 bits, permitiendo obtener la señal digital entre valores fluctuantes que van desde el 0 hasta el 4095.

Cada una de las CIC presenta dos canales de medición, donde se recopilan 100 mediciones de 512 historias para cada una de las cámaras. Es decir, que cada cámara recopila 51200 datos de las mediciones, los cuales son almacenados en archivos de extensión .RUI para luego poder ser procesados. En la -Figura 5.8- se muestra la gráfica de los datos de una medición realizada, ésta corresponde al archivo S02 - 4 - 1.RUI.

Normalmente se utiliza el programa FERCIN-3 para realizar el tratamiento de los datos y la estimación de la potencia térmica; este es un programa validado y elaborado por la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA-Argentina).



**Figura 5.8:** Gráfica de datos del archivo S02-4-1.RUI.

Sin embargo, estos valores de ruido fueron tratados mediante un algoritmo que fue elaborado como parte de este trabajo, donde se estimaron los parámetros de las CIC, así como la constante  $\alpha_I$  y la potencia térmica del reactor. En el siguiente capítulo se tratará más a fondo lo mencionado.

Por otro lado, como se mencionó, el reactor cuenta con una CIC propia del sistema en conjunto llamada cámara de marcha 4 (CM4), esta cámara se encuentra en la periferia del tanque con la finalidad de no sufrir daño por efecto de la radiación. Es precisamente la CM4 la que se calibró para medir la potencia térmica, mediante las

estimaciones realizadas con las CIC introducidas.

# Capítulo 6

## Algoritmo para el Procesado de Ruido Neutrónico

### 6.1. Introducción

En este apartado se describe el algoritmo elaborado para la estimación de la potencia térmica y la constante  $\alpha_I$ . Así como también se estiman los parámetros asociados a las CIC. Este algoritmo fue elaborado en Python 3.7 y presenta una interfaz gráfica que facilita su operación.

### 6.2. Uso de Python

Python es un lenguaje de programación de alta jerarquía, multidisciplinario, que puede ser utilizado para el desarrollo de software científico. En los últimos años se ha venido incrementando su uso debido a su sencillez y a que se presenta como un software de uso libre, es decir que no se requiere pagar derecho de uso. [24].

La versatilidad de este lenguaje radica en las facilidades con la que cuenta para la programación orientada a objetos. La programación orientada a objetos (POO) es un modelo de programación que permite representar entidades agrupando datos y métodos para luego hacerlos interaccionar [24], [25].

### 6.3. Fundamento físico del procesado de ruido neutrónico

Como se mencionó, el proceso primario de la cadena de medición es convertir la corriente  $I(t)$  en un voltaje  $V(t)$  mediante una resistencia  $Z$ . Luego se separa la componente continua de la fluctuante ( $\delta V(t)$ ) y esta se multiplica por un factor "k" para amplificarla. Obteniéndose una componente fluctuante amplificada con la forma  $\delta V'(t) = k\delta V(t)$  [4], [10].

Utilizando parte de la -Ecuación 3.22- y tomando "historias" de duración  $T_0$ , don-

de para "l" historias se obtiene:

$$APSD_{(w_l)}^V = 2 \frac{\delta V'(w_l) * \delta V'(w_l)}{k^2 T_0 F_s^2} \quad (6.1)$$

Donde:  $\delta V'(w_l)$  es la transformada de Fourier de  $\delta V'(t_l)$  y  $F_s$  es la frecuencia de muestreo que se obtuvo del análisis dimensional.

Si en general se toman "M" historias de duración  $T_0$  durante un tiempo  $T_M$ , con una frecuencia de muestreo  $F_s$ , para cada historia "l" se obtendrán  $2n_p$  pares de valores debido a los dos canales con los que se está trabajando. Sin embargo, como consecuencia de la aplicación de la Transformada de Fourier éstos se reducen a  $n_p$  valores en un ancho de banda ( $BW$ ) (para nuestro caso  $n_p = 256$ ), generándose las siguientes relaciones [4], [10]:

$$T_M = MT_0 \quad (6.2)$$

$$\Delta f = \frac{BW}{n_p} = \frac{1}{T_0} \quad (6.3)$$

$$F_s = 2BW \quad (6.4)$$

Por otro lado, tomando en consideración la linealidad del amplificador, lo cual asegura la proporcionalidad entre la entrada  $I(t)$  y la salida  $V(t)$ , utilizando como base la -Ecuación 3.28- se obtiene que [4], [10]:

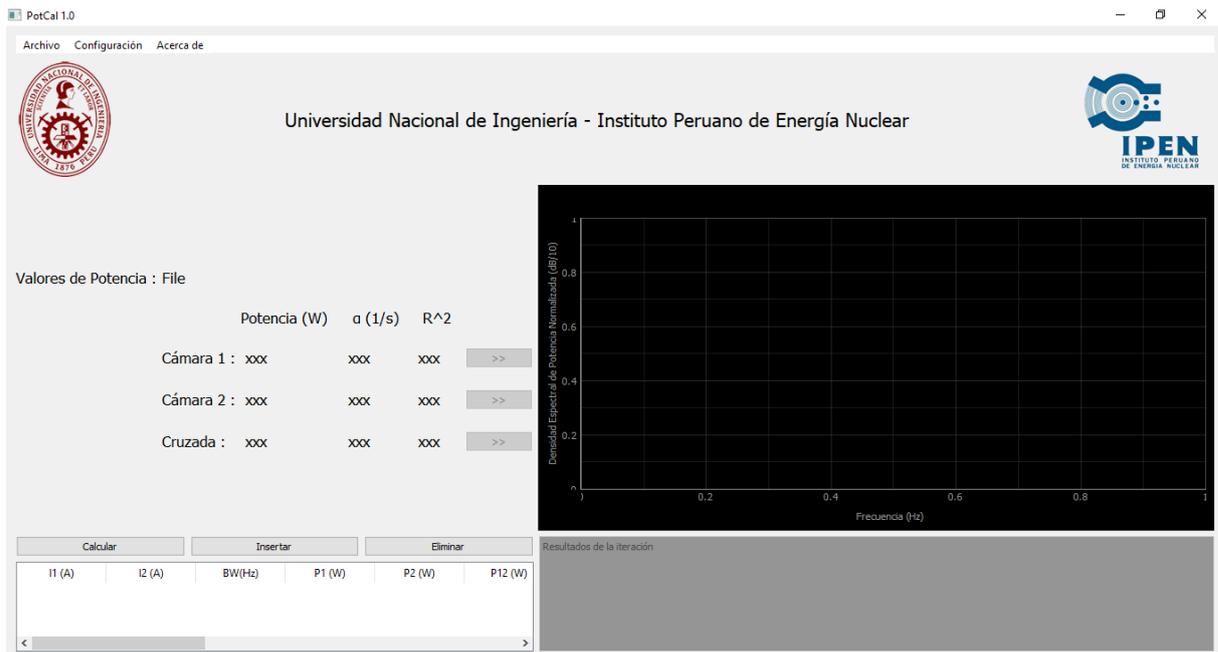
$$NAPSD_{(w)}^{(I)} = NAPSD_{(w)}^{(V)} = \frac{APSD_{(w)}^{(V)}}{V^2} \quad (6.5)$$

## 6.4. Conformación del algoritmo

Como se hizo mención, el algoritmo fue elaborado en Python 3.7, consta de un archivo principal denominado *Principal.py* y de dos módulos desarrollados específicamente para el presente trabajo, los cuales se denominaron: *Minimos.py* y *Gauss.py*.

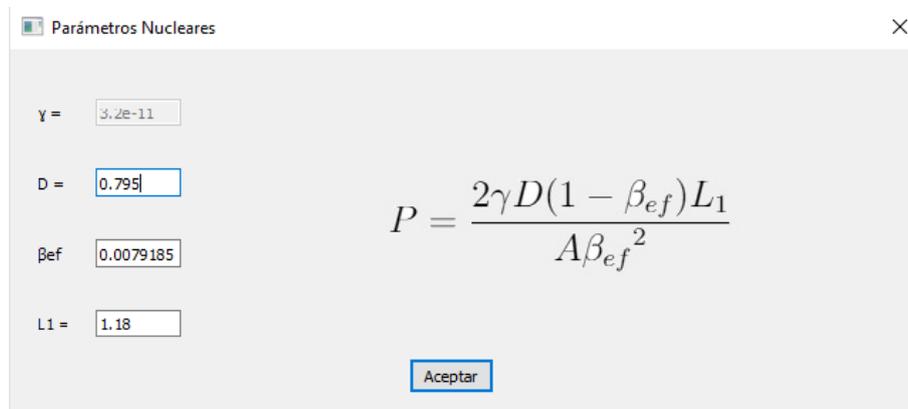
### 6.4.1. Principal.py

Como su nombre lo indica es el script principal, en su interior se dispone inicialmente la codificación del diseño de la ventana principal. Este se muestra en la -Figura 6.1-.



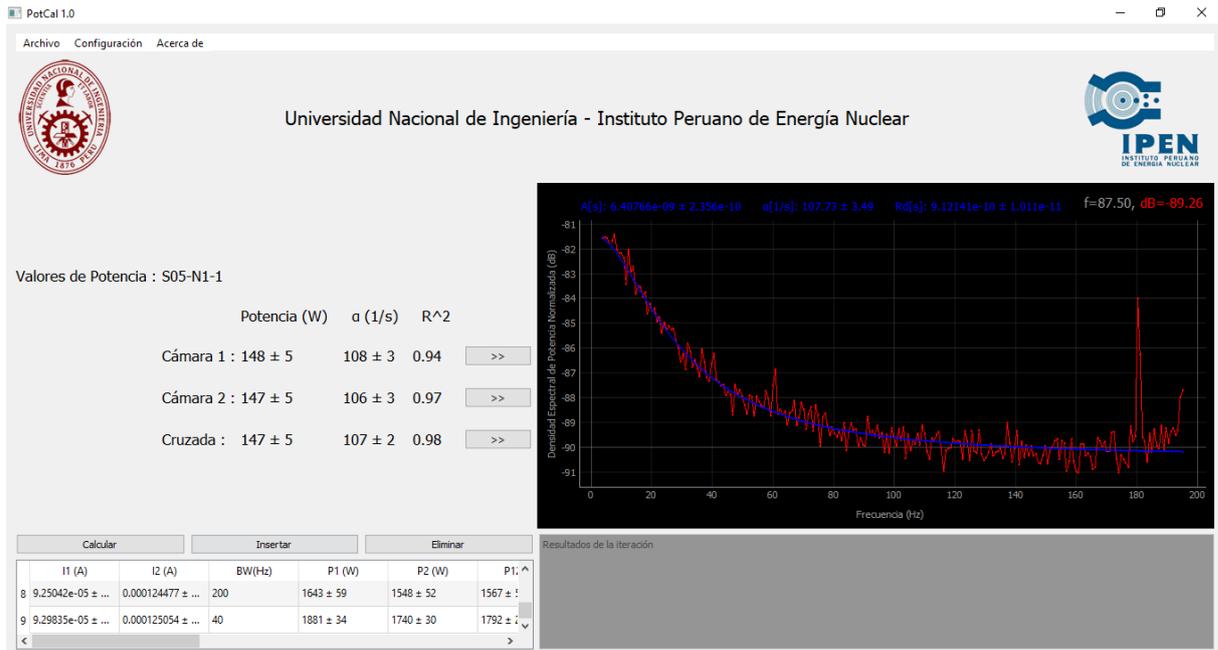
**Figura 6.1:** Ventana Principal.

Cuenta con una barra de menú conformada por: *Archivo*, *Configuración* y *Acerca de*. En el menú de Configuración se cuenta con la opción de *Parámetros Nucleares*, este apartado nos abre una ventana secundaria donde se puede modificar algunas variables, tal y como se muestra en la -Figura 6.2-.



**Figura 6.2:** Ventana secundaria de los parámetros nucleares.

En el menú Archivo se cuenta con la opción *Abrir Archivo*, como su nombre lo indica este nos permitirá insertar los archivos *.RUI*, los cuales serán procesados mediante el algoritmo elaborado y ajustado con la ecuación respectiva. Observar -Figura 6.3-.



**Figura 6.3:** Ajuste a la curva experimental.

Notamos que en la parte superior se muestra el ajuste a los coeficientes de interés, mientras que en los resultados se muestran los valores de potencia térmica, constante de los neutrones instantáneos y el coeficiente de determinación. Así mismo, contamos con una tabla en la parte inferior para poder insertar los resultados obtenidos.

## 6.4.2. Minimos.py

Este módulo fue desarrollado para poder ajustar curvas mediante mínimos cuadrados lineales usando el método de la matriz inversa.

### Mínimos cuadrados lineales (Método matriz inversa)

Definimos el siguiente arreglo matemático [26]:

$$y = a_0 z_0 + a_1 z_1 + a_2 z_2 + \dots + a_m z_m + e \quad (6.6)$$

Donde:  $z_0, z_1, \dots, z_m$  son  $m + 1$  funciones diferentes, mientras que  $a_0, a_1, \dots, a_m$  son coeficientes lineales que ajustan la función  $y$  tal que la suma de los errores es mínima, es decir  $\sum_{i=1}^n e_i^2 = \min$  [26], [27]. Podemos expresar la Ecuación 6.6- matricialmente de la siguiente manera:

$$\{Y\} = [Z]\{A\} + \{E\} \quad (6.7)$$

Donde:

$$\{Y\}^T = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_n]$$

$$\{A\}^T = [a_0 \ a_1 \ \dots \ a_m]$$

$$\{E\}^T = [e_1 \ e_2 \ \dots \ e_n]$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} z_{01} & z_{11} & \dots & z_{m1} \\ z_{02} & z_{12} & \dots & z_{m2} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ z_{0n} & z_{1n} & \dots & z_{mn} \end{bmatrix}$$

Los valores de los coeficientes  $\{A\}$  se obtuvieron mediante el siguiente arreglo [26] :

$$\{A\} = [[Z]^T[Z]]^{-1}\{[Z]^T\{Y\}\} \quad (6.8)$$

Si las mediciones  $y$  presentan desviaciones estándar, éstas han de ser incorporadas en el cálculo mediante las ponderaciones de sus respectivas mediciones. La nueva ecuación a minimizar queda como [27], [28] :

$$\sum_{i=1}^n \frac{e_i^2}{\sigma_i^2} = \min \quad (6.9)$$

También puede expresarse de la siguiente forma [26], [27], [28] :

$$\sum_{i=1}^n \frac{\left(y_i - \sum_{j=0}^m a_j z_{ji}\right)^2}{\sigma_i^2} = \min \quad (6.10)$$

Por simplicidad utilizamos en el presente módulo:

$$\sum_{i=1}^n g_i^2 \left(y_i - \sum_{j=0}^m a_j z_{ji}\right)^2 = \min \quad (6.11)$$

Se define la suma de los cuadrados de los residuos como  $S_r$  [26] :

$$S_r = \sum_{i=1}^n \left(y_i - \sum_{j=0}^m a_j z_{ji}\right)^2 \quad (6.12)$$

Así mismo, se define el error estándar del estimado como  $S_{y/x}$  [26] :

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{S_r}{n-2}} \quad (6.13)$$

Con  $n$  como el número de mediciones.

Por otro lado, se define la suma total de los cuadrados de las diferencias entre los datos y la media como  $S_t$  [26] :

$$S_t = \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad (6.14)$$

Con  $\bar{y}$  como la media de las mediciones.

Lo mencionado nos permite dar forma al coeficiente de determinación mediante  $r^2$

[26] :

$$r^2 = \frac{S_t - S_r}{S_t} \quad (6.15)$$

Para la estimación de las desviaciones estándar asociadas al ajuste, donde se han involucrado las ponderaciones por las desviaciones estándar asociadas a la medición, se define la matriz covariante de la siguiente forma  $[\sigma_{a_{ij}}^2]$  [26], [27] :

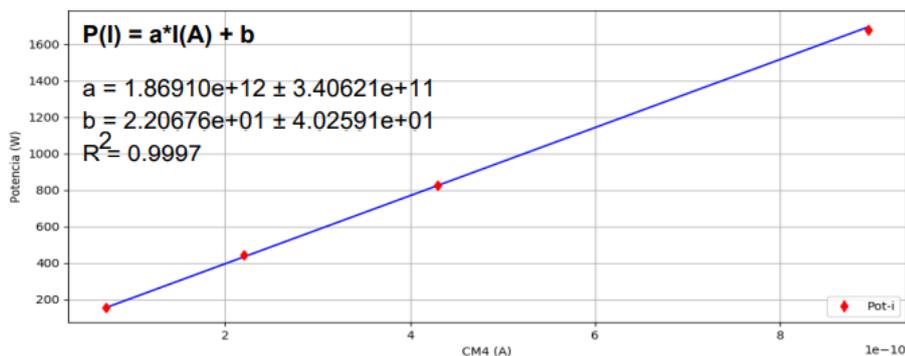
$$[\sigma_{a_{ij}}^2] = [[Z]^T [Z]]^{-1} S_{y/x}^2 \quad (6.16)$$

Se sabe que la raíz cuadrada de los elementos de la diagonal de la matriz covariante expresa la desviación estándar asociada al ajuste de los diferentes coeficientes respectivamente [26], [27], [28]. En la -Figura 6.4- se muestra un ejemplo de estimación mediante el módulo descrito.

```
>>> import Minimos
>>> X=[7.133333333e-11, 2.2e-10, 4.3e-10, 8.95e-10]
>>> Y=[155, 446, 824, 1680]
>>> sigma=[2, 10, 14, 28]
>>> a, cov, R=Minimos.Cuadrados(X,Y,sigma,1)
>>> a
array([2.20676239e+01, 1.86910039e+12])
>>> cov
array([[ 1.62079741e+03, -1.01784745e+13],
       [-1.01784745e+13,  1.16022987e+23]])
>>> R
0.9997049065102588
```

**Figura 6.4:** Ejemplo de ajuste por módulo Minimos.py.

La correspondiente gráfica asociada al ajuste es la que se muestra en la -Figura 6.5-.



**Figura 6.5:** Gráfica de ajuste por el módulo Minimos.py.

### 6.4.3. Gauss.py

Este módulo fue desarrollado para ajustar curvas mediante el método de mínimos cuadrados no lineales usando el criterio *Gauss-Newton*.

## Mínimos cuadrados no lineales (Método Gauss-Newton)

Definimos el siguiente arreglo matemático [26] :

$$y_i = f(x_i; a_0, a_1, \dots, a_m) + e_i \quad (6.17)$$

Debido a que la función  $f(x_i)$  no puede ser linealizada se expande mediante una serie de Taylor de la siguiente forma [26]:

$$f(x_i)_{j+1} = f(x_i)_j + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_0} \Delta a_0 + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_1} \Delta a_1 \quad (6.18)$$

Reemplazando la -Ecuación 6.18- en la -Ecuación 6.17- tenemos:

$$y_i - f(x_i)_j = \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_0} \Delta a_0 + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_1} \Delta a_1 + e_i \quad (6.19)$$

Su representación matricial, análoga a la -Ecuación 6.7-, es de la siguiente forma [26]:

$$\{D\} = [Z_j]\{\Delta A\} + \{E\} \quad (6.20)$$

Donde:

$$\{D\} = \begin{Bmatrix} y_1 - f(x_1) \\ y_2 - f(x_2) \\ \vdots \\ y_n - f(x_n) \end{Bmatrix}$$

$$\{\Delta A\} = \begin{Bmatrix} \Delta a_0 \\ \Delta a_1 \\ \vdots \\ \Delta a_m \end{Bmatrix}$$

$$\{Z_j\} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial a_0} & \frac{\partial f_1}{\partial a_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial a_m} \\ \frac{\partial f_2}{\partial a_0} & \frac{\partial f_2}{\partial a_1} & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial a_m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial a_0} & \frac{\partial f_n}{\partial a_1} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial a_m} \end{bmatrix}$$

Los valores de los coeficientes  $\{\Delta A\}$  son obtenidos mediante el siguiente arreglo [26], [27] :

$$\{\Delta A\} = [[Z_j]^T [Z_j]]^{-1} \{[Z_j]^T \{D\}\} \quad (6.21)$$

Sin embargo, los valores obtenidos se tienen que sumar a las condiciones iniciales [26], [27].

$$a_{m,j+1} = a_{m,j} + \Delta a_m \quad (6.22)$$

Debido a que las mediciones  $y_i$  presentan desviaciones estándar, éstas deben de ser agregadas al cálculo, por lo tanto, la ecuación a minimizar está dada por [26], [27], [28]:

$$\sum_{i=1}^n \frac{\left(y_i - \sum_{j=0}^m f(x_i)_j\right)^2}{\sigma_i^2} = \min \quad (6.23)$$

Por simplicidad utilizamos:

$$\sum_{i=1}^n g_i^2 \left(y_i - \sum_{j=0}^m f(x_i)_j\right)^2 = \min \quad (6.24)$$

De la misma manera, se define el error estándar del estimado como  $S_{y/x}$  [26] :

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{S_r}{n - (m + 1)}} \quad (6.25)$$

Con  $n$  como el número de mediciones y  $m + 1$  como el número de parámetros a ajustar. Es necesario indicar que las -Ecuaciones 6.12, 6.14, 6.15 y 6.16- se repiten para este apartado. En la -Figura 6.6- se muestra un ejemplo de uso con el módulo *Gauss.py*.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.figure import Figure
import Gauss

f=np.loadtxt('Frecuencia.txt')
NAPDS=np.loadtxt('Naa.txt')
Inc=np.loadtxt('Inc.txt')

t=f
Y=NAPDS
sigma=Inc

def func(t,A1,alfal,Rd1):
    return (A1/(1+(2*np.pi*t/alfal)**2))+Rd1

P = [1e-04, 50, 1e-04]
Dat, Cov, R=Gauss.Newton(func,t,Y,P, sigma)
Nap=(Dat[0]/(1+(2*np.pi*t/Dat[1])**2))+Dat[2]
print(Dat)
print(Cov)
print(R)
plt.plot(f,10*np.log10(NAPDS), 'r', f, 10*np.log10(Nap) , 'b')
plt.xlabel("Frecuencia (Hz)")
plt.ylabel("NAPSD (dB)")
plt.show()
[1.98981689148453e-09, 111.42775511007859, 2.781652405406908e-10]
[[ 1.23729333e-21 -7.00007853e-11  3.91544792e-24]
 [-7.00007853e-11  9.02571720e+00 -1.14894484e-11]
 [ 3.91544792e-24 -1.14894484e-11  5.65690874e-23]]
0.9588000002677822
```

**Figura 6.6:** Ejemplo de ajuste por el módulo Gauss.py.

La gráfica correspondiente al ajuste asociado es la que se muestra en la -Figura 6.7-.

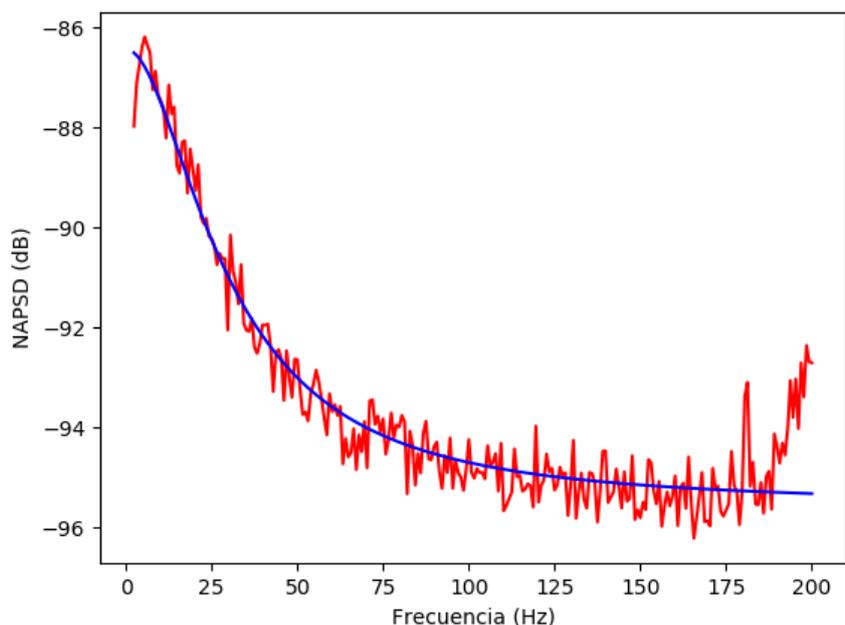


Figura 6.7: Gráfica de ajuste por módulo Gauss.py.

## 6.5. Descripción del algoritmo elaborado

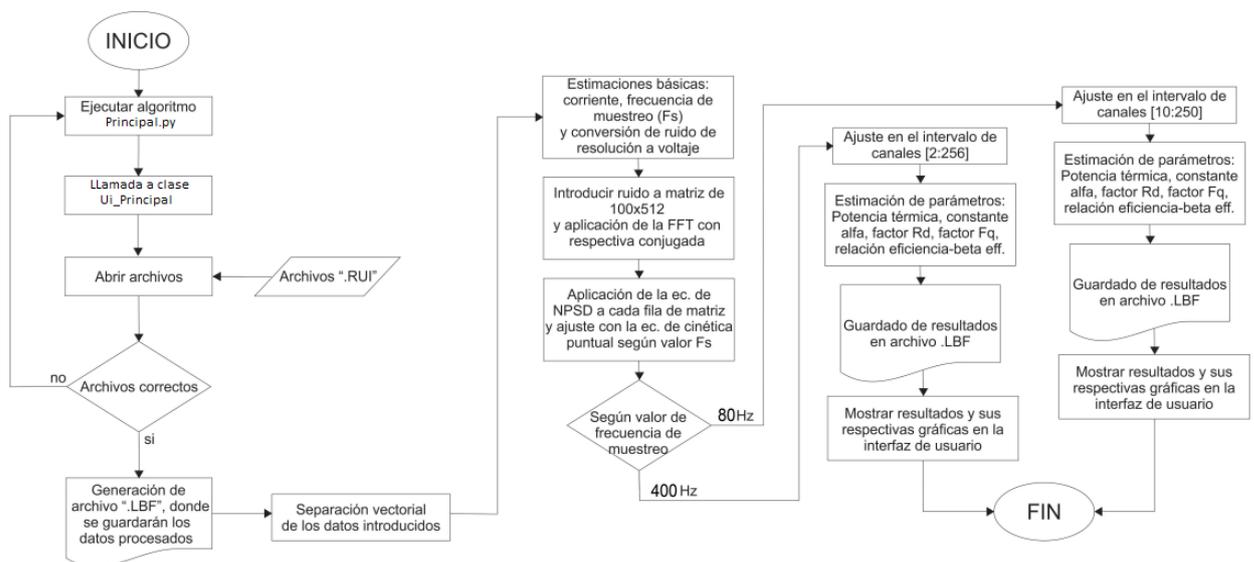
El código inicial *Principal.py* al ser ejecutado sigue las siguientes instrucciones:

- **Llama a la clase *Ui\_Principal***, donde se da paso a la construcción de la interfaz así como a la generación de las funciones básicas del programa.
- **Insertar archivos .RUI**, lo cual se realiza mediante la opción del menú "Abrir Archivo".
- **Generar archivos .LBF** con el nombre de los archivos abiertos, esto es para poder guardar los datos procesados y estimados. Si en caso se abren archivos que no son .RUI, el programa muestra el error y vuelve al inicio.
- **Separación de datos y procesamiento**, esto permite obtener variables fundamentales como: corriente, frecuencia de muestreo ( $F_S$ ), factor de amplificación "k", etc. Luego de ello se prosigue con el procesamiento, como la separación de datos en matrices y aplicaciones de la FFT (Transformada Rápida de Fourier), así como la aplicación de la ecuación NAPSD para los datos de ruido.
- **Ajuste según frecuencia de muestreo** ya que las mediciones son realizadas con dos frecuencias diferentes, las cuales son para distintos fines, es decir: la frecuencia de 80 Hz está enfocada en la estimación de potencia, mientras que la de 400 Hz está enfocada en la estimación de la constante alfa; esto es debido a que mayor precisión se obtiene con una mayor frecuencia de muestreo. Conllevando de esta forma a un procesamiento diferente, para 80 Hz se realiza un ajuste en el intervalo de datos [10:250]. Para 400 Hz el ajuste es en el intervalo de [2:256].
- **Estimación de parámetros**, lo cual es permitido bajo el ajuste entre las - Ecuaciones 3.27 y 6.1-, que se realiza gracias a los módulos desarrollados y explicados anteriormente. Se estiman: potencia térmica, constante alfa, factor Rd,

factor  $f^{(a)}$ , relación  $\varepsilon/\beta_{eff}^2$ . Estos mismos módulos nos proporcionan la matriz covariante de donde obtendremos las desviaciones estándar.

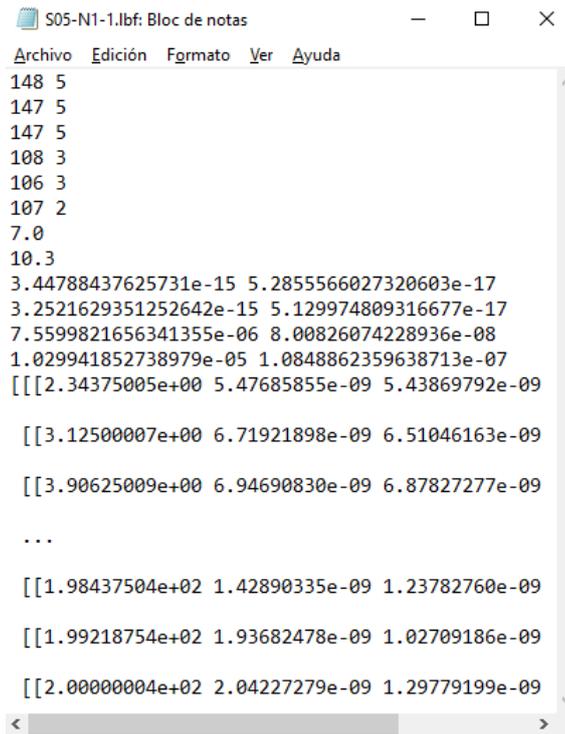
- **Guardado de estimaciones y procesado**, los cuales se guardaron en los archivos .LBF creados al inicio. Los datos guardados son los parámetros estimados así como también los datos de las NPSD obtenidas.
- **Gráfica y mención de los resultados**, los cuales se muestran en la interfaz gráfica abierta.

La descripción del código elaborado puede ser explicado mediante el siguiente diagrama de flujo mostrado en la -Figura 6.8-.



**Figura 6.8:** Diagrama de flujo del algoritmo elaborado.

En la -Figura 6.9- se muestra el archivo correspondiente a la medición procesada.



```
S05-N1-1.lbf: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
148 5
147 5
147 5
108 3
106 3
107 2
7.0
10.3
3.44788437625731e-15 5.2855566027320603e-17
3.2521629351252642e-15 5.129974809316677e-17
7.5599821656341355e-06 8.00826074228936e-08
1.029941852738979e-05 1.0848862359638713e-07
[[[2.34375005e+00 5.47685855e-09 5.43869792e-09

[[[3.12500007e+00 6.71921898e-09 6.51046163e-09

[[[3.90625009e+00 6.94690830e-09 6.87827277e-09

...

[[[1.98437504e+02 1.42890335e-09 1.23782760e-09

[[[1.99218754e+02 1.93682478e-09 1.02709186e-09

[[[2.00000004e+02 2.04227279e-09 1.29779199e-09
```

**Figura 6.9:** Archivo *S05-N1-1.LBF*.

# Capítulo 7

## Resultados y Análisis

### 7.1. Introducción

En este apartado se presentan los resultados y análisis obtenidos del procesamiento de ruido neutrónico por medio del programa elaborado en el presente trabajo, donde las ecuaciones utilizadas para la estimación de las incertidumbres se muestran en el -Apendice D-.

Inicialmente se muestra los resultados obtenidos con el núcleo número 48 que corresponde a la PRE-PES. Posterior a ello, se muestra los resultados obtenidos con el núcleo número 8.

Los resultados del núcleo número 48 fueron comparados con los obtenidos por el programa FERCIN-3. Mientras que los resultados obtenidos del núcleo número 8 fueron validados por la comparación entre los factores de calibración estimados por ruido neutrónico y balance térmico. Esta última es una técnica ampliamente utilizada para medir potencia térmica en intervalos altos de la misma.

### 7.2. Resultados para el núcleo número 48

Como se indicó en el -Capítulo 5- para este núcleo se realizó el grupo de mediciones denominado PRE-PES-5.

#### 7.2.1. PRE-PES-5

Las posiciones elegidas para esta medición fueron las A7 e I7, para la CIC-1 y CIC-2 respectivamente. Los resultados obtenidos por nuestro algoritmo se muestran en la -Tabla 7.1-, mientras que los resultados obtenidos por el programa FERCIN-3 en la -Tabla 7.2-. Todos los valores de incertidumbres presentes en este apartado son reportados con un factor de cobertura  $k = 1$ .

**Tabla 7.1:** Mediciones PRE-PES-5 con algoritmo elaborado.

Item	Detector	BW(Hz)	I (A)	CM4 (A)	$f^{(q)}$ (C)	$\alpha$ (Hz)	$\frac{\epsilon}{\beta^2}$	Potencia (W)
S05-1-1	CIC 1	200	$6.65(7) \times 10^{-6}$	$7.10(1) \times 10^{-11}$	$3.03(7) \times 10^{-15}$	108(3)	7	148(5)
	CIC 2		$1.03(1) \times 10^{-5}$		$3.25(7) \times 10^{-15}$	106(3)	10	147(5)
	Cruzada		—		—	107(2)	—	147(5)
S05-1-2	CIC 1	200	$6.69(7) \times 10^{-6}$	$7.10(1) \times 10^{-11}$	$3.04(7) \times 10^{-15}$	110(3)	7	151(5)
	CIC 2		$1.03(1) \times 10^{-5}$		$3.23(7) \times 10^{-15}$	110(3)	10	154(5)
	Cruzada		—		—	113(2)	—	155(5)
S05-1-3	CIC 1	40	$6.79(7) \times 10^{-6}$	$7.20(1) \times 10^{-11}$	$3.41(38) \times 10^{-15}$	112(5)	6	163(3)
	CIC 2		$1.05(1) \times 10^{-5}$		$2.97(53) \times 10^{-15}$	118(5)	10	167(3)
	Cruzada		—		—	114(2)	—	164(2)
S05-2-1	CIC 1	200	$2.38(2) \times 10^{-5}$	$2.20(1) \times 10^{-10}$	$3.34(7) \times 10^{-15}$	106(3)	8	454(17)
	CIC 2		$3.31(3) \times 10^{-5}$		$3.55(8) \times 10^{-15}$	110(3)	10	436(15)
	Cruzada		—		—	107(2)	—	436(14)
S05-2-2	CIC 1	200	$2.39(2) \times 10^{-5}$	$2.20(1) \times 10^{-10}$	$3.30(7) \times 10^{-15}$	107(3)	7	473(16)
	CIC 2		$3.32(3) \times 10^{-5}$		$3.63(8) \times 10^{-15}$	108(3)	10	440(15)
	Cruzada		—		—	110(2)	—	456(13)
S05-3-1	CIC 1	200	$4.47(5) \times 10^{-5}$	$4.30(1) \times 10^{-10}$	$3.32(7) \times 10^{-15}$	107(3)	8	835(29)
	CIC 2		$6.09(6) \times 10^{-5}$		$3.48(8) \times 10^{-15}$	111(3)	11	788(26)
	Cruzada		—		—	108(2)	—	802(25)
S05-3-2	CIC 1	40	$4.48(5) \times 10^{-5}$	$4.30(1) \times 10^{-10}$	$4.18(41) \times 10^{-15}$	107(4)	6	900(17)
	CIC 2		$6.12(7) \times 10^{-5}$		$4.02(53) \times 10^{-15}$	108(4)	9	821(14)
	Cruzada		—		—	110(2)	—	845(13)
S05-4-1	CIC 1	200	$9.25(9) \times 10^{-5}$	$8.90(1) \times 10^{-10}$	$3.21(7) \times 10^{-15}$	104(3)	8	1643(59)
	CIC 2		$1.24(1) \times 10^{-4}$		$3.41(8) \times 10^{-15}$	103(3)	11	1548(52)
	Cruzada		—		—	100(2)	—	1567(50)
S05-4-2	CIC 1	40	$9.29(12) \times 10^{-5}$	$9.00(1) \times 10^{-10}$	$3.49(44) \times 10^{-15}$	112(5)	7	1881(34)
	CIC 2		$1.25(2) \times 10^{-4}$		$4.01(54) \times 10^{-15}$	108(4)	9	1740(30)
	Cruzada		—		—	109(2)	—	1792(27)

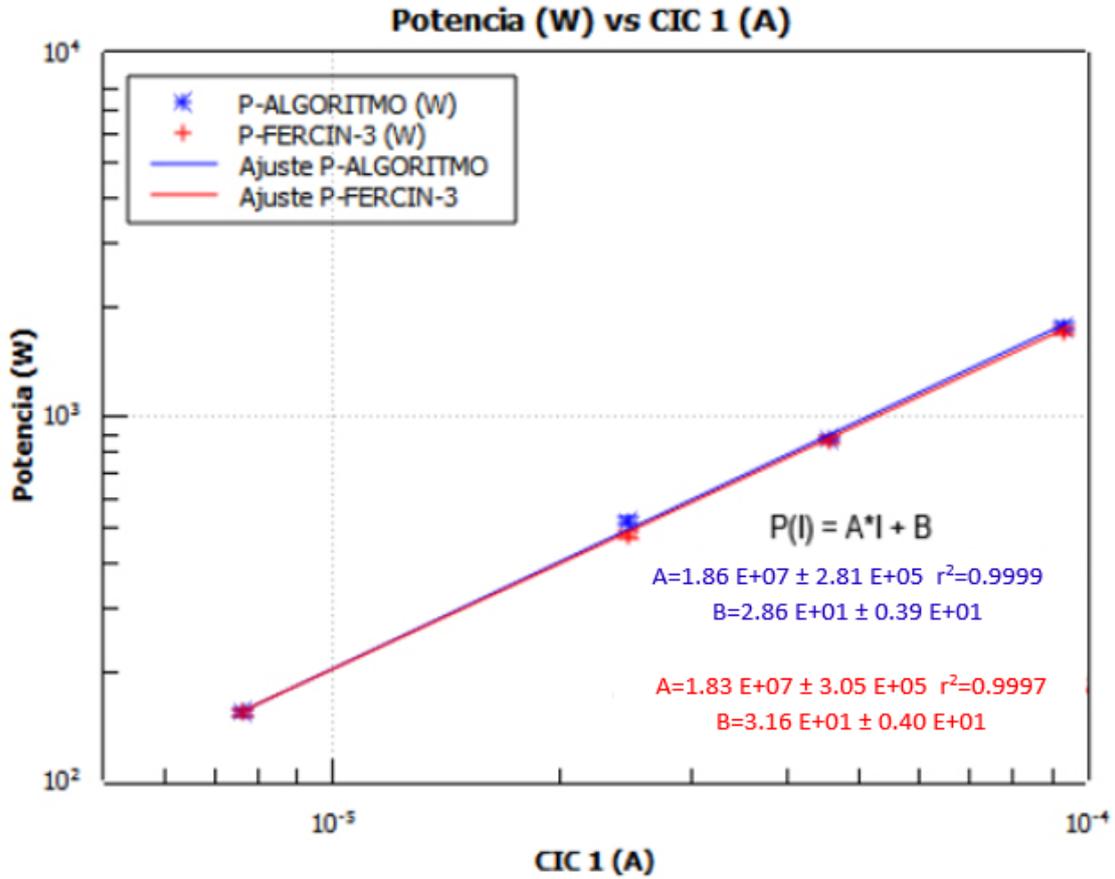
**Tabla 7.2:** Mediciones PRE-PES-5 con FERCIN-3.

Item	Detector	BW(Hz)	I (A)	CM4 (A)	$f^{(q)}$ (C)	$\alpha$ (Hz)	$\frac{\epsilon}{\beta^2}$	Potencia (W)
S05-1-1	CIC 1	200	$6.65(7) \times 10^{-6}$	$7.10(1) \times 10^{-11}$	$3.28(6) \times 10^{-15}$	110(4)	8	154(6)
	CIC 2		$1.03(1) \times 10^{-5}$		$3.11(6) \times 10^{-15}$	110(3)	11	154(5)
	Cruzada		—		—	109(2)	—	156(4)
S05-1-2	CIC 1	200	$6.69(7) \times 10^{-6}$	$7.10(1) \times 10^{-11}$	$3.27(6) \times 10^{-15}$	113(3)	8	158(6)
	CIC 2		$1.03(1) \times 10^{-5}$		$3.05(6) \times 10^{-15}$	114(3)	10	165(5)
	Cruzada		—		—	116(3)	—	166(4)
S05-1-3	CIC 1	40	$6.79(7) \times 10^{-6}$	$7.20(1) \times 10^{-11}$	$3.40(35) \times 10^{-15}$	112(4)	8	151(3)
	CIC 2		$1.05(1) \times 10^{-5}$		$1.62(70) \times 10^{-15}$	123(8)	11	153(3)
	Cruzada		—		—	111(2)	—	156(3)
S05-2-1	CIC 1	200	$2.38(2) \times 10^{-5}$	$2.20(1) \times 10^{-10}$	$3.33(6) \times 10^{-15}$	106(4)	8	475(18)
	CIC 2		$3.31(3) \times 10^{-5}$		$3.44(7) \times 10^{-15}$	110(4)	11	462(17)
	Cruzada		—		—	110(2)	—	482(15)
S05-2-2	CIC 1	200	$2.39(2) \times 10^{-5}$	$2.20(1) \times 10^{-10}$	$3.33(6) \times 10^{-15}$	107(3)	8	466(17)
	CIC 2		$3.32(3) \times 10^{-5}$		$3.47(6) \times 10^{-15}$	108(2)	11	431(15)
	Cruzada		—		—	111(3)	—	460(13)
S05-3-1	CIC 1	200	$4.47(5) \times 10^{-5}$	$4.30(1) \times 10^{-10}$	$3.29(6) \times 10^{-15}$	113(4)	8	901(34)
	CIC 2		$6.09(6) \times 10^{-5}$		$3.41(6) \times 10^{-15}$	113(2)	11	843(28)
	Cruzada		—		—	113(2)	—	887(23)
S05-3-2	CIC 1	40	$4.48(5) \times 10^{-5}$	$4.30(1) \times 10^{-10}$	$3.30(38) \times 10^{-15}$	107(2)	9	812(17)
	CIC 2		$6.12(7) \times 10^{-5}$		$3.62(49) \times 10^{-15}$	103(3)	12	732(15)
	Cruzada		—		—	103(2)	—	783(15)
S05-4-1	CIC 1	200	$9.25(9) \times 10^{-5}$	$8.90(1) \times 10^{-10}$	$3.15(6) \times 10^{-15}$	104(2)	9	1631(61)
	CIC 2		$1.24(1) \times 10^{-4}$		$3.33(6) \times 10^{-15}$	104(3)	12	1541(55)
	Cruzada		—		—	104(3)	—	1613(41)
S05-4-2	CIC 1	40	$9.29(12) \times 10^{-5}$	$9.00(1) \times 10^{-10}$	$2.65(50) \times 10^{-15}$	117(3)	10	1785(43)
	CIC 2		$1.25(2) \times 10^{-4}$		$3.12(55) \times 10^{-15}$	107(4)	13	1596(36)
	Cruzada		—		—	106(3)	—	1732(37)

Continuando con el análisis, promediamos los valores obtenidos para cada CIC en cada nivel de potencia, los resultados obtenidos se muestran en las -Tablas 7.3, 7.4 y 7.5-, con sus respectivas gráficas en las -Figuras 7.1, 7.2 y 7.3-.

**Tabla 7.3:** Potencia (W) vs CIC 1 (A) (PRE-PES-5)

CIC 1 (A)	Potencia Algoritmo (W)	Potencia FERCIN-3 (W)
$6.71(4) \times 10^{-6}$	154(3)	154(3)
$2.38(2) \times 10^{-5}$	464(12)	471(12)
$4.48(3) \times 10^{-5}$	868(17)	857(19)
$9.27(8) \times 10^{-4}$	1762(34)	1708(37)



**Figura 7.1:** Ajuste de la Potencia (W) vs CIC 1 (A) (PRE-PES-5).

De la -Figura 7.1- notamos que:

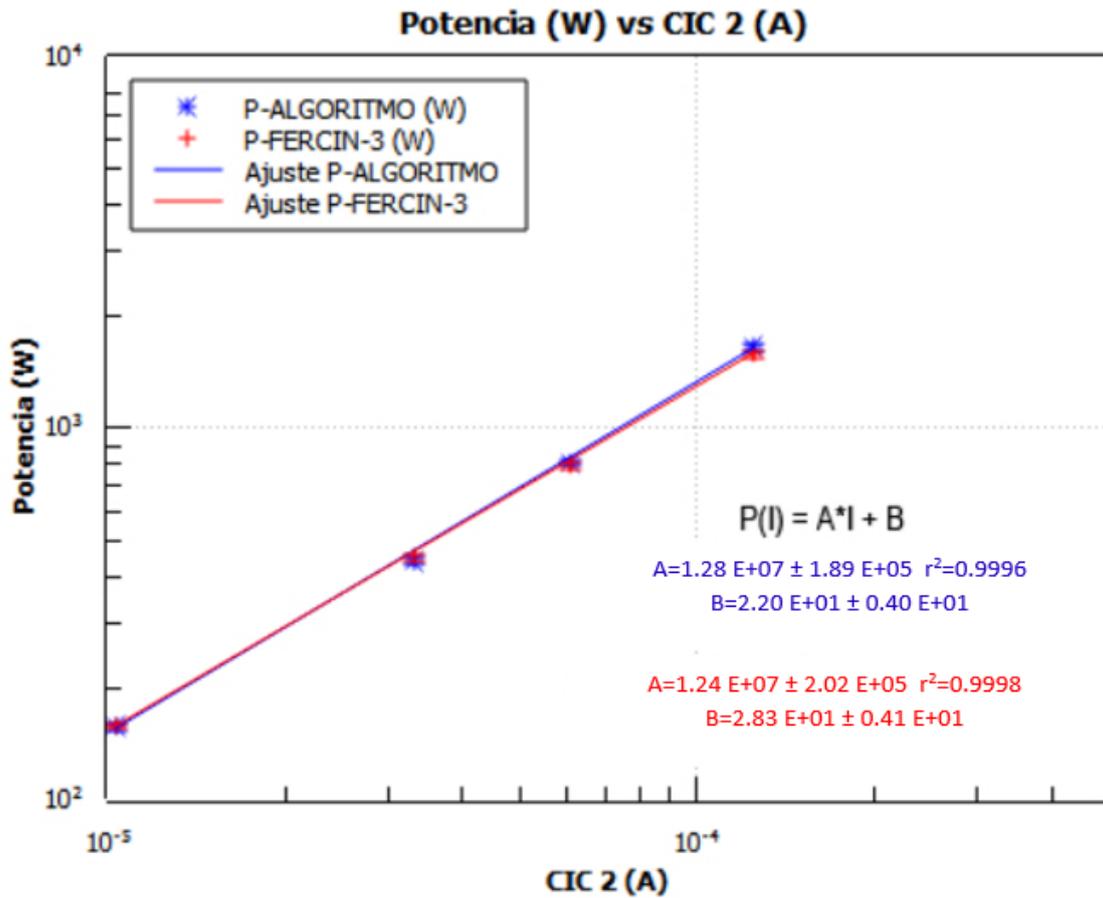
$$\frac{dP_{ALG}}{dI_{CIC1}} = (1,86 \pm 0,03) \times 10^7 W/A \quad (7.1)$$

$$\frac{dP_{FER-3}}{dI_{CIC1}} = (1,83 \pm 0,03) \times 10^7 W/A \quad (7.2)$$

El análisis de los valores obtenidos para la CIC 2, arroja:

**Tabla 7.4:** Potencia (W) vs CIC 2 (A) (PRE-PES-5)

CIC 2 (A)	Potencia Algoritmo (W)	Potencia FERCIN-3 (W)
$1.04(1) \times 10^{-5}$	156(3)	157(3)
$3.32(2) \times 10^{-5}$	438(11)	447(11)
$6.11(4) \times 10^{-5}$	804(15)	788(16)
$1.25(1) \times 10^{-4}$	1644(30)	1569(33)



**Figura 7.2:** Ajuste de la Potencia (W) vs CIC 2 (A) (PRE-PES-5).

De la -Figura 7.2- notamos que:

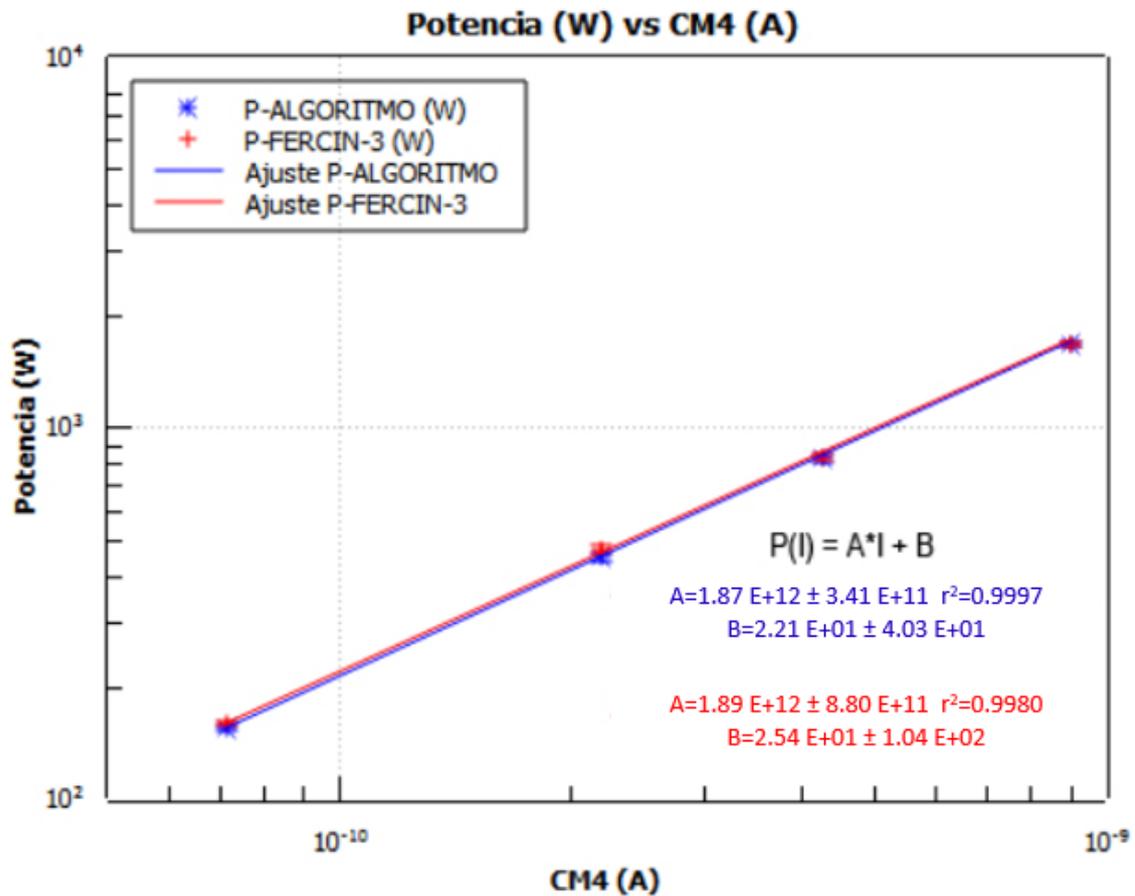
$$\frac{dP_{ALG}}{dI_{CIC2}} = (1,28 \pm 0,02) \times 10^7 W/A \quad (7.3)$$

$$\frac{dP_{FER-3}}{dI_{CIC2}} = (1,24 \pm 0,02) \times 10^7 W/A \quad (7.4)$$

De igual forma ahora realizamos el ajuste entre los valores obtenidos por la correlación cruzada y la corriente del CM4. Los resultados se muestran en la -Tabla 7.5- y se grafican en la -Figura 7.3-.

**Tabla 7.5:** Potencia (W) vs CM4 (A) (PRE-PES-5)

CM4 (A)	Potencia Algoritmo (W)	Potencia FERCIN-3 (W)
$7.13(6) \times 10^{-11}$	155(2)	159(2)
$2.20(7) \times 10^{-10}$	446(10)	471(10)
$4.30(7) \times 10^{-10}$	824(14)	835(14)
$8.95(7) \times 10^{-10}$	1680(28)	1673(28)



**Figura 7.3:** Ajuste de la Potencia (W) vs CM4 (A) (PRE-PES-5).

De la -Figura 7.3- notamos que:

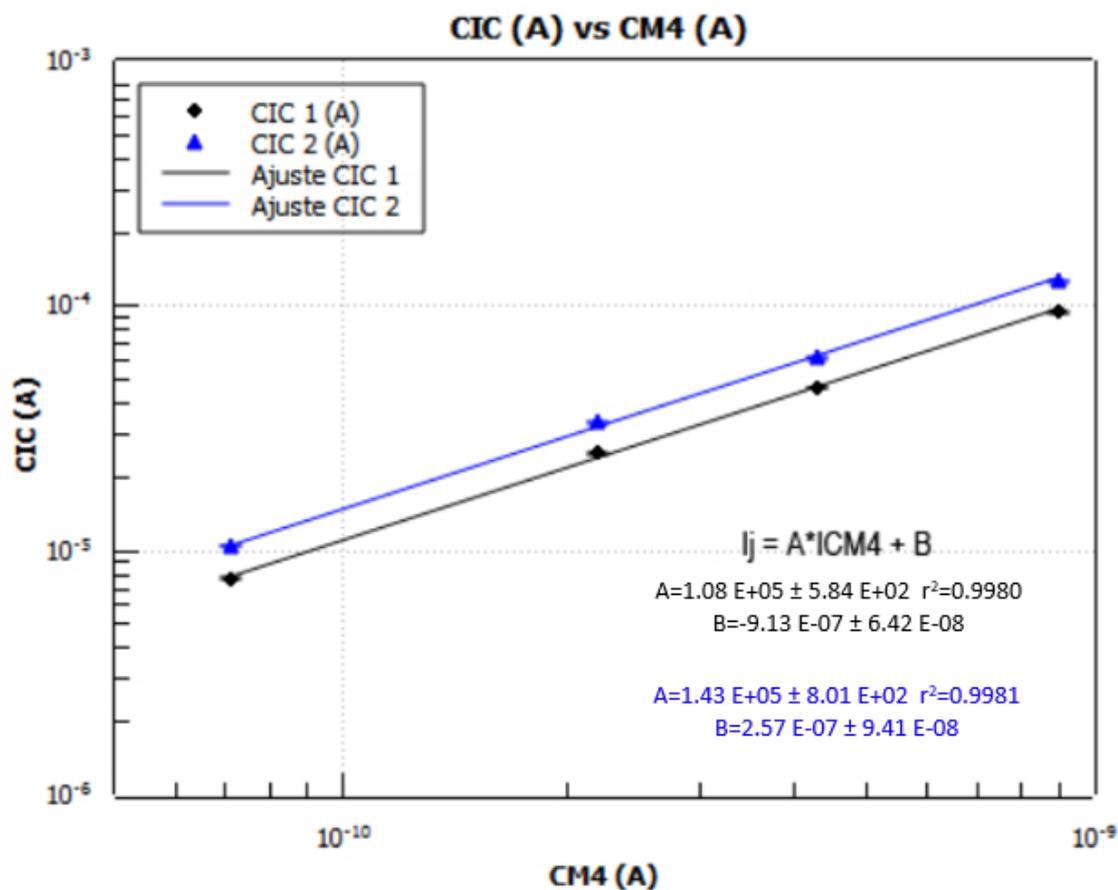
$$\frac{dP_{ALG}}{dI_{CM4}} = (1,87 \pm 0,34) \times 10^{12} W/A \quad (7.5)$$

$$\frac{dP_{FER-3}}{dI_{CM4}} = (1,89 \pm 0,88) \times 10^{12} W/A \quad (7.6)$$

Ahora vamos a hallar la relación entre las CIC y el CM4. Los valores obtenidos se muestran en la -Tabla 7.6- y su representación gráfica se muestra en la -Figura 7.4-.

**Tabla 7.6:** CM4 (A) vs CIC 1 (A)  $\wedge$  CIC 2 (A) (PRE-PES-5)

CM4 (A)	CIC 1 (A)	CIC 2 (A)
$7.13(1) \times 10^{-11}$	$6.71(4) \times 10^{-6}$	$1.04(1) \times 10^{-5}$
$2.20(1) \times 10^{-10}$	$2.38(2) \times 10^{-5}$	$3.32(2) \times 10^{-5}$
$4.30(1) \times 10^{-10}$	$4.48(3) \times 10^{-5}$	$6.11(4) \times 10^{-5}$
$8.95(1) \times 10^{-10}$	$9.27(8) \times 10^{-5}$	$1.25(1) \times 10^{-4}$



**Figura 7.4:** Ajuste de la CIC (A) vs CM4 (PRE-PES-5).

De la -Figura 7.4- obtenemos:

$$\frac{dI_{CIC1}}{dI_{CM4}} = (1,08 \pm 0,06) \times 10^5 \quad (7.7)$$

$$\frac{dI_{CIC2}}{dI_{CM4}} = (1,43 \pm 0,08) \times 10^5 \quad (7.8)$$

Aplicando la regla de la cadena, igualmente que en los casos anteriores para la calibración del CM4, tenemos:

**Tabla 7.7:** Factor de calibración del CM4 (PRE-PES-5)

Cámara	Relación	Valor-ALG	Valor-FER
CIC 1	$dP/dI_{CIC1}$	$1.86(3) \times 10^7 \text{ W/A}$	$1.83(4) \times 10^7 \text{ W/A}$
	$dI_{CIC1}/dI_{CM4}$	$1.08(6) \times 10^5$	
	$dP/dI_{CM4}$	<b><math>2.00(3) \times 10^{12} \text{ W/A}</math></b>	<b><math>1.97(3) \times 10^{12} \text{ W/A}</math></b>
CIC 2	$dP/dI_{CIC2}$	$1.28(2) \times 10^7 \text{ W/A}$	$1.24(2) \times 10^7 \text{ W/A}$
	$dI_{CIC2}/dI_{CM4}$	$1.43(8) \times 10^5$	
	$dP/dI_{CM4}$	<b><math>1.84(3) \times 10^{12} \text{ W/A}</math></b>	<b><math>1.78(3) \times 10^{12} \text{ W/A}</math></b>
CRUZADA	$dP/dI_{CM4}$	<b><math>1.87(34) \times 10^{12} \text{ W/A}</math></b>	<b><math>1.89(88) \times 10^{12} \text{ W/A}</math></b>

El factor de calibración final para la PRE-PES-5 se calcula considerando lo expuesto

en el -Apéndice D.3-, donde resulta ser:

$$\frac{dP_{ALG}}{dI_{CM4}} = 1,91(2) \times 10^{12}W/A \quad (7.9)$$

$$\frac{dP_{FER}}{dI_{CM4}} = 1,86(2) \times 10^{12}W/A \quad (7.10)$$

El análisis de los datos continua con la comparación del factor  $f^q$ , los valores obtenidos se muestran en las -Tablas 7.8 y 7.9- y -Figuras 7.5 y 7.6-.

**Tabla 7.8:**  $f^{(q)}$  (C) vs CIC 1 (A) (PRE-PES-5)

CIC 1 (A)	$f^{(q)}$ Algoritmo (C)	$f^{(q)}$ FERGIN-3 (C)
$6.71(4) \times 10^{-6}$	$3.16(13) \times 10^{-15}$	$3.32(12) \times 10^{-15}$
$2.38(2) \times 10^{-5}$	$3.32(5) \times 10^{-15}$	$3.33(4) \times 10^{-15}$
$4.48(3) \times 10^{-5}$	$3.75(21) \times 10^{-15}$	$3.30(19) \times 10^{-15}$
$9.27(8) \times 10^{-5}$	$3.35(22) \times 10^{-15}$	$2.90(25) \times 10^{-15}$

**Tabla 7.9:**  $f^{(q)}$  (C) vs CIC 2 (A) (PRE-PES-5)

CIC 2 (A)	$f^{(q)}$ Algoritmo (C)	$f^{(q)}$ FERGIN-3 (C)
$1.04(1) \times 10^{-5}$	$3.15(18) \times 10^{-15}$	$2.59(23) \times 10^{-15}$
$3.32(2) \times 10^{-5}$	$3.59(6) \times 10^{-15}$	$3.46(5) \times 10^{-15}$
$6.11(4) \times 10^{-5}$	$3.75(27) \times 10^{-15}$	$3.52(25) \times 10^{-15}$
$1.25(1) \times 10^{-4}$	$3.71(27) \times 10^{-15}$	$3.23(28) \times 10^{-15}$

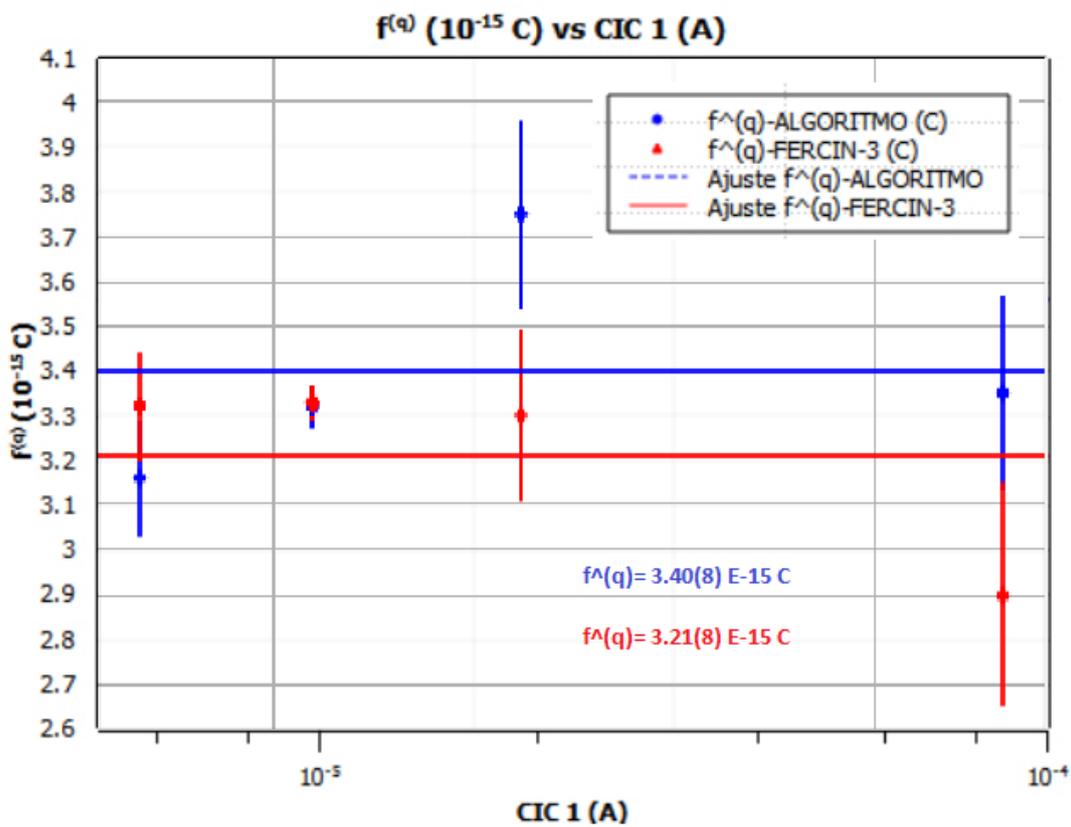


Figura 7.5: Ajuste  $f^{(q)}$  (C) vs CIC 1 (A) (PRE-PES-5).

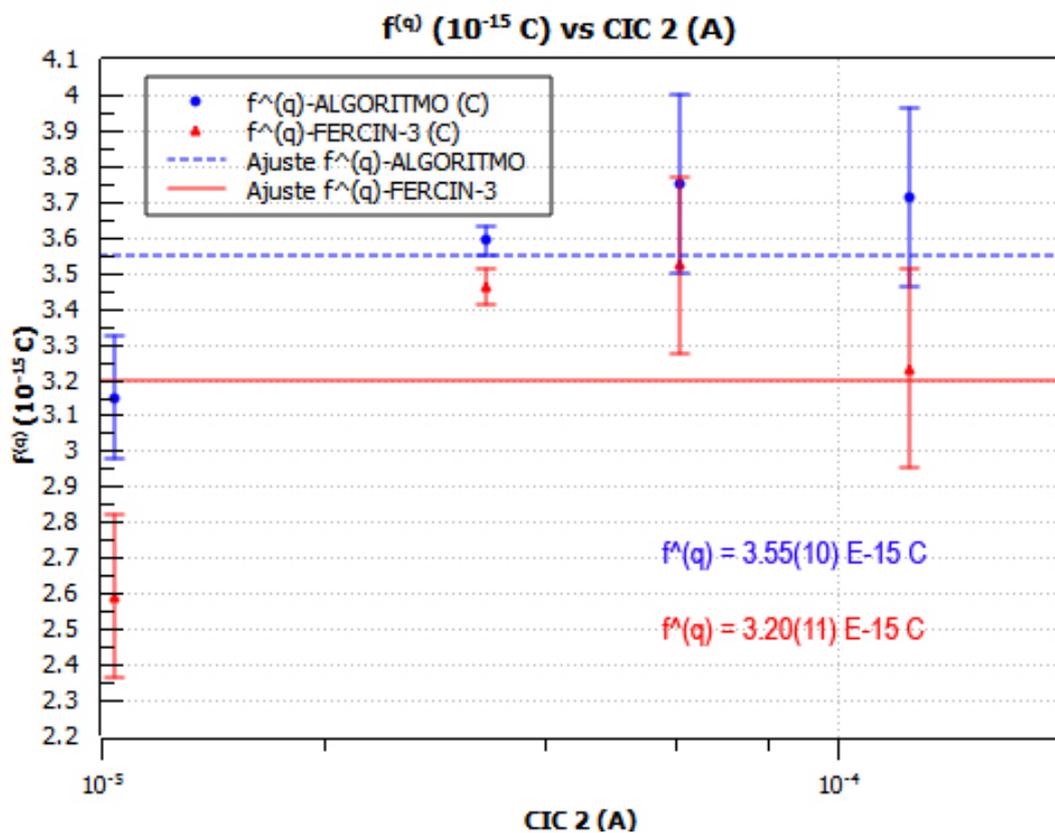
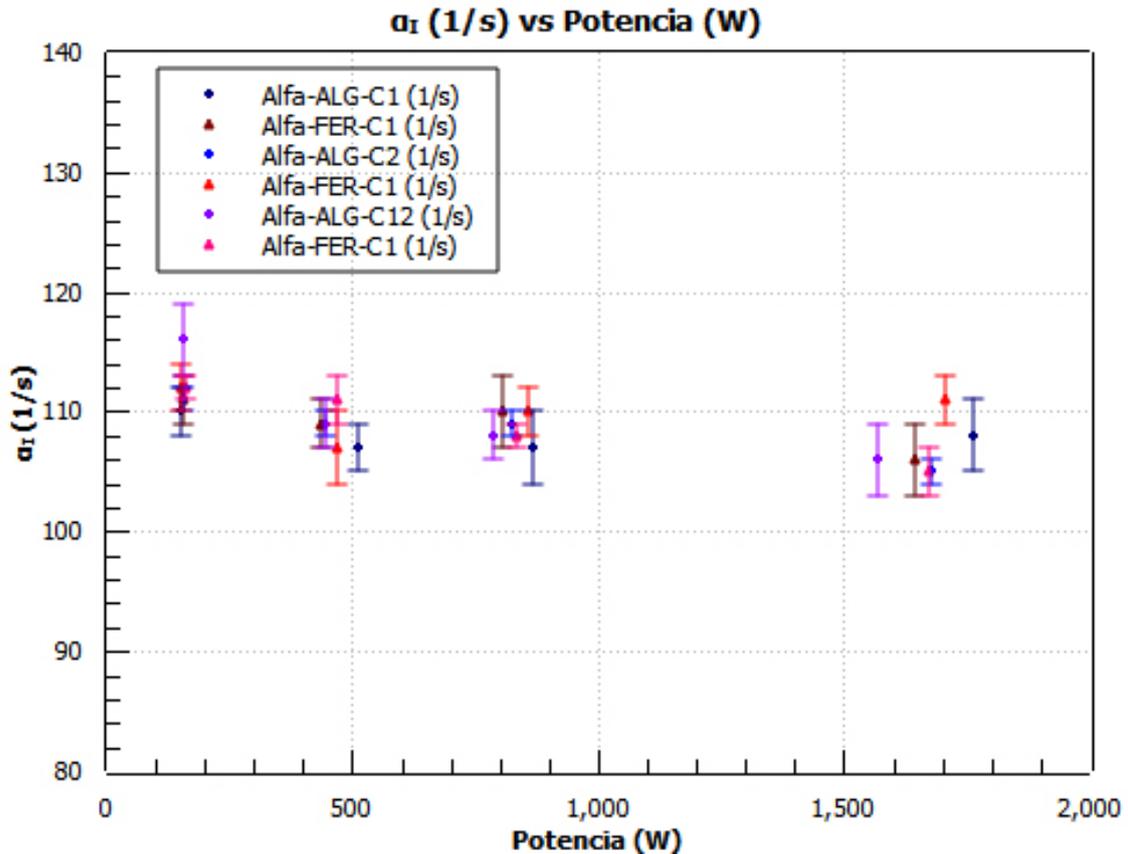


Figura 7.6: Ajuste  $f^{(q)}$  (C) vs CIC 2 (A) (PRE-PES-5).

Proseguimos analizando ahora la constante de decaimiento de los neutrones instantáneos. La -Tabla 7.10- muestra las estimaciones obtenidas para esta medición, las cuales son graficadas en la -Figura 7.7-

**Tabla 7.10:** Estimación de la constante  $\alpha_I$  (PRE-PES-5).

Detector	Potencia ALG(W)	$\alpha_I$ - ALG (1/s)	Potencia FER-3(W)	$\alpha_I$ - FER-3 (1/s)
CIC 1	154(3)	110(2)	154(3)	112(2)
	464(12)	106(2)	471(12)	107(3)
	867(17)	107(2)	857(19)	110(2)
	1762(34)	108(3)	1708(37)	111(2)
CIC 2	156(3)	111(2)	157(3)	116(3)
	438(11)	109(2)	447(11)	109(2)
	804(15)	110(2)	788(16)	108(2)
	1644(30)	106(2)	1569(33)	106(3)
Cruzada	155(2)	111(1)	159(2)	112(1)
	446(10)	108(1)	471(10)	111(2)
	824(14)	109(1)	835(14)	108(1)
	1680(28)	104(1)	1673(28)	105(2)

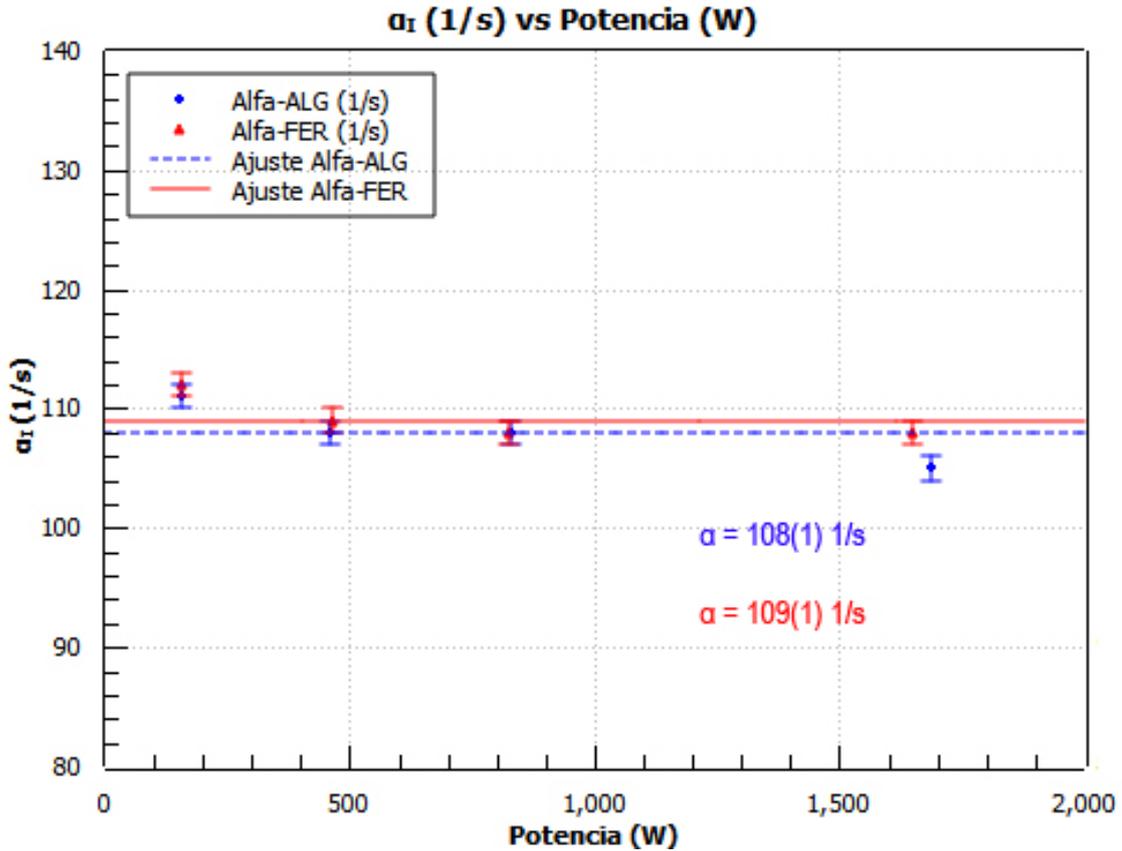


**Figura 7.7:** Estimaciones de  $\alpha_I$  para diferentes potencias (PRE-PES-5).

Las ponderaciones finales para la constante alfa se muestran en la -Tabla 7.11- y la -Figura 7.8-.

**Tabla 7.11:** Ponderaciones de la constante  $\alpha_I$  (PRE-PES-5)

Potencia ALG(W)	$\alpha_I$ - ALG (1/s)	Potencia FER-3(W)	$\alpha_I$ - FER-3(1/s)
155(1)	111(1)	158(1)	112(1)
448(6)	108(1)	463(6)	109(1)
829(9)	109(1)	824(9)	108(1)
1690(18)	105(1)	1649(18)	108(1)



**Figura 7.8:** Ponderación del  $\alpha_I$  (PRE-PES-5).

### 7.3. Análisis de los resultados del núcleo número 48

- Los ajustes lineales realizados para las CIC-1, CIC-2 y cruzada con respecto a la potencia en los grupos de mediciones, presentan un factor de determinación de 0,99.
- Si utilizamos un valor de corriente muy frecuente en el CM4 ( $0,2 \times 10^{-9} \text{ A}$ ) obtendremos resultados similares. Estos se muestran en la -Tabla 7.12-

**Tabla 7.12:** Análisis de resultados de potencia térmica (PRE-PES)

Fact-Cal-ALG (W/A)	Potencia ALG(W)	Fact-Cal-FER-3 (W/A)	Potencia FER-3(W)
$1.91(2) \times 10^{12}$	382(19)	$1.86(2) \times 10^{12}$	372(19)

- Los resultados obtenidos para la constante de decaimiento de los neutrones instantáneos ( $\alpha_I$ ), presentan gran similitud, los valores para la PRE-PES se muestran en la -Tabla 7.13-.

**Tabla 7.13:** Análisis de resultados de la constante  $\alpha_I$  (PRE-PES)

PRE-PES	$\alpha_I$ - ALG (1/s)	$\alpha_I$ - FER-3 (1/s)
5	108(1)	109(1)

- Los resultados obtenidos del factor  $f^{(q)}$  oscilan entre  $3,16 - 3,75 \times 10^{-15} C$  para la PRE-PES-5. Esto indica que la corriente promedio que generó la detección de neutrones mantuvo un valor relativamente estable.

## 7.4. Resultados para el núcleo número 8

Esta medición fue elaborada para estimar la calibración del CM4 durante la puesta en servicio del nuevo núcleo. Las CIC fueron colocadas en las posiciones B2 y H6. Estas posiciones fueron elegidas por ser simétricas y opuestas, con la finalidad de optimizar la medición. Por otro lado, se realizaron mediciones en cinco niveles diferentes de potencia. Para cada nivel se realizaron dos tomas a las frecuencias de muestreo de 200 Hz y 40 Hz, los resultados se muestran en la -Tabla 7.14-. Todos los valores de incertidumbre presentes en este apartado son reportados con un factor de cobertura  $k = 1$ .

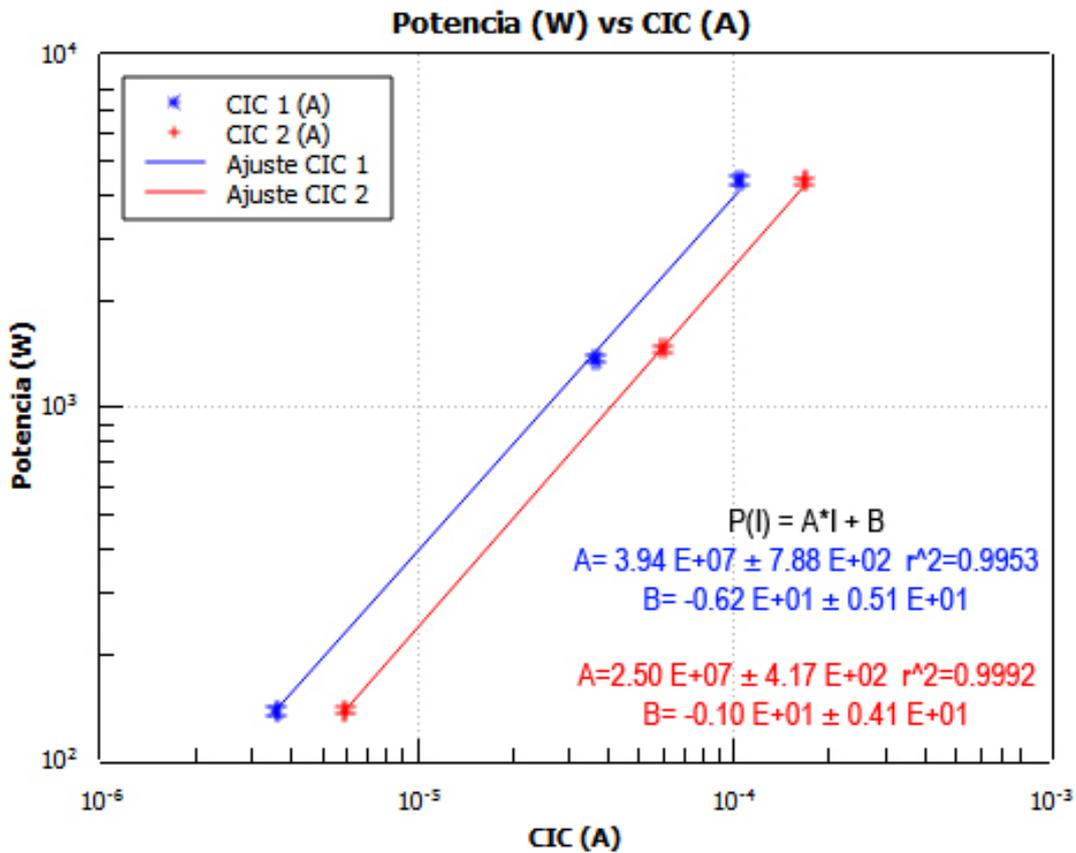
**Tabla 7.14:** Mediciones PES con Algoritmo.

Item	Detector	BW(Hz)	I (A)	CM4 (A)	$f^{(q)}$ (C)	$\alpha$ (Hz)	$\frac{\epsilon}{\beta^2}$	Potencia (W)
S08-1-1	CIC 1	200	$2.06(2) \times 10^{-7}$	$3.30(1) \times 10^{-12}$	$3.65(6) \times 10^{-15}$	161(7)	3	10.5(4)
	CIC 2		$3.37(3) \times 10^{-7}$		$3.27(6) \times 10^{-15}$	168(5)	4	10.8(3)
	Cruzada		—		—	183(4)	—	10.9(3)
S08-1-2	CIC 1	40	$2.08(2) \times 10^{-7}$	$3.30(1) \times 10^{-12}$	$4.05(77) \times 10^{-15}$	183(21)	2	12.3(9)
	CIC 2		$3.40(4) \times 10^{-7}$		$3.75(80) \times 10^{-15}$	185(17)	3	12.5(8)
	Cruzada		—		—	187(4)	—	11.6(2)
S08-1-3	CIC 1	200	$5.39(5) \times 10^{-7}$	$8.00(1) \times 10^{-12}$	$3.51(6) \times 10^{-15}$	161(6)	3	21.1(7)
	CIC 2		$8.77(9) \times 10^{-7}$		$3.21(5) \times 10^{-15}$	159(5)	6	22.9(7)
	Cruzada		—		—	163(3)	—	22.0(6)
S08-1-4	CIC 1	40	$5.38(5) \times 10^{-7}$	$8.00(1) \times 10^{-12}$	$3.51(85) \times 10^{-15}$	186(18)	3	24(2)
	CIC 2		$8.76(9) \times 10^{-7}$		$4.06(81) \times 10^{-15}$	162(11)	4	25(1)
	Cruzada		—		—	172(3)	—	23.9(3)
S08-1-5	CIC 1	200	$3.62(5) \times 10^{-6}$	$5.20(1) \times 10^{-11}$	$3.54(6) \times 10^{-15}$	140(5)	4	126(4)
	CIC 2		$5.92(7) \times 10^{-6}$		$3.19(6) \times 10^{-15}$	144(4)	7	130(4)
	Cruzada		—		—	152(3)	—	131(4)
S08-1-6	CIC 1	40	$3.62(5) \times 10^{-6}$	$5.20(1) \times 10^{-11}$	$4.28(58) \times 10^{-15}$	151(12)	3	148(6)
	CIC 2		$5.92(7) \times 10^{-6}$		$4.38(77) \times 10^{-15}$	149(9)	4	146(5)
	Cruzada		—		—	160(3)	—	138(2)
S08-1-7	CIC 1	200	$3.69(4) \times 10^{-5}$	$5.10(1) \times 10^{-10}$	$3.36(6) \times 10^{-15}$	152(5)	4	1286(43)
	CIC 2		$6.00(7) \times 10^{-5}$		$3.00(5) \times 10^{-15}$	154(4)	7	1410(40)
	Cruzada		—		—	152(3)	—	1346(36)
S08-1-8	CIC 1	40	$3.69(4) \times 10^{-5}$	$5.10(1) \times 10^{-10}$	$3.95(55) \times 10^{-15}$	149(10)	3	1448(55)
	CIC 2		$6.00(7) \times 10^{-5}$		$4.30(64) \times 10^{-15}$	141(8)	4	1509(42)
	Cruzada		—		—	155(3)	—	1408(20)
S08-1-9	CIC 1	200	$1.04(2) \times 10^{-4}$	$1.60(1) \times 10^{-9}$	$3.20(4) \times 10^{-15}$	147(6)	4	3980(171)
	CIC 2		$1.69(3) \times 10^{-4}$		$3.01(3) \times 10^{-15}$	144(5)	7	4140(161)
	Cruzada		—		—	145(4)	—	4054(143)
S08-2-1	CIC 1	40	$1.04(2) \times 10^{-4}$	$1.60(1) \times 10^{-9}$	$3.90(46) \times 10^{-15}$	138(10)	3	4799(162)
	CIC 2		$1.69(3) \times 10^{-4}$		$4.20(56) \times 10^{-15}$	147(9)	5	4576(142)
	Cruzada		—		—	156(3)	—	4332(63)

Los valores de potencia obtenidos se promedian para cada CIC y se ajustan con respecto a la corriente que se mide en cada una. La -Tabla 7.15- y la -Figura 7.9- muestran el ajuste entre las CIC y la potencia, tomando solo como consideración los tres últimos niveles de potencia.

**Tabla 7.15:** Potencia (W) vs CIC (A) (PES)

CIC 1 (A)	Potencia (W)	CIC 2 (A)	Potencia (W)
$2.07(2) \times 10^{-7}$	11.4(6)	$3.39(3) \times 10^{-7}$	11.7(5)
$5.39(4) \times 10^{-7}$	23(1)	$8.77(6) \times 10^{-7}$	24(1)
$3.62(5) \times 10^{-6}$	137(4)	$5.92(7) \times 10^{-6}$	138(3)
$3.69(4) \times 10^{-5}$	1367(35)	$6.00(7) \times 10^{-5}$	1459(29)
$1.04(2) \times 10^{-4}$	4390(118)	$1.69(3) \times 10^{-4}$	4358(107)



**Figura 7.9:** Potencia (W) vs CIC (A) (PES) .

Donde de la -Figura 7.9- obtenemos:

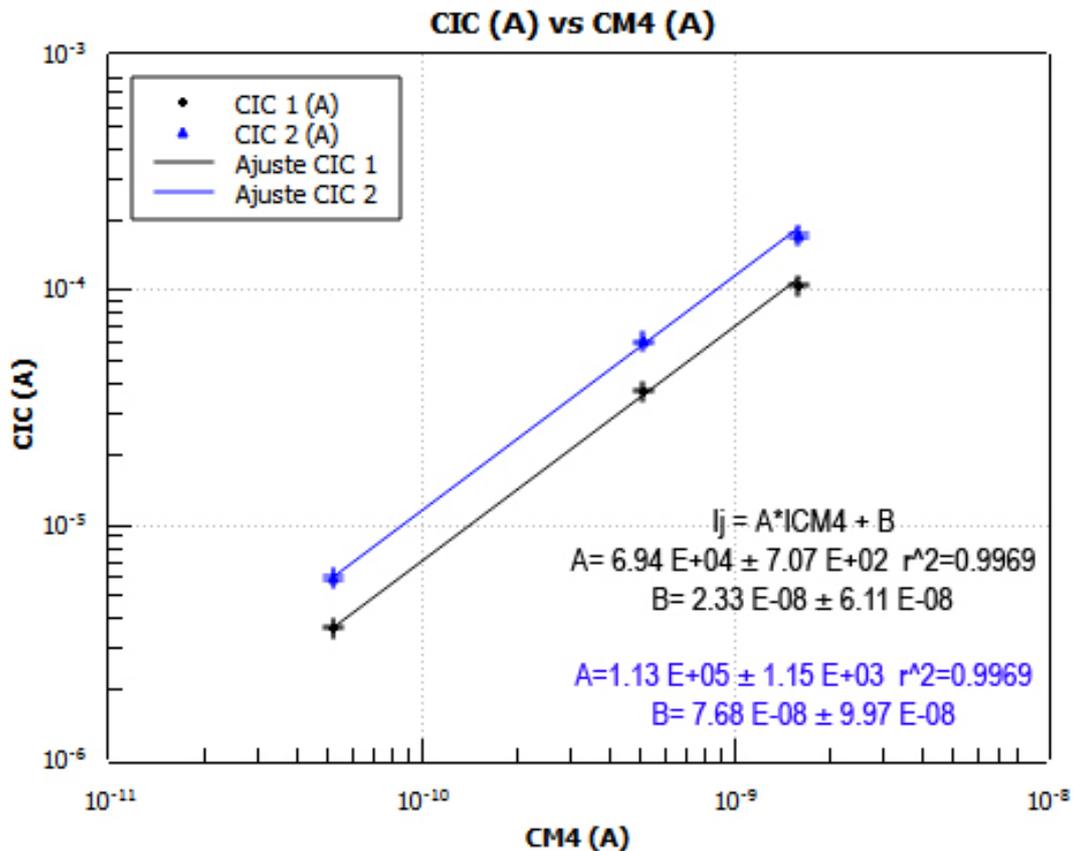
$$\frac{dP}{dI_{CIC1}} = 3,94(8) \times 10^7 W/A \quad (7.11)$$

$$\frac{dP}{dI_{CIC2}} = 2,50(4) \times 10^7 W/A \quad (7.12)$$

Para obtener el aporte en la calibración de estos datos, debemos estimar la relación entre las corrientes de las CIC y el CM4. La -Tabla 7.16- muestra esta relación, cuyos datos son graficados en la-Figura 7.10-. Igualmente que en el caso anterior, solo se toma en consideración los últimos tres niveles de potencia.

**Tabla 7.16:** CM4 (A) vs CIC (A)

CM4 (A)	CIC 1 (A)	CIC 2 (A)
$3.30(1) \times 10^{-12}$	$2.07(2) \times 10^{-7}$	$3.39(3) \times 10^{-7}$
$8.00(1) \times 10^{-12}$	$5.39(4) \times 10^{-7}$	$8.77(6) \times 10^{-7}$
$5.20(1) \times 10^{-11}$	$3.62(5) \times 10^{-6}$	$5.92(7) \times 10^{-6}$
$5.10(1) \times 10^{-10}$	$3.69(4) \times 10^{-5}$	$6.00(7) \times 10^{-5}$
$1.60(1) \times 10^{-9}$	$1.04(2) \times 10^{-4}$	$1.69(3) \times 10^{-4}$



**Figura 7.10:** Ajuste de la CIC (A) vs CM4 (A) (PES).

Donde de la -Figura 7.10- obtenemos:

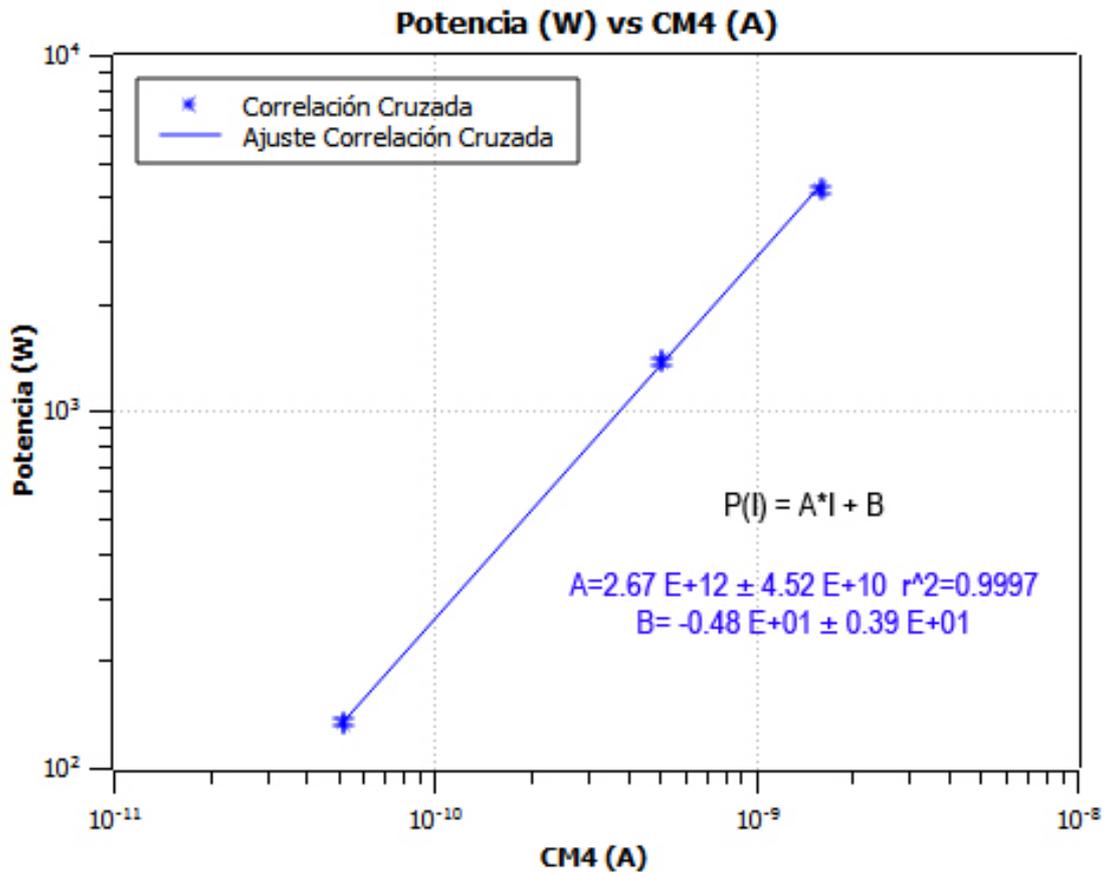
$$\frac{dI_{CIC1}}{dI_{CM4}} = 6,94(7) \times 10^4 \quad (7.13)$$

$$\frac{dI_{CIC2}}{dI_{CM4}} = 1,13(1) \times 10^5 \quad (7.14)$$

De forma consecutiva, ahora se ajusta la potencia obtenida mediante la correlación cruzada con el CM4. La -Tabla 7.17- muestra el promedio obtenido, la misma que se encuentra graficada en la -Figura 7.17-, tomando las mismas consideraciones ya expuestas en el caso anterior.

**Tabla 7.17:** Potencia (W) vs CM4 (A) (PES)

CM4 (A)	Potencia (W)
$3.30(1) \times 10^{-12}$	11.3(2)
$8.00(1) \times 10^{-12}$	23.0(5)
$5.20(1) \times 10^{-11}$	134(3)
$5.10(1) \times 10^{-10}$	1377(28)
$1.60(1) \times 10^{-9}$	4193(103)



**Figura 7.11:** Ajuste de la Potencia (W) vs CM4 (A) (PES).

De manera que de la -Figura 7.11- se puede obtener:

$$\frac{dP}{dI_{CM4}} = 2,67(4) \times 10^{12} W/A \quad (7.15)$$

Tomando esto en consideración, mostramos la -Tabla 7.18-

**Tabla 7.18:** Factor de calibración del CM4 (PES)

Cámara	Relación	Valor-ALG
CIC 1	$dP/dI_{CIC1}$	$3.37(8) \times 10^7 \text{ W/A}$
	$dI_{CIC1}/dI_{CM4}$	$6.94(7) \times 10^4$
	$dP/dI_{CM4}$	<b><math>2.73(6) \times 10^{12} \text{ W/A}</math></b>
CIC 2	$dP/dI_{CIC2}$	$2.50(4) \times 10^7 \text{ W/A}$
	$dI_{CIC2}/dI_{CM4}$	$1.13(1) \times 10^5$
	$dP/dI_{CM4}$	<b><math>2.83(5) \times 10^{12} \text{ W/A}</math></b>
CRUZADA	$dP/dI_{CM4}$	<b><math>2.67(4) \times 10^{12} \text{ W/A}</math></b>

Aplicando lo descrito en el -Apéndice D.3-, se obtiene que el factor de calibración para la CM4 es:

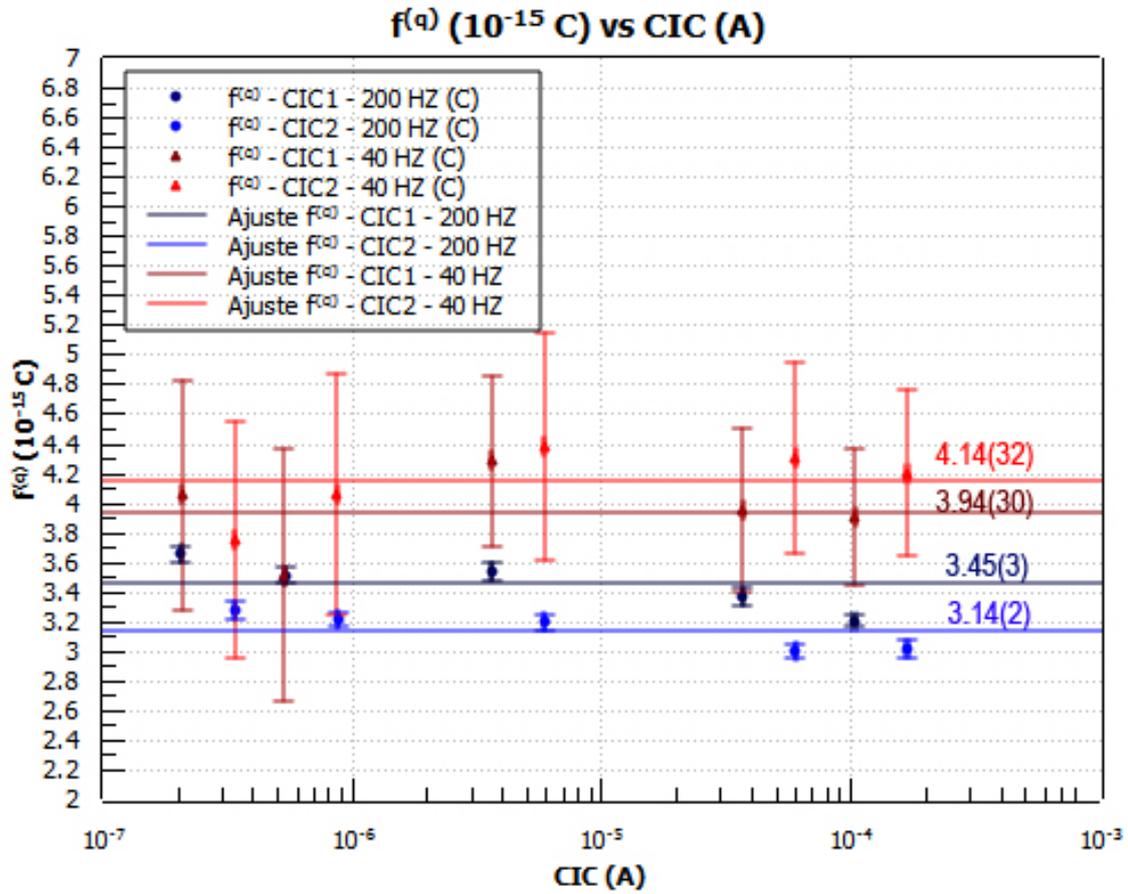
$$\frac{dP}{dI_{CM4}} = 2,73(3) \times 10^{12} \text{ W/A} \quad (7.16)$$

Este resultado es muy cercano al obtenido mediante la técnica de balance térmico aplicado al mismo núcleo, el cual es  $2,98 \times 10^{12} \text{ W/A}$ ; este valor fue estimado con potencias en el orden de los Megawatts [29].

Por otro lado, se realizó el análisis del factor  $f^{(q)}$  pero esta vez se tomó en cuenta la frecuencia de muestreo aplicada al momento de la medición. La -Tabla 7.19- muestra estos valores, los cuales son graficados en la -Figura 7.12- .

**Tabla 7.19:**  $f^{(q)}$  (C) vs CIC (A) (PES)

BW (Hz)	CIC 1 (A)	$f^{(q)}$ (C)	CIC 2 (A)	$f^{(q)}$ (C)
200	$2.07(2) \times 10^{-7}$	$3.65(6) \times 10^{-15}$	$3.39(3) \times 10^{-7}$	$3.27(6) \times 10^{-15}$
	$5.39(4) \times 10^{-7}$	$3.51(6) \times 10^{-15}$	$8.77(6) \times 10^{-7}$	$3.21(5) \times 10^{-15}$
	$3.62(5) \times 10^{-6}$	$3.54(6) \times 10^{-15}$	$5.92(7) \times 10^{-6}$	$3.19(6) \times 10^{-15}$
	$3.69(4) \times 10^{-5}$	$3.36(6) \times 10^{-15}$	$6.00(7) \times 10^{-5}$	$3.00(5) \times 10^{-15}$
	$1.04(2) \times 10^{-4}$	$3.20(4) \times 10^{-15}$	$1.69(3) \times 10^{-4}$	$3.01(6) \times 10^{-15}$
40	$2.08(2) \times 10^{-7}$	$4.05(77) \times 10^{-15}$	$3.40(4) \times 10^{-7}$	$3.75(80) \times 10^{-15}$
	$5.38(5) \times 10^{-7}$	$3.51(85) \times 10^{-15}$	$8.76(9) \times 10^{-7}$	$4.06(81) \times 10^{-15}$
	$3.62(5) \times 10^{-6}$	$4.28(58) \times 10^{-15}$	$5.92(7) \times 10^{-6}$	$4.38(77) \times 10^{-15}$
	$3.69(4) \times 10^{-5}$	$3.95(55) \times 10^{-15}$	$6.00(7) \times 10^{-5}$	$4.30(64) \times 10^{-15}$
	$1.04(2) \times 10^{-4}$	$3.90(46) \times 10^{-15}$	$1.69(3) \times 10^{-4}$	$4.20(56) \times 10^{-15}$



**Figura 7.12:** Ajuste de los valores de  $f^{(q)}$  (C) vs CIC (A).

En la -Figura 7.12- se puede apreciar claramente una menor dispersión para un ancho de banda de  $200\text{Hz}$  (Frecuencia de muestreo igual a  $400\text{Hz}$ ). Esto resulta lógico pues a mayor frecuencia de muestreo, mayor detalle se obtiene en la señal.

Para el caso de la estimación de la constante de decaimiento de los neutrones instantáneos ( $\alpha_I$ ) se muestran los promedios obtenidos en la -Tabla 7.20-, los mismos que son graficados en la -Figura 7.13-.

**Tabla 7.20:** Estimación de la constante  $\alpha_I$  (PES).

Detector	Potencia (W)	$\alpha_I$ (1/s)	Detector	Potencia (W)	$\alpha_I$ (1/s)	Detector	Potencia (W)	$\alpha_I$ (1/s)
	11.4(6)	172(11)		11.7(5)	177(9)		11.3(2)	185(4)
	23(1)	174(9)		24(1)	161(6)		23(1)	168(3)
CIC 1	137(4)	146(7)	CIC 2	138(3)	147(5)	Cruzada	134(3)	156(3)
	1367(35)	151(6)		1459(29)	148(4)		1377(28)	154(3)
	4690(118)	143(6)		4358(107)	146(5)		4193(103)	151(4)

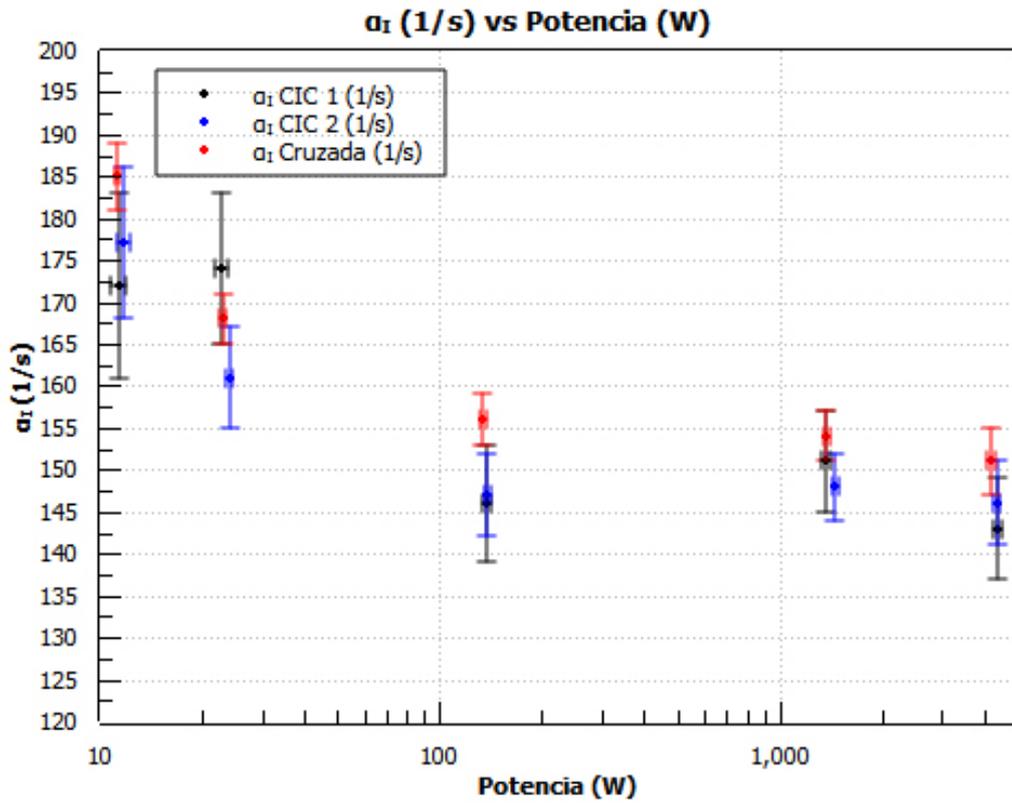


Figura 7.13: Valores de  $\alpha_I$  (1/s) vs Potencia (W) (PES).

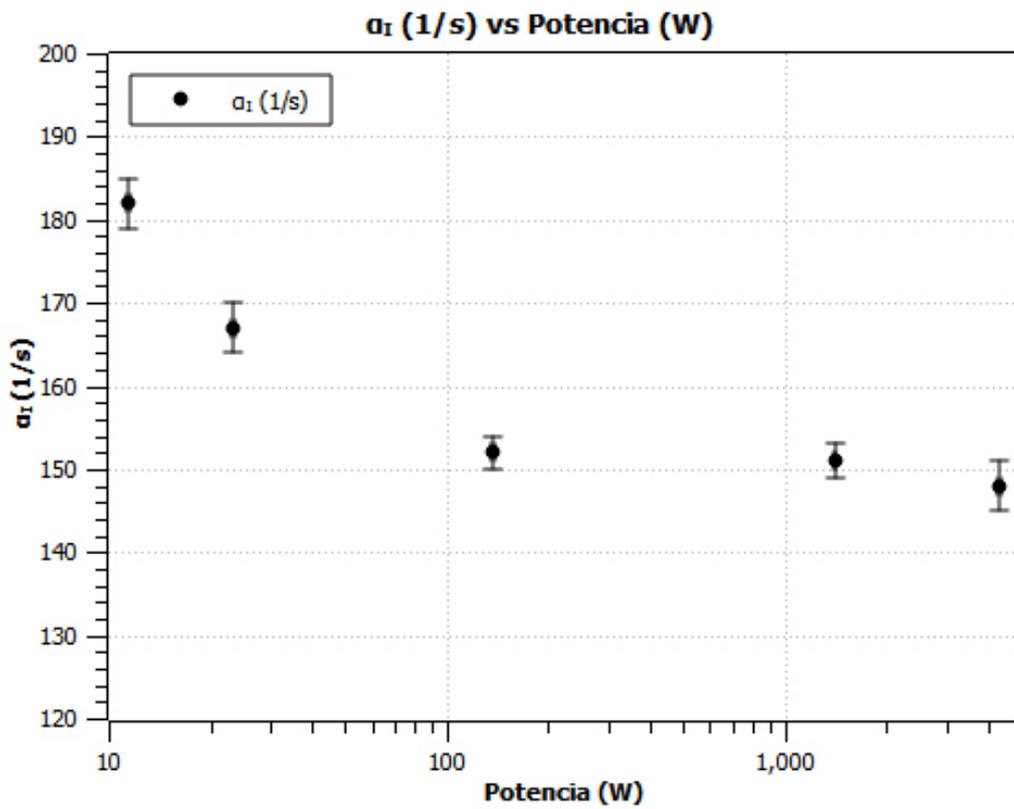


Figura 7.14: Valores ponderados de  $\alpha_I$  (1/s) vs Potencia (W) (PES).

En la -Figura 7.14- se muestra los resultados de la ponderación de las constantes de decaimiento de neutrones instantáneos ( $\alpha_I$ ) obtenidos, los mismos que se encuentran detallados en la -Tabla 7.21-.

**Tabla 7.21:** Ponderación de la constante  $\alpha_I$  (PES).

Potencia (W)	$\alpha_I$ (1/s)
11.3 (2)	185(4)
23(1)	168(3)
134(3)	156(3)
1377(28)	154(3)
4193(103)	151(4)

Los resultados mostrados en la -Tabla 7.21- y la -Figura 7.14- muestran que los dos primeros niveles de medición corresponden a estados subcríticos, por tal motivo es que se utilizaron los niveles restantes para la estimación de la potencia térmica.

## 7.5. Análisis de los resultados del núcleo número 8

- El factor de correlación para los ajustes de las CIC-1, CIC2 y cruzada con los puntos establecidos resulta ser 0,99.
- Los resultados de  $\varepsilon/\beta_{ef}^2$  se muestran muy parecidos para ambos detectores, en la mayoría de los casos, lo cual indica que ambos reciben flujos neutrónicos térmicos de similar magnitud.
- El factor de calibración obtenido por la técnica de ruido neutrónico con el algoritmo elaborado en el presente trabajo, resulta ser  $2,73(3) \times 10^{12} W/A$ , el cual es muy cercano al obtenido por balance térmico, siendo este:  $2,98 \times 10^{12} W/A$  [29].
- El factor  $f^{(q)}$  presenta mayor dispersión a la frecuencia de 40 Hz, sucediendo lo contrario a 200 Hz.
- Se observa, mediante la -Figura 7.14- que los dos primeros de niveles de medición corresponden a estados subcríticos del reactor.
- Los tres últimos niveles de potencia presentan una constante de decaimiento de los neutrones instantáneos ( $\alpha_I$ ) de valores cercanos.

# Capítulo 8

## Conclusiones

Del presente trabajo se concluye lo siguiente:

- El factor de determinación de 0,99 para los análisis de las PRE-PES y PES, se traduce en un grado elevado de asociación entre el ajuste propuesto y los puntos estimados en las gráficas.
- Las potencias térmicas estimadas para la corriente de  $0,2 \times 10^{-9} A$  en la CM4 para la PRE-PES, presentan una dispersión menor al 3% en sus valores medios y aproximadamente 13% entre sus límites más alejados.
- La dispersión asociada a los valores obtenidos para la constante de decaimiento de los neutrones instantáneos ( $\alpha_I$ ) para la PRE-PES resulta ser menor al 1% en sus valores medios y menor al 3% entre sus límites más alejados. Estos resultados se traducen en un elevado grado de similitud tomando en consideración que desde el inicio se consideró un factor de cobertura  $k = 1$
- La dispersión de los valores del factor  $f^{(q)}$  es relativamente elevada para la PRE-PES. Esto resulta del tratamiento de los datos pues fueron tomados en conjunto sin discriminar las frecuencias de muestreo.
- Como se mencionó al inicio del -Capítulo 7-, se compararon los resultados obtenidos por nuestro algoritmo y el programa FERCIN-3 para las mediciones de la PRE-PES:
  - Se obtuvieron errores absolutos menores al 3% en el factor de calibración final de la CM4.
  - Error absoluto menor al 1% en la constante de decaimiento de los neutrones instantáneos ( $\alpha_I$ )
  - Error absoluto menor al 6% en el factor  $f^{(q)}$  de la CIC 1. Mientras que 10% aproximadamente en el factor  $f^{(q)}$  de la CIC 2.
- Los resultados de la comparación realizada con el programa FERCIN-3 arrojan un alto grado de similitud, lo cual es un indicativo de fiabilidad en los resultados obtenidos mediante el presente algoritmo debido a que el programa mencionado anteriormente presenta el respaldo de la CNEA.

- El factor de calibración para el CM4 obtenido por el algoritmo elaborado en el presente trabajo para la PES es de  $2,73(3) \times 10^{12} W/A$ , mientras que el obtenido por la técnica de balance térmico para la misma configuración nuclear es  $2,98 \times 10^{12} W/A$  [29]. Esto representa un error absoluto del 8% validándose de esta manera, el algoritmo realizado.
- Se observa en la gráfica de la constante de decaimiento de los neutrones instantáneos ( $\alpha_I$ ) para la PES que las mediciones de los dos primeros niveles de potencia representan estados subcríticos del reactor, por tal motivo el ajuste realizado con los niveles restantes fue el adecuado para la estimación de la potencia térmica dada la condición de criticidad que necesita nuestro algoritmo.
- Los valores de la constante de decaimiento de los neutrones instantáneos ( $\alpha_I$ ) para la PES, presentan una dispersión aproximadamente del 3%.
- Específicamente para la PES se separaron, según la frecuencia de muestreo, los valores obtenidos del factor  $f^{(a)}$ , obteniéndose una mayor dispersión de ellos para una frecuencia de 80 Hz, caso contrario para una frecuencia de 400 Hz. Esto se debe a que al aumentar la frecuencia de muestreo, se tiene mayor información del sistema en medición, lo cual reduce la dispersión del factor mencionado.
- Para la PES y la PRE-PES, se ha observado que para niveles de potencia menores a 100 W el reactor se encontraba en el estado subcrítico. La hipótesis que se maneja es la presencia de un colchón de fotoneutrones. Sin embargo, hasta el término del presente trabajo, dicha hipótesis no ha sido verificada en su totalidad.

## 8.1. Recomendaciones

- Se debe calibrar el CM4 cada vez que se realice una modificación en la configuración nuclear del reactor.
- Un paso previo a la medición consiste en caracterizar el flujo neutrónico térmico de las posiciones tentativas donde irán ubicadas las CIC, esto es para evitar una mayor dispersión en los resultados producto de los flujos neutrónicos térmicos desiguales.
- Realizar mediciones mínimo con cuatro niveles de potencia diferentes mayores de 100 W debido a que en potencias menores no se ha podido mantener la criticidad del reactor.
- Las frecuencias de muestreo deben ser elegidas según el objetivo de las mediciones, siendo estas:
  - Si solo se desea tener información de la potencia térmica basta medir a una frecuencia de muestreo de 80 Hz
  - Caso contrario, si se desea obtener información sobre la constante de decaimiento de los neutrones instantáneos ( $\alpha_I$ ), así como del factor  $f^{(a)}$  se recomienda usar una frecuencia de muestreo de 200 Hz.

## 8.2. Trabajos futuros

El algoritmo elaborado permite la independencia del programa FERCIN-3, así como también abre el paso para futuros trabajos como:

- Elaboración de un sistema portátil para la medición de la potencia térmica por ruido neutrónico, utilizando una pantalla LCD táctil y una Raspberry Pi 4 como interfaz gráfica de usuario.
- El algoritmo puede ser modificado para medir la reactividad del reactor y consecuentemente la potencia térmica en estado subcrítico.
- El rápido procesado con el que cuenta el algoritmo le permite analizar una gran cantidad de archivos en poco tiempo, obteniendo de esta forma una mayor cantidad de información para un adecuado análisis estadístico.
- Monitorización y vigilancia de los parámetros nucleares así como de los sensores involucrados en el reactor, debido a la alta sensibilidad y linealidad de las CIC.

# Apéndice A

## Demostración matemática del contenido de energía

Se presenta la ecuación que describe la energía que disipa una tensión  $g(t)$  entre los terminales de una resistencia  $R$ .

$$U = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{[g(t)]^2}{R} dt$$

Donde para nuestro caso en particular el valor de la resistencia es  $1 \Omega$  y la Transformada de Fourier de  $g(t)$  es  $G(\omega)$ . Expresando  $g(t)$  mediante la Transformada inversa de Fourier, obtenemos:

$$U = \int_{-\infty}^{\infty} [g(t)]^2 dt$$
$$U = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \left( \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) e^{i\omega t} d\omega \right) dt$$

Podemos modificar el orden de la integración asumiendo la independencia de variables, resultando:

$$U = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) \left( \int_{-\infty}^{\infty} g(t) e^{i\omega t} dt \right) d\omega$$
$$U = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) (G(-\omega)) d\omega$$

Se sabe que [6]:

$$G(-\omega) = \overline{G(\omega)}$$

Reemplazando la relación anterior en  $U$ , obtenemos finalmente:

$$U = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |G(\omega)|^2 d\omega$$

# Apéndice B

## Demostración de las ecuaciones de la cinética puntual

### B.1. Balance de la población instantánea

Se busca analizar la variación de la población instantánea ( $N_I(t)$ ) mediante la población inicial al momento de la alteración, para ello debemos considerar [9], [10]:

- Neutrones instantáneos que nacieron como producto de neutrones instantáneos.

$$(1 - \beta_{ef})k \frac{N_I(t)}{T_n}$$

- Neutrones instantáneos que nacieron como producto de neutrones tardíos.

$$(1 - \beta_{ef})k \frac{N_R(t)}{T_n}$$

- Neutrones instantáneos que desaparecieron.

$$\frac{N_I(t)}{T_n}$$

Si no se considera la contribución de los neutrones tardíos a la producción de neutrones instantáneos. Tenemos en la ecuación:

$$\frac{dN_I(t)}{dt} = (1 - \beta_{ef})k \frac{N_I(t)}{T_n} - \frac{N_I(t)}{T_n}$$

$$\frac{dN_I(t)}{dt} = \frac{(\beta - 1)}{\Lambda^*} N_I(t)$$

La ecuación anterior es la que se buscaba demostrar. Sin embargo, tomando en cuenta las condiciones iniciales al momento de realizar la alteración en el reactor, obtenemos:

$$N_I(t) = N_{0I} e^{\frac{(\beta-1)}{\Lambda^*} t}$$

Haciendo:  $\alpha_I = \frac{(\beta-1)}{\Lambda^*}$ . Donde  $\alpha_I$  : es la constante de evolución de los neutrones instantáneos.

$$N_I(t) = N_{0I}e^{\alpha_I t}$$

## B.2. Balance de la población tardía

De forma análoga que en el balance de la población instantánea, se busca realizar el mismo razonamiento. Sin embargo, esta vez hay que tomar en consideración el hecho de que los neutrones tardíos provienen de los isótopos productos de fisión o bien llamadas "precursores" ( $C(t)$ ) [9], [10].

- Producción de neutrones tardíos.

$$\lambda C(t)$$

- Destrucción de neutrones tardíos.

$$\frac{N_R(t)}{T_n}$$

Obteniendo como ecuación representativa:

$$\frac{dN_R(t)}{dt} = \lambda C(t) - \frac{N_R(t)}{T_n}$$

## B.3. Balance de la densidad neutrónica

Para poder obtener esta ecuación se parte del balance de la población instantánea, solo que esta vez considerando a los neutrones instantáneos que nacieron como producto de neutrones tardíos [9], [10]. Obteniendo en el balance:

$$\frac{dN_I(t)}{dt} = (1 - \beta_{ef})k \frac{N_I(t)}{T_n} + (1 - \beta_{ef})k \frac{N_R(t)}{T_n} - \frac{N_I(t)}{T_n}$$

Luego, se utiliza la siguiente ecuación que indica la suma de las variaciones de la población instantánea con la población tardía, en conjunto con la ecuación obtenida en el anexo anterior.

$$\begin{aligned} \frac{dN(t)}{dt} &= \frac{dN_I(t)}{dt} + \frac{dN_R(t)}{dt} \\ &= (1 - \beta_{ef})k \frac{N_I(t)}{T_n} + (1 - \beta_{ef})k \frac{N_R(t)}{T_n} - \frac{N_I(t)}{T_n} + \lambda C(t) - \frac{N_R(t)}{T_n} \\ &= [(1 - \beta_{ef})k - 1] \frac{N_I(t)}{T_n} + [(1 - \beta_{ef})k - 1] \frac{N_R(t)}{T_n} + \lambda C(t) \end{aligned}$$

Donde, finalmente resulta:

$$\frac{dN(t)}{dt} = \left( \frac{\beta - 1}{\Lambda^*} \right) N(t) + \lambda C(t)$$

## B.4. Balance de la concentración de precursores

Para la demostración de esta ecuación optamos por el mismo razonamiento que hemos venido realizando [9], [10]. Considerando en el balance.

- Producción de precursores.

$$\beta_{ef}k \frac{N(t)}{T_n}$$

- Desaparición de precursores.

$$\lambda C(t)$$

Obteniendo finalmente, la siguiente expresión:

$$\frac{dC(t)}{dt} = \beta_{ef}k \frac{N(t)}{T_n} - \lambda C(t)$$

# Apéndice C

## Demostración de los parámetros nucleares involucrados

### C.1. Fluctuación de la densidad neutrónica normalizada

Dadas las siguientes ecuaciones:

$$\frac{d[\delta n(t)]}{dt} = \left(\frac{\beta - 1}{\Lambda^*}\right)\delta n(t) + \lambda\delta c(t) + x(t)$$

$$\frac{d[\delta c(t)]}{dt} = \frac{\delta n(t)}{\Lambda^*} - \lambda\delta c(t)$$

Donde  $x(t)$  viene a ser la fuente externa equivalente de ruido neutrónico. Tomando la transformada de Fourier, haciendo  $s = i\omega$  para poder simplificar el cálculo, obtenemos:

$$s\delta n(s) = \left(\frac{\beta - 1}{\Lambda^*}\right)\delta n(s) + \lambda\delta c(s) + x(s)$$

$$s\delta c(s) = \frac{\delta n(s)}{\Lambda^*} - \lambda\delta c(s)$$

Reagrupando las variables para simplificar la operación, obtenemos:

$$\left[\frac{\beta - 1}{\Lambda^*} - s\right]\delta n(s) = -\lambda\delta c(s) - x(s)$$

$$[s + \lambda]\delta c(s) = \frac{\delta n(s)}{\Lambda^*}$$

De la ecuación anterior se puede despejar  $\delta c(s)$ .

$$\delta c(s) = \frac{\delta n(s)}{\Lambda^*[s + \lambda]}$$

Esta variable la podemos reemplazar en la ecuación anterior, obteniendo:

$$\left[\frac{\beta - 1}{\Lambda^*} - s\right]\delta n(s) = -\lambda\left(\frac{\delta n(s)}{\Lambda^*[s + \lambda]}\right) - x(s)$$

Reagrupando la ecuación.

$$\left[ \frac{\$ - 1}{\Lambda^*} - s + \frac{\lambda}{\Lambda^*[s + \lambda]} \right] \delta n(s) = -x(s)$$

Reemplazando  $s = i\omega$ .

$$\frac{1}{\Lambda^*} \left[ \$ - 1 - i\omega\Lambda^* + \frac{\lambda}{(\lambda + i\omega)} \frac{(\lambda - i\omega)}{(\lambda - i\omega)} \right] \delta n(\omega) = -x(\omega)$$

$$\frac{1}{\Lambda^*} \left[ \$ - 1 - i\omega\Lambda^* + \frac{\lambda^2 - i\omega\lambda}{(\lambda^2 + \omega^2)} \right] \delta n(\omega) = -x(\omega)$$

$$\frac{1}{\Lambda^*} \left[ \left( \$ - 1 + \frac{\lambda^2}{\lambda^2 + \omega^2} \right) - i\omega \left( \Lambda^* + \frac{\lambda}{\lambda^2 + \omega^2} \right) \right] \delta n(\omega) = -x(\omega)$$

Obteniendo finalmente:

$$\delta n(\omega) = \frac{-x(\omega)}{\frac{1}{\Lambda^*} \left[ \left( \$ - 1 + \frac{\lambda^2}{\lambda^2 + \omega^2} \right) - i\omega \left( \Lambda^* + \frac{\lambda}{\lambda^2 + \omega^2} \right) \right]}$$

## C.2. Relación entre el parámetro A y la tasa de fisiones

Dada la ecuación que describe al parámetro A:

$$A = \frac{2x^*(\omega)x(\omega)}{\alpha_I^2}$$

Notamos que esta variable depende de  $x(\omega)$  que representa *la fuente equivalente de ruido neutrónico*.

Sin embargo, al tomar en cuenta que los valores de  $n(t)$  y  $c(t)$  presentan fluctuaciones estadísticas que pueden considerarse producidas por las alteraciones en los valores de producción ( $P(t)$ ) y destrucción ( $D(t)$ ), podemos proponer un modelo para  $x(\omega)$  que dependa casualmente de estas variables, donde el parámetro que mide la relación entre producción y destrucción es la reactividad absoluta ( $\rho$ ).

$$x(\omega) \sim \delta\rho$$

Por otro lado, dado que hablamos de ruido, involucramos consecuentemente el tiempo entre reproducciones, resultando:

$$x(\omega) = \frac{\delta\rho}{\Lambda} = \frac{\delta\$}{\Lambda^*}$$

Obtenemos entonces para  $x(\omega)$ :

$$A = \frac{2\delta\$^*(\omega)\delta\$(\omega)}{\alpha_I^2\Lambda^{*2}} = 2\delta\$^*(\omega)\delta\$(\omega)$$

Se cancelan  $\alpha_I$  y  $\Lambda^*$  porque en estado crítico representan uno la inversa del otro. Mientras que por medio de [13], [14] se sabe que:

$$A = 2\delta\$\ast(\omega)\delta\$(\omega) = 2\left(\frac{T_n}{N\beta_{ef}}\right)^2 < |S_0|^2 > \quad (C.1)$$

Donde:  $< |S_0|^2 >$  es la *APSD* de la *fente equivalente de ruido*. Al aplicar la fórmula de Schottkly, tenemos:

$$< |S_0|^2 > = \frac{N}{T_n} \left( \frac{\bar{\eta}^2 - \bar{\eta}}{\bar{\eta}} \right) (1 - \beta_{ef})$$

Por definición sabemos que la tasa de fisiones  $F$ , para un estado crítico del reactor es [4], [9], [10]:

$$F = \frac{N}{T_n \bar{\eta}} \quad (C.2)$$

Reemplazando esta relación en la ecuación anterior, obtenemos.

$$< |S_0|^2 > = F(\bar{\eta}^2 - \bar{\eta})(1 - \beta_{ef}) \quad (C.3)$$

Las ecuaciones C.2 y C.3 se reemplazan en la ecuación C.1, resultando:

$$A = 2 \left( \frac{\bar{\eta}^2 - \bar{\eta}}{\bar{\eta}^2} \right) \frac{(1 - \beta_{ef})}{F\beta_{ef}^2}$$

Multiplicando la ecuación anterior por un factor ( $L_1$ ) que depende de la geometría del reactor y haciendo:  $D = \frac{\bar{\eta}^2 - \bar{\eta}}{\bar{\eta}^2}$

$$A = 2 \frac{D(1 - \beta_{ef})L_1}{F\beta_{ef}^2}$$

Donde  $D$  es llamado *el factor de Diven*,  $L_1$  y  $\beta_{ef}$  dependen de cada reactor. Generalmente son obtenidos mediante cálculo y para nuestro caso representan constantes.

# Apéndice D

## Análisis de las incertidumbres

Para este apartado se introducirán brevemente unos conceptos previos [30] y [31]:

- **Incertidumbre** ( $\Delta P$ ), parámetro que describe el nivel de dispersión de una medición, se representa como  $\Delta P$ , siendo  $P$  la medida obtenida. De forma general un valor es representado como:  $P \pm \Delta P$

- **Incertidumbre relativa**, se define mediante la ecuación D.1 y expresa la normalización de la incertidumbre.

$$\frac{\Delta P}{P} \quad (\text{D.1})$$

- **Incertidumbre tipo A** ( $\Delta P_A$ ), es aquella que puede ser estimada por métodos estadísticos.

- **Incertidumbre tipo B** ( $\Delta P_B$ ), aquella que no puede ser estimada por métodos estadísticos.

- **Incertidumbre combinada** ( $\Delta P_C$ ), involucra a la tipo A y B, de la siguiente forma:

$$\Delta P_C = \sqrt{\Delta P_A^2 + \Delta P_B^2} \quad (\text{D.2})$$

- **Incertidumbre expandida** ( $k\Delta P_C$ ), dado que la incertidumbre tiene propiedades de desviación estándar y por lo tanto posee una densidad de probabilidad Gaussiana es que se le puede multiplicar por una constante "k" llamada *factor de cobertura*, el cual nos brinda un nivel de confianza según su valor. Para  $k = 1, 2$  y  $3$  el nivel de confianza respectivo será 68,3, 95,5 y 99,7%. Este nivel de confianza nos indica el porcentaje de probabilidad de encontrar el valor medido en el intervalo descrito.

### D.1. Desviación estándar experimental

Para un conjunto de elementos procedentes de una medición, de la forma [31]:

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$$

Su desviación estándar queda definida como:

$$\Delta x = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (\text{D.3})$$

Lo expuesto en este apartado fue aplicado a cada columna de la matriz  $NAPSD(w)$  (matriz de  $100 \times 512$ ) obteniendo  $\Delta NAPSD(W)_A$

## D.2. Propagación de errores

En la mayoría de mediciones se combinan varias variables para obtener una sola cantidad, resultando también en una combinación de sus incertidumbres. Para ello se describen brevemente los siguientes casos.

### D.2.1. Propagación de errores en funciones de única variable

Dada la función arbitraria  $f(x)$  que depende de la medición de la variable  $x$  con incertidumbre  $\Delta x$ , entonces se estima la incertidumbre de la función ( $\Delta f(x)$ ) mediante [31]:

$$\Delta f(x) = \left| \frac{df(x)}{dx} \right| \Delta x \quad (\text{D.4})$$

- **Potencia térmica**, para este caso se calculó la incertidumbre de la potencia térmica dado que la ecuación utilizada para estimar su valor es:

$$P = \frac{2\gamma D(1 - \beta_{ef})L_1}{A\beta_{ef}^2}$$

Donde al utilizar la ecuación D.4, obtenemos:

$$\Delta P = \left| \frac{2\gamma D(1 - \beta_{ef})L_1}{A^2\beta_{ef}^2} \right| \Delta A$$

### D.2.2. Propagación de errores en función de varias variables

De forma análoga que en el apartado anterior, si se tiene la función  $f(x, y, z, \dots)$ , se define la incertidumbre de la función mediante la combinación de incertidumbres de las variables medidas como [31]:

$$\Delta f(x, y, z, \dots) = \sqrt{\left| \frac{\partial f}{\partial x} \right|^2 (\Delta x)^2 + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right|^2 (\Delta y)^2 + \left| \frac{\partial f}{\partial z} \right|^2 (\Delta z)^2 + \dots} \quad (\text{D.5})$$

**Para la suma o resta**

$$f(x, y) = x \pm y \rightarrow \Delta f(x, y) = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \quad (\text{D.6})$$

- **Promedio de la variable  $x$** , se calculó la incertidumbre asociada al promedio de dos o más valores de la variable  $x$ .

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \rightarrow \Delta\bar{x} = \frac{\sqrt{(\Delta x_1)^2 + (\Delta x_2)^2 + \dots + (\Delta x_n)^2}}{n}$$

La variable  $x$  puede ser reemplazada por los valores de la potencia térmica, constante  $\alpha_I$  y  $f^{(q)}$

### Para el producto o división

$$f(x, y) = xy \vee f(x, y) = \frac{x}{y} \rightarrow \Delta f(x, y) = f(x, y) \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2} \quad (\text{D.7})$$

La incertidumbre de muchas de las variables estimadas en el presente trabajo fueron mediante este método, como por ejemplo: el cálculo de la corriente  $I$  mediante el voltaje  $V$  y la resistencia  $Z$ , la estimación de cada valor  $f^{(q)}$  por medio del producto del ruido no correlacionado  $Rd$  y la corriente  $I$  (ecuación 3.45), la aproximación de la relación  $\varepsilon/\beta_{eff}^2$  mediante la división del parámetro nuclear  $A$  y el ruido no correlacionado  $Rd$  (ecuación 3.44).

- **NAPSD**, se calculó la incertidumbre relativa asociada a la cadena de medición (para cada fila de 512 elementos cada una), partiendo de la siguiente ecuación:

$$NAPSD(w_l) = 2 \frac{\delta V'(w_l) * \delta V'(w_l)}{k^2 T_0 F_s^2 V^2}$$

Aplicando la ecuación D.5, tenemos:

$$\Delta NAPSD(w_l)_B = \sqrt{\left| \frac{\partial NAPSD(w_l)}{\partial k} \right|^2 (\Delta k)^2 + \left| \frac{\partial NAPSD(w_l)}{\partial V} \right|^2 (\Delta V)^2}$$

$$\Delta NAPSD(w_l)_B = \sqrt{\left| \frac{4\delta V'(w_l) * \delta V'(w_l)}{k^3 T_0 F_s^2 V^2} \right|^2 (\Delta k)^2 + \left| \frac{4\delta V'(w_l) * \delta V'(w_l)}{k^2 T_0 F_s^2 V^3} \right|^2 (\Delta V)^2}$$

$$\Delta NAPSD(w_l)_B = \sqrt{\left| \frac{2\delta V'(w_l) * \delta V'(w_l)}{k^2 T_0 F_s^2 V^2} \right|^2 4 \left(\frac{\Delta k}{k}\right)^2 + \left| \frac{2\delta V'(w_l) * \delta V'(w_l)}{k^2 T_0 F_s^2 V^2} \right|^2 4 \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2}$$

$$\Delta NAPSD(w_l)_B = \sqrt{|NAPSD(w_l)|^2 4 \left(\frac{\Delta k}{k}\right)^2 + |NAPSD(w_l)|^2 4 \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2}$$

$$\frac{\Delta NAPSD(w)_B}{NAPSD(w)} = \sqrt{4 \left( \frac{\Delta k}{k} \right)^2 + 4 \left( \frac{\Delta V}{V} \right)^2}$$

Para estimar la incertidumbre combinada de la  $NAPSD(w)$ , aplicamos la ecuación D.2, obteniendo:

$$\Delta NAPSD(w) = \sqrt{(\Delta NAPSD(w)_A)^2 + (\Delta NAPSD(w)_B)^2} \quad (D.8)$$

### D.3. Promedio ponderado

Para estimar el promedio ponderado de una variable con mediciones procedentes de diferentes instrumentos, para un rango de valores de incertidumbres, tratamos la medición de cada uno de los instrumento con una determinada importancia, esta importancia se define como peso ponderado, el cual es inversamente proporcional al cuadrado de la incertidumbre estándar de la medición de cada instrumento. Formalmente [31]:

$$\bar{x} = \frac{\sum_i w_i x_i}{\sum_i w_i} \quad (D.9)$$

Donde  $x_i$  son todos los valores medidos de  $x$ , mientras que  $w_i$  son pesos ponderados que corresponden matemáticamente:

$$w_i = \frac{1}{\Delta x_i^2} \quad (D.10)$$

Se tiene que la inversa del cuadrado de la incertidumbre estándar del promedio ponderado está dado por:

$$\frac{1}{\Delta \bar{x}^2} = \sum_i \left( \frac{1}{\Delta x_i^2} \right) \quad (D.11)$$

# Bibliografía

- [1] Bermejo, J. Análisis de ruido en reactores PWR. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 2015. URL <https://oa.upm.es/39697/>.
- [2] Bellino, P., Gómez, A. Aplicación de la técnica de ruido neutrónico en subcrítico utilizando un nuevo sistema de adquisición de datos. Inf. téc., Física Experimental de Reactores - Centro Atómico Constituyentes - CNEA, Argentina.
- [3] Gómez, A., Bellino, P. Aplicación de la técnica de ruido neutrónico en el marco del proyecto UBERA-6 de cambio de núcleo y aumento de potencia del reactor RA-6. Inf. téc., Física Experimental de Reactores - Centro Atómico Constituyentes - CNEA, Argentina, 2009. CNEA-ITE-06REC-222-Rev.0.
- [4] CNEA. Unidad de Actividades: Reactores y Centrales Nucleares . Inf. téc., Argentina, 1998.
- [5] Quispe, J. Cálculo neutrónico de parámetros nucleares y reactividad de la configuración de núcleo 08 del RP-10 utilizando el código Montecarlo Serpent II. Inf. téc., Laboratorio de Física de Reactores - Departamento de Cálculo y Seguridad - Instituto Peruano de Energía Nuclear, Perú, 2020. RENU-CASE-IF-026. Rev. 01.
- [6] Miyara, F., Lahoz, L. Introducción al análisis frecuencial y al ruido eléctrico (3era Edición). Universidad Nacional de Rosario, 2003.
- [7] Oppenheim, A., Willsky, A. Señales y Sistemas. Prentice-Hall Hispanoamerica. México, 1983.
- [8] Fuensalida, J. Análisis espectral de datos. Instituto de Astrofísica de Canarias, 2006.
- [9] Gómez, A. Cinética de Reactores. Instituto de Enseñanza Superior de Ezeiza, 1997.
- [10] Gómez, A. Métodos de medición en física de reactores nucleares. Cinética y ruido neutrónico. Inf. téc., Argentina, 2008. CNEA-ITE-06REC-203. Rev. 2.
- [11] Cranberg, L., Frye, G., Nereson, N., Rosen, L. Fission Neutron Spectrum of  $U^{235}$ . *Physical Review*, **103** (3), 662–670, 1956. URL <https://doi.org/10.1103/PhysRev.103.662>.
- [12] Piñeyro, Waldman, Lescano. Análisis de ruido neutrónico a potencia cero. Inf. téc., Centro Atómico Constituyentes - CNEA, Argentina, s.a.

- [13] Erwin, C. A Simplified Theory of Pile Noise. *Nuclear Science and Engineering*, **7**, 472–475, 1960. URL <https://doi.org/10.13182/NSE60-4>.
- [14] Sheff, J., Albrecht, R. The space dependence of reactor noise I-theory. *Nuclear Science and Engineering*, **24**, 246–259, 1966. URL <https://doi.org/10.13182/NSE66-A17638>.
- [15] Zapata, M., Bruna, R., Parreño, F. Determinación de la potencia térmica del reactor nuclear RP-0 por las técnicas de ruido neutrónico y activación neutrónica. *Informe Científico Tecnológico*, **2**, 61–64, 2002. URL <http://dspace.ipen.gov.pe/handle/ipen/254>.
- [16] Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). Manual de uso - Cámaras de ionización compensada. . Argentina. (2000).
- [17] Gómez, A., Pecos, L., Bellino, P. Medición de potencia utilizando ruido neutrónico y  $N^{16}$ . Inf. téc., Física Experimental de Reactores - CNEA, Argentina, s.a.
- [18] Suica, J. Procedimiento para determinación de parámetros de cámaras CIC - Informe interno. Inf. téc., Laboratorio de Física de Reactores - Departamento de Cálculo y Seguridad - Instituto Peruano de Energía Nuclear, Perú, 2018.
- [19] Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). Manual de procedimientos de control de calidad de CIC modelo CI168/2. . Argentina. (1983).
- [20] Keithley Instruments & Products. ELECTROMETER / HIGH RESISTANCE METER 6517B Data sheet. [http://www.finaltest.com.mx/v/vspfiles/assets/datasheet/6517B\\_DataSht.pdf](http://www.finaltest.com.mx/v/vspfiles/assets/datasheet/6517B_DataSht.pdf). Accedido el 06-12-2019.
- [21] Huaccho, G., Quispe, J. Mediciones de los parámetros de calidad de las CIC - Informe interno. Inf. téc., Laboratorio de Física de Reactores - Departamento de Cálculo y Seguridad - Instituto Peruano de Energía Nuclear, Perú, 2019.
- [22] TecnoBrown. Manual de Operación. Detector neutrónico modelo CIC-40.
- [23] Quispe, J. Determinación de la variación de la potencia del RP-10 utilizando la técnica de ruido neutrónico. Inf. téc., Laboratorio de Física de Reactores - Departamento de Cálculo y Seguridad - Instituto Peruano de Energía Nuclear, Perú, 2019. RENU-CASE-IF-019. Rev. 01.
- [24] Challenger-Pérez, I., Díaz-Ricardo, Y., Becerra-García, R. El lenguaje de programación Python. *Ciencias Holgin*, **XX**, 1–13, 2014. URL <https://www.redalyc.org/pdf/1815/181531232001.pdf>.
- [25] Padilla, Jesse. Python: Programación Orientada a Objetos. <https://martefabian.files.wordpress.com/2009/04/2poopython-090413222419-phpapp02.pdf>. Accedido el 06-12-2019.
- [26] Chapra, S., Canale, R. Métodos numéricos para ingenieros. The McGraw-Hill Companies, 2006.
- [27] Brand, S. Data Analysis - Statistical and Computational Methods for Scientists and Engineers. Springer, 2014.

- [28] Bevington, P., Robinson, K. Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences. The McGraw-Hill Companies, 2003.
- [29] Arévalo, W. Calibración de potencia térmica versus corriente de la cámara de marcha ICM4 en el núcleo 08. Inf. téc., Laboratorio de Física de Reactores - Departamento de Cálculo y Seguridad - Instituto Peruano de Energía Nuclear, Perú, 2019. RENU-CASE-IF-032. Rev. 02.
- [30] International Standards Organization. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Inf. téc., , Geneva, 1993.
- [31] Hughes, I., Hase, T. Measurements and their Uncertainties. A practical guide to modern error analysis. Oxford University Press, 2010.