



Instituto de Tecnología Nuclear

***“DESARROLLO DE UN PROGRAMA PARA MONITOREAR
LA VIBRACIÓN DE LOS INTERNOS DEL REACTOR
NUCLEAR DE CNA-I POR RUIDO NEUTRÓNICO”***

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

Alumna: María Dolores Calvo
Director de Trabajo Final: Luis Wentzeis



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

***“DESARROLLO DE UN PROGRAMA PARA MONITOREAR
LA VIBRACIÓN DE LOS INTERNOS DEL REACTOR
NUCLEAR DE CNA-I POR RUIDO NEUTRÓNICO”***

Trabajo final presentado para optar al título de
“Especialista en Reactores Nucleares y su Ciclo de Combustible”

Alumna: María Dolores Calvo
Director de Trabajo Final: Luis Wentzeis

Abril - 2008

Agradecimientos

Agradezco a mis familiares por su invaluable apoyo en todo momento, que fue fundamental para concluir esta carrera y por lo tanto tener la posibilidad de trabajar en el área nuclear, que era algo que siempre anhelaba.

A todo el personal del Instituto de Tecnología Nuclear Dan Beninson, en especial a la Lic. Carla Notari, a la Dra. Ana María Lerner, al Prof. Adrián Daoud, a la Lic. Silvia Makler, a la Sra. Mirta Colombo y a todo el plantel docente. A todos los compañeros con quienes cursé esta especialización, por apoyarme de forma invaluable en lo personal y en lo académico.

Al Ing. Eduardo Porro, a la Mgr. Lucia Ramilo, al Lic. Angel Gómez, a la Sra. Karina Porro, a la Sra. Sara Bronte y a la Sra. Graciela Ciak. Quiero agradecer de manera especial al Lic. Luis Wentzeis por la dedicación, responsabilidad y paciencia mostradas en el asesoramiento que me brindó para desarrollar este trabajo final, pese al poco tiempo y a las dificultades. Asimismo al Lic. Ramón Pérez y al Ing. Raimundo Morganti de la Central Nuclear Atucha I.

A Pablo Bellino y Adalberto Pereyra por proporcionarme información técnica y darme sugerencias que me resultaron de tanta ayuda en el desarrollo de este trabajo.

Resumen

El presente trabajo incluye el desarrollo de un prototipo de software para el cálculo automático de valores RMS (root mean square o raíz media cuadrática), a partir de de espectros generados con el sistema de monitoreo de la vibración de los internos del reactor de la Central Nuclear Atucha I (CNA-I). El mismo contiene como una de sus funcionalidades exportar los resultados a planillas de Microsoft Excel, para su despliegue tanto textual como gráfico.

En el Capítulo 1 se incluyen los antecedentes del presente desarrollo (referidos particularmente al sistema de alerta temprana que funciona actualmente en CNA-I), la propuesta, el objetivo de este trabajo final, la metodología aplicada en la elaboración del informe y el alcance del mismo. El Capítulo 2 contiene una descripción general del reactor nuclear, de su instrumentación y de la CNA-I tomando en cuenta los datos técnicos que resultan relevantes para el presente desarrollo. El Capítulo 3 incluye la descripción de fórmulas matemáticas de análisis de ruido que son aplicables al estudio de las vibraciones mecánicas del reactor. Finalmente el Capítulo 4 hace referencia a la metodología de desarrollo de este programa y el Capítulo 5 incluye los resultados obtenidos a partir de la ejecución del mismo, que son los valores de raíces medias cuadráticas de los espectros de las cámaras de ionización y sensores autoenergizados.

Por último se tienen las conclusiones y las recomendaciones obtenidas a partir del análisis de los resultados, y los anexos que constituyen la documentación del programa elaborada durante su desarrollo.

Índice

Introducción.....	1
 Capítulo 1: Definición del Problema	
1.1. Introducción.....	2
1.2. Antecedentes.....	2
1.3. Objetivo.....	2
1.4. Propuesta.....	2
1.5. Metodología.....	3
1.6. Alcance.....	3
 Capítulo 2: Reactor Nuclear de la Central Atucha I	
2.1. Introducción.....	4
2.2. Datos Técnicos.....	4
2.3. Instrumentación Relacionada con el Monitoreo de Ruido Neutrónico...	5
2.3.1. Cámaras de Ionización.....	5
2.3.2. Sensores Autoenergizados.....	6
2.4. Sistema de Monitoreo de Vibraciones de los Internos del Reactor.....	8
2.4.1 Ventajas de la Aplicación de la Técnica de Ruido Neutrónico.....	10
 Capítulo 3: Análisis de Señales	
3.1. Introducción.....	12
3.2. Análisis de Ruido en el Dominio de la Frecuencia.....	12
3.3. Media Cuadrática RMS.....	15
 Capítulo 4: Desarrollo de la Aplicación de Software	
4.1. Introducción.....	17
4.2. Metodología de desarrollo.....	17
4.3. Descripción de procedimientos y funciones del programa.....	20
4.3.1. Ordenamiento cronológico de corridas.....	20
4.3.2. Lectura de los archivos de corridas.....	21
4.3.3. Lectura del archivo de bandas.....	22
4.3.4. Cálculo de valores NRMS.....	22
4.3.5. Visualización de resultados.....	22

Capítulo 5: Resultados

5.1. Introducción.....	24
5.2. Archivo de bandas.....	24
5.3. Carpetas y archivos de corridas.....	27
5.4. Ejecución del programa.....	29
5.4.1. Valores NRMS para las cámaras de ionización.....	31
5.4.2. Valores NRMS para los sensores autoenergizados.....	34

Conclusiones.....	36
--------------------------	-----------

Recomendaciones.....	36
-----------------------------	-----------

Referencias bibliográficas.....	38
--	-----------

Anexos

Anexo 1 – Información para el usuario.....	39
Anexo 2 – Documentación preliminar del programa.....	47

Introducción

El diagnóstico temprano de vibraciones anómalas en componentes internos de un reactor nuclear resulta de primordial importancia para la seguridad en su operación. En la Central Nuclear Atucha I se aplica la técnica de ruido neutrónico en forma rutinaria con éxito desde el año 1990.

La señal de flujo neutrónico está compuesta de un componente estable que resulta del flujo producido por la operación a potencia del reactor y un componente de fluctuación muy pequeño conocido como “ruido neutrónico”. La fluctuación en la señal de flujo neutrónico es el resultado de los procesos físicos que se producen en el reactor, principalmente oscilaciones termohidráulicas y vibraciones mecánicas de los internos. Esta fluctuación es la variable de interés en el presente trabajo.

El monitoreo de las vibraciones de los internos del reactor por medio del análisis de ruido neutrónico ha sido utilizada en muchos países como un método de detección temprana de fallas tanto en reactores BWR como PWR, por más de 30 años. En el caso de Argentina esta técnica ha sido utilizada con éxito en las centrales nucleares de Atucha I y Embalse desde 1987.

El análisis de ruido facilita el mantenimiento predictivo obteniéndose mayor seguridad y disponibilidad de la planta.

El software desarrollado permite calcular automáticamente los valores de raíz media cuadrática para los distintos espectros medidos, ordenándolos previamente de forma cronológica, con la finalidad de facilitar un análisis rápido de las vibraciones mecánicas dentro del contexto de una evolución temporal de las mismas.

CAPÍTULO 1

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

1.1. Introducción

En el presente capítulo se presentan los antecedentes, la propuesta, el objetivo planteado así como la metodología aplicada dentro del alcance del trabajo.

1.2. Antecedentes

El Sistema de Alerta Temprana, basado en la técnica de Análisis de Ruido Neutrónico, fue desarrollado por el Grupo “Física Experimental de Reactores” de la Comisión Nacional de Energía Atómica y ha sido instalado en la Central Nuclear Atucha I (CNA-I) en enero de 1990, para la vigilancia de las vibraciones mecánicas de los internos del reactor.

Las mediciones continuas que realiza el mismo permiten mantener un conocimiento actualizado del estado mecánico de los componentes internos del reactor con el fin de evitar anomalías y roturas.

1.3. Objetivo

Desarrollar un programa para el cálculo de los valores de raíz media cuadrática correspondientes a los espectros neutrónicos que caracterizan a las vibraciones de los internos del reactor, con la finalidad de facilitar el análisis de ruido para la detección de fallas mecánicas incipientes.

1.4. Propuesta

Con el fin de analizar en detalle los datos obtenidos a partir del sistema de alerta temprana mencionado anteriormente, se propone en el

presente trabajo el desarrollo de una aplicación complementaria de software escrito en Visual Basic 6.0 que permita calcular los valores de raíz media cuadrática de los espectros de los detectores neutrónicos, con el fin de facilitar la detección temprana de fallas mecánicas y vibraciones anómalas.

1.5. Metodología

El desarrollo de este trabajo incluye las siguientes actividades:

- Revisión de documentación de CNEA
- Desarrollo de la aplicación de software
- Generación de resultados
- Redacción del informe final

1.6. Alcance

El presente trabajo incluye el análisis y codificación de una aplicación de software para el cálculo de los valores de raíz media cuadrática de los espectros neutrónicos de cada detector, y que son desplegados de forma textual y gráfica, quedando a cargo del usuario final todo diagnóstico a partir de los mismos.

Los datos de los espectros neutrónicos fueron generados por el sistema de monitoreo de las vibraciones de los internos del reactor de la CNA-I, con el fin exclusivo de efectuar pruebas de ejecución del programa de software en esta fase piloto del proyecto.

Se ha considerado como parte del presente trabajo solamente el rango de frecuencia que corresponde a las vibraciones mecánicas de los internos del reactor.

CAPÍTULO 2

REACTOR NUCLEAR DE LA CENTRAL ATUCHA I

2.1. Introducción

La CNA-I está situada a 100 Km de la Ciudad de Buenos Aires y a 11 Km de la localidad de Lima, Partido de Zárate. En este capítulo se resumen los datos técnicos útiles dentro del alcance del trabajo.

2.2. Datos Técnicos

Tipo de Reactor	PHWR - Recipiente de presión
Fabricante	Siemens – Alemania
Potencia Térmica	1179 MWt
Potencia Eléctrica	357 MWe
Circuito Primario	Dos loops, con una bomba y un generador de vapor.
Circuito Secundario	Una turbina de vapor saturado, en una etapa de alta presión y tres etapas de baja presión. Velocidad de la turbina: 3000 RPM.
Moderador	Agua pesada (D ₂ O)
Refrigerante	Agua pesada (D ₂ O)
Combustible	Pastillas de dióxido de uranio natural (aprox. 0,72%) o uranio levemente enriquecido (0,85%)
Generador de Vapor	Dos verticales, tubos en “U”, incolloy 800
Alternador	Velocidad: 3000 RPM, 21 KV, 400 MVA.
Segundo Sumidero de Calor	2 motores bomba-generador Motor diesel: 420 KW Bomba: 320 KW Generador: 100 KW Caudal de impulsión: 100 Ton/h a 72 bar Volumen de agua disponible: 400 m ³

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas generales del reactor y de la CNA-I.

El núcleo del reactor de Atucha I está compuesto de 252 posiciones con canales de refrigeración. Dentro de cada uno de ellos están alojados los elementos combustibles, que contienen uranio levemente enriquecido al 0,85% en forma de pastillas de dióxido de uranio (UO_2) sinterizadas.

El reactor es moderado y refrigerado con agua pesada (D_2O) y pertenece al tipo de reactores PHWR (reactor presurizado de agua pesada). Este diseño de reactor permite efectuar el recambio de combustible durante la operación normal de la planta a un promedio de un elemento combustible por día a plena potencia.

2.3. Instrumentación Relacionada con el Monitoreo de Ruido Neutrónico

A continuación está detallado el conjunto de detectores de radiación neutrónica que responden a la siguiente clasificación:

- Cinco cámaras de ionización ex-core,
- Cuarenta y ocho sensores autoenergizados in-core.

2.3.1. Cámaras de ionización

Se cuenta con cinco cámaras de ionización que están instaladas externamente al núcleo (ex-core) y distribuidas de forma equidistante en el plano medio del reactor.

Todas las cámaras de ionización consideradas emplean la reacción $\text{B}^{10}(\text{n},\alpha)\text{Li}^7$ para la detección de neutrones.

Las primeras cuatro cámaras se encuentran dentro del rango de potencia y son de tipo no compensadas. En estas cámaras, el B^{10} se incorpora en la forma de un revestimiento delgado de uno o dos electrodos. La última cámara es de tipo compensada, trabaja dentro del

rango lineal medio y utiliza una estructura de tres electrodos cilíndricos concéntricos abiertos.

La tabla siguiente muestra la clasificación e identificación de las cámaras de ionización.

Cámaras de ionización	Rango de potencia	YX04X01
		YX04X02
		YX04X03
		YX04X04
	Rango lineal medio	YX03X04

Tabla 2.2. Identificación de cámaras de ionización

2.3.2. Sensores autoenergizados

Se cuenta con cuarenta y ocho sensores autoenergizados de vanadio, instalados en los internos del reactor (in-core), con la siguiente distribución en ocho lanzas de instrumentación:

- Seis lanzas largas con siete detectores cada una
- Dos lanzas cortas con tres detectores cada una

El principio de operación de estos detectores se basa en la conversión del neutrón incidente sobre el material del emisor en electrones energéticos que penetran la aislación sólida y se frenan en el colector o en sus alrededores.

La diferencia de cargas entre el emisor y el colector del detector autoenergizado da lugar a una corriente, la cual será proporcional a la velocidad con que la radiación es absorbida por el emisor.

Los sensores autoenergizados instalados están listados en la tabla 2.3 y clasificados según su lanza respectiva.

Las lanzas mencionadas permiten el monitoreo del reactor en distintos planos.

Lanzas Cortas		Lanzas Largas					
Lanza 1	Lanza 2	Lanza 3	Lanza 4	Lanza 5	Lanza 6	Lanza 7	Lanza 8
NU21X221	NU21X211	NU21X141	NU21X151	NU21X161	NU21X111	NU21X121	NU21X131
NU21X222	NU21X212	NU21X142	NU21X152	NU21X162	NU21X112	NU21X122	NU21X132
NU21X223	NU21X213	NU21X143	NU21X153	NU21X163	NU21X113	NU21X123	NU21X133
		NU21X144	NU21X154	NU21X164	NU21X114	NU21X124	NU21X134
		NU21X145	NU21X155	NU21X165	NU21X115	NU21X125	NU21X135
		NU21X146	NU21X156	NU21X166	NU21X116	NU21X126	NU21X136
		NU21X147	NU21X157	NU21X167	NU21X117	NU21X127	NU21X137

Tabla 2.3. Identificación de detectores autoenergizados.

La figura 2.1 presenta un esquema de la ubicación física de las lanzas de instrumentación de los detectores autoenergizados dentro del núcleo del reactor:

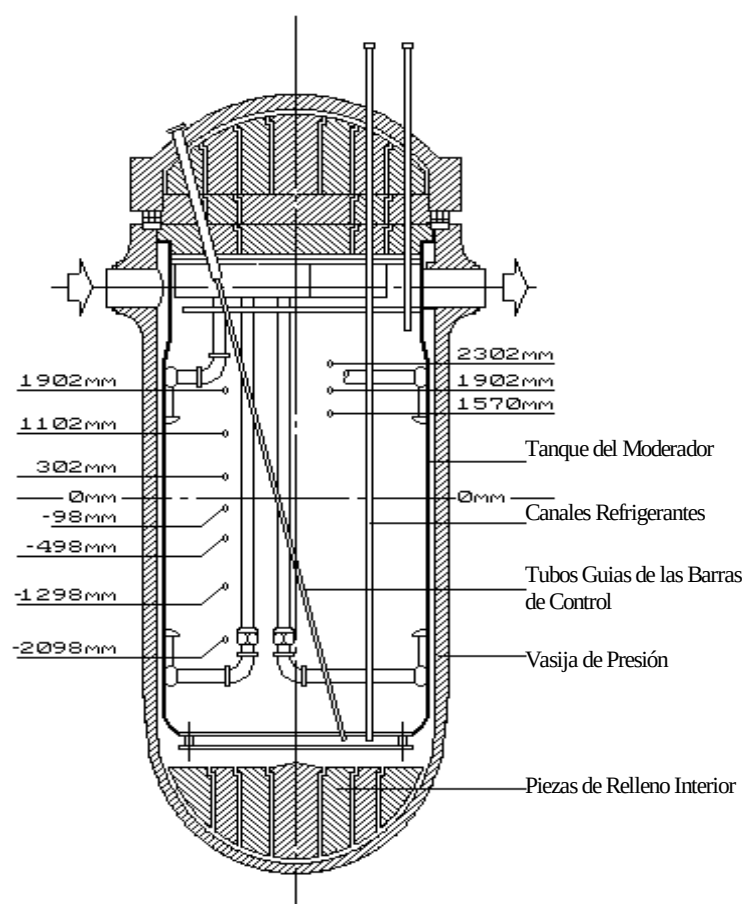


Fig. 2.1. Ubicación física de los detectores autoenergizados

La figura 2.2 muestra las cámaras de ionización que se pueden distinguir fuera del núcleo por sus identificadores. También se incluyen las lanzas 1 a 8 de los detectores in-core.

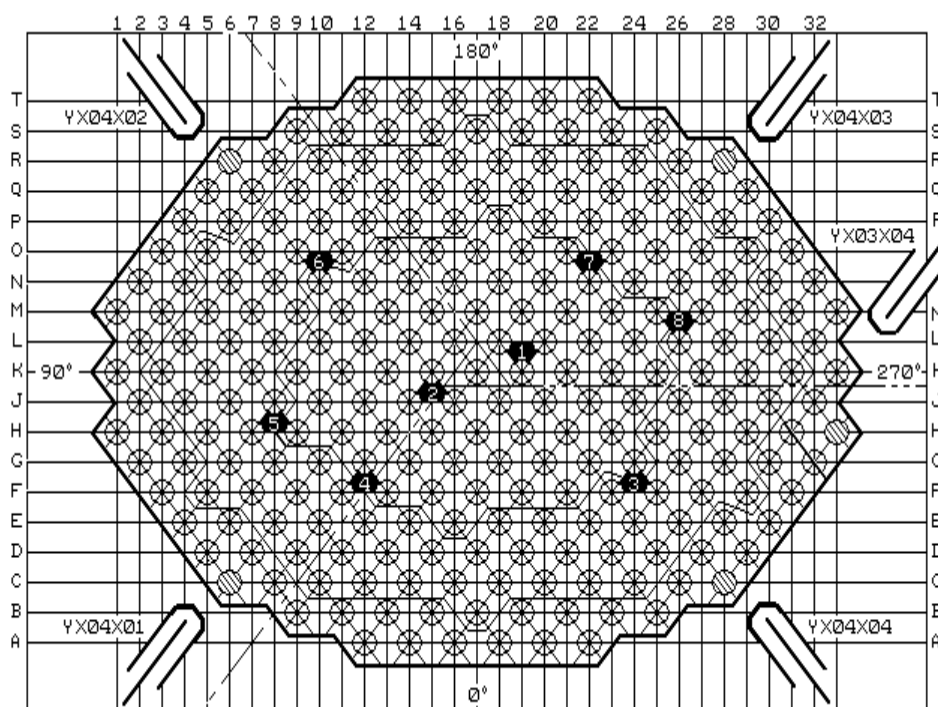


Figura 2.2. Ubicación de sensores en un corte transversal del núcleo.

2.4. Sistema de Monitoreo de Vibraciones de los Internos del Reactor

Actualmente se cuenta con un programa de software [3] que efectúa el muestreo de los datos (con un intervalo de muestreo de 10 milisegundos y un ancho de banda de 50 Hz). El mismo calcula y almacena los datos de los espectros que son utilizados como datos de entrada para el cálculo de los valores de raíz media cuadrática que efectúa el software propuesto en este trabajo.

De acuerdo a lo expuesto en [5], las señales provenientes de los sensores pasan por una primera etapa de acondicionamiento donde los amplificadores de planta con separadores galvánicos transforman las

señales de corriente a señales de tensión. Luego estas señales preacondicionadas llegan a la bornera (donde se encuentra instalado el sistema de alerta temprana). Es necesario tener en cuenta que la máxima cantidad de señales que se pueden seleccionar para su procesamiento es de 16. Las señales ya seleccionadas pasan por una segunda etapa de amplificadores de ruido, donde se usan amplificadores con aislación óptica, a los que se les han incorporado filtros anti-aliasing con una alta atenuación de la señal (80 dB/década). De esta forma, se separa la componente de señal de corriente alterna (AC) de la de corriente continua (DC). La AC es filtrada para prevenir los efectos de aliasing (que es el problema de solapamiento entre bandas, descrito en el Capítulo 3), para luego amplificar la señal a niveles de amplitud donde es más fácil su adquisición y con un menor error de cuantificación.

Las señales analógicas de salida de los amplificadores de ruido, constituyen la entrada de la tarjeta convertidora analógico-digital (ADC) que es la PC-LabCard PCL-818H de Advantech.

La digitalización de las señales se efectúa para su posterior procesamiento y almacenamiento como datos en la misma computadora donde está instalado el software de alerta temprana. La figura 2.2 muestra el diagrama general del sistema de alerta temprana en cuanto a la adquisición de datos efectuada [5].

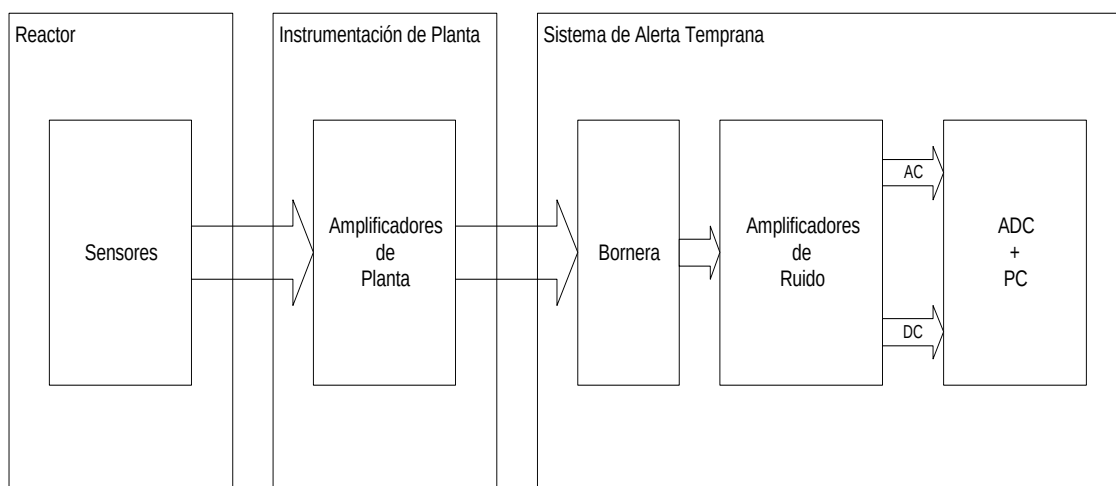


Fig. 2.2. Diagrama general del sistema de alerta temprana.

2.4.1. Ventajas de la aplicación de la técnica de ruido neutrónico

El sistema de monitoreo descrito permite la adquisición de los datos para su análisis por medio de la técnica de ruido neutrónico. En este inciso se exponen las ventajas y resultados obtenidos a partir de su aplicación, según lo indicado en [4].

Las principales ventajas de esta técnica son las siguientes:

- El monitoreo es realizado sin causar interferencia con la operación normal de la planta, y utilizando la instrumentación de planta estándar.
- Ofrece información dinámica útil para la detección temprana de:
 1. Fallas en la integridad de los sensores de la planta y de la cadena de medición (sistemas de transmisión de señales: cables, conectores, dispositivos electrónicos: amplificadores, filtros, etc.)
 2. Vibraciones anómalas incipientes de los internos del reactor: Elementos Combustibles, Tubos de Instrumentación, Tanque del Moderador, Vasija de Presión, Barras de Control.
 3. Cambios en las condiciones operativas o mal funcionamiento de los componentes del loop primario: generadores de vapor, bombas de refrigeración.

Por estas razones la técnica de análisis de ruido contribuye a incrementar la seguridad y disponibilidad de la central nuclear, debido a que permite realizar un mantenimiento predictivo continuo de los principales componentes de la planta.

El análisis es realizado en el dominio de la frecuencia, a partir de los datos que provienen de las fluctuaciones en las señales de los sensores, utilizando la Transformada Rápida de Fourier.

Los rangos de frecuencia (f) que son de interés en el análisis son:

- a) $f < 1$ Hz: Procesos termohidráulicos y componentes del loop primario: núcleo del reactor, generadores de vapor, entre otros.

b) $1 < f < 40$ Hz: Vibraciones mecánicas de los internos del reactor.

Los resultados que se han obtenido, entre otros, son los siguientes:

- Verificación de las cadenas de medición neutrónicas
- Identificación de las frecuencias naturales de vibración de los internos del reactor y modos de vibración
- Detección de fallas incipientes en sensores y vibraciones particulares en ciertos elementos combustibles, especialmente durante las operaciones de recambio.

Finalmente, es necesario mencionar que en el mercado existen detectores de vibración con salida analógica pero no son recomendables en este caso puesto que por su diseño se deteriorarían rápidamente a causa de los niveles de radiación.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE SEÑALES

3.1. Introducción

El término “ruido” es utilizado frecuentemente en muchas áreas de la ciencia y de la ingeniería. Por ejemplo la música consiste de pulsaciones regulares o periódicas, en cambio el ruido acústico es aleatorio e irregular. Similarmente, en el caso de un reactor nuclear la potencia neutrónica es de naturaleza aleatoria. Si la población neutrónica es relativamente baja, el ruido neutrónico será causado por los efectos de los neutrones individuales (procesos de absorción y fisión). Por otro lado, si la población neutrónica es alta, como cuando el reactor funciona a plena potencia, la potencia neutrónica presentará fluctuaciones (ruido neutrónico), causadas por las vibraciones de los internos o bien por variaciones de los parámetros termohidráulicos (por ej: densidad y temperatura del moderador). Todos estos fenómenos se caracterizan por presentar un comportamiento aleatorio.

3.2. Análisis de ruido en el dominio de la frecuencia

En este inciso se describen las fórmulas de análisis de ruido que resultan de utilidad dentro del alcance del trabajo, y de acuerdo a [1].

El ruido se puede describir como una función del tiempo. De acuerdo al Teorema de Fourier, una función del tiempo puede ser caracterizada por la superposición de ondas sinusoidales de varias frecuencias con sus amplitudes y fases. Una representación general es la siguiente:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) \exp(i\omega t) df$$

Donde $X(f)df$ es la amplitud compleja de Fourier de la oscilación en la región entre f y $f + df$. El comportamiento de $|X(f)|^2$ con su frecuencia es uno de los métodos más útiles para describir el ruido.

Sea $y(t)$ el componente fluctuante de una señal que es proporcional al flujo neutrónico y a la potencia del reactor. Cuando se lo hace pasar a través de un filtro pasabandas, sólo las frecuencias entre f y $f + \Delta f$ son transmitidas a un vatímetro que da como resultado $G_y(f)\Delta f$, es decir la potencia en el espectro de Fourier entre f y $f + \Delta f$.

El teorema de Parseval establece que la varianza sobre una banda de frecuencia es la suma de todas las potencias espectrales en dicha banda:

$$\sigma^2 = \int G_y(f)df$$

Si este teorema se aplica en el caso de una banda muy estrecha Δf , se tendrá una varianza en la señal de $G_y(f)\Delta f$, y la varianza por unidad de frecuencia será $G_y(f)$. Por tal motivo esta función se llama densidad espectral de potencia (*PSD*, o *power spectral density*) en el dominio de la frecuencia.

Una función $x(t)$, definida para $-T/2 \leq t \leq T/2$, puede ser expresada como series de Fourier de la siguiente forma:

$$x(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} X_j \exp(i \frac{2\pi j}{T} t)$$

La potencia total del espectro P_t es el valor medio de x^2 sobre la duración T de los datos y de acuerdo al Teorema de Parseval está dada por:

$$P_t = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} [x(t)]^2 dt = \sum_{j=-\infty}^{\infty} |X_j|^2 = X_0^2 + 2 \sum_{j=1}^{\infty} |X_j|^2$$

El espectro de la potencia P_t incluye valores de $|X_j|^2$ para los enteros $j = 1, 2, \dots, \infty$. El primer término es la frecuencia cero o potencia DC (P_{dc}), es decir $X_0 = (\bar{x})^2$. El resto del espectro es el componente total fluctuante o potencia AC (P_{ac}), que en otras palabras es la varianza:

$$P_{ac} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} (x(t) - \bar{x})^2 dt = \sigma^2 = 2 \sum_{j=1}^{\infty} |X_j|^2$$

Para una función continua $x(t)$ las mayores frecuencias pueden ser infinitas, pero para efectuar un análisis de Fourier en puntos discretos en el tiempo se necesita establecer una frecuencia máxima que es la llamada frecuencia de Nyquist f_N (o frecuencia de corte). Y está dada por:

$$f_N = \frac{1}{2\Delta t}$$

Esta frecuencia máxima también es conocida como ancho de banda. Para la medición, se toman N puntos de datos en el tiempo espaciados uniformemente por un intervalo Δt .

Cuando la señal es muestreada, y para poder reconstruir la señal original evitando el solapamiento entre las bandas, la frecuencia de muestreo debe ser mayor o igual al doble del ancho de banda:

$$f_s \geq 2 f_N$$

Por lo que se debe muestrear la señal con una rapidez igual o mayor que $2 f_N$ muestras por segundo. En el caso del tema que nos ocupa, que es el análisis de vibraciones por medio de la técnica de ruido neutrónico, se toma como frecuencia máxima $f_N = 50$ Hz, que es adecuada para monitorear vibraciones de origen mecánico que se caracterizan por tener valores menores a 25 Hz. Luego N , que es la cantidad de puntos que se miden en el tiempo mediante la tarjeta de adquisición de datos, es igual a 1024.

Se define el intervalo de muestreo como $\Delta f = \frac{f_N}{\frac{N}{2}}$.

Los puntos discretos en frecuencia se calculan según la fórmula $f = (I - 1)\Delta f$, donde I toma valores desde 0 hasta $\frac{N}{2} + 1$.

3.3. Media cuadrática RMS

La media cuadrática *RMS* es una medición estadística de la magnitud de una cantidad variable. Es especialmente útil cuando las variaciones son positivas o negativas.

El valor *RMS* (o *root mean square*) se define como la raíz cuadrada de la media aritmética para una serie de valores discretos o para una función variable continua. El presente trabajo trata sobre el desarrollo de una aplicación de software que permite calcular el valor *RMS* para una serie de valores discretos.

Sea una colección de N valores cualesquiera $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ con valor medio $\bar{x} = 0$. El valor *RMS* está dado por la fórmula:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2}{N}}$$

Luego se tiene que $\sigma^2 = RMS^2$. De acuerdo a lo expuesto en este capítulo, se puede definir este valor tomando todo el ancho de banda de manera general como:

$$RMS^2 = \int_0^{f_s} PSD(f) df$$

Discretizando la función anterior, se obtiene la siguiente fórmula para una banda que ha sido codificada en Visual Basic:

$$RMS = \sqrt{\sum_{Kini}^{Kfin} PSD(I) \Delta f}$$

Donde $Kini$ y $Kfin$ son los valores discretos de las frecuencias inicial $Fini$ y final $Ffin$ de cada banda respectivamente.

En otras palabras lo que el software calcula para cada banda de frecuencia (comprendida entre $Fini$ y $Ffin$) de cada espectro es el valor RMS , que es equivalente a la raíz cuadrada del error cuadrático medio de los datos temporales correspondientes a dicha banda con respecto al valor medio, y que es igual a la desviación estándar o típica. En el texto, se hará referencia a los valores calculados de forma indistinta como RMS o $NRMS$ (o valores RMS de espectros neutrónicos *normalizados*). Los espectros neutrónicos normalizados se obtienen a partir de la fluctuación del flujo neutrónico o componente AC, dividida por la componente DC.

CAPÍTULO 4

DESARROLLO DE LA APLICACIÓN DE SOFTWARE

4.1. Introducción

Cuando se requiere desarrollar cualquier programa o sistema de software, independientemente de su tamaño o complejidad, es recomendable seguir una metodología de desarrollo específica, que resulte adecuada. El seguimiento de toda metodología en particular apunta a obtener como resultado un programa final que cumpla con los requerimientos iniciales, en el menor tiempo posible y a un costo razonable. Asimismo se debe obtener un producto de software fácil de mantener y ampliar en un futuro.

En el presente capítulo se describe brevemente la metodología de desarrollo de software Extreme Programming (XP) que se aplica en el presente proyecto, y que constituye el marco de referencia para las actividades de análisis, programación y documentación. [9]

4.2. Metodología de Desarrollo

La metodología denominada Programación Extrema (o XP, Extreme Programming) responde a una renovación metodológica surgida de la necesidad de crear software más rápidamente sin ir en detrimento de la calidad del mismo. Esta metodología por lo tanto se caracteriza por ser muy ágil y se atribuye principalmente a Kent Beck, Ron Jeffries y Ward Cunningham.

La aplicación práctica de esta metodología se centra en crear grupos pequeños de desarrollo, haciendo énfasis en una mejor comunicación con el usuario del producto de software final.

Este enfoque de desarrollo resulta ideal para proyectos de software que se caracterizan por tener requerimientos inicialmente exigentes y de alto riesgo.

En la creación de software muy especializado como en este caso concreto - el cálculo de valores NRMS a partir de distintos espectros neutrónicos – es muy importante la detección temprana de posibles errores y la inclusión de mejoras en fases tempranas del desarrollo, con lo que es más factible lograr un producto de software confiable y realmente útil para el usuario final.

Según este enfoque, las actividades realizadas durante el desarrollo han sido las siguientes:

- Codificación. Se han realizado tareas de programación desde el inicio del desarrollo de este producto de software, con el fin de probar características del mismo y minimizar errores lo más tempranamente posible dentro del ciclo de vida del proyecto.
- Pruebas. Se han efectuado pruebas previas para comprobar si el código realiza los cálculos correctamente, y por lo tanto funciona de acuerdo a lo esperado. En este sentido, la comunicación entre programador y usuario es fundamental durante todo el ciclo de desarrollo.
- Diseño. Se ha procedido a la estructuración de la lógica del sistema, subdividiendo el código en procedimientos y funciones.

El ciclo de vida de este proyecto se caracteriza por ser iterativo e incremental. Una iteración es un intervalo de tiempo donde se implementa un conjunto determinado de funcionalidades de software que corresponden a las historias de usuarios que forman parte de la documentación. Dentro del alcance del presente desarrollo se ha efectuado una iteración en un tiempo aproximado de ocho semanas.

En este contexto, se aplicó el enfoque incremental optimizando la creación de subrutinas y formularios con el objetivo de que la adición

continua de mejoras y otras funcionalidades en cada nueva iteración sea lo más rápida y simple posible. [8]

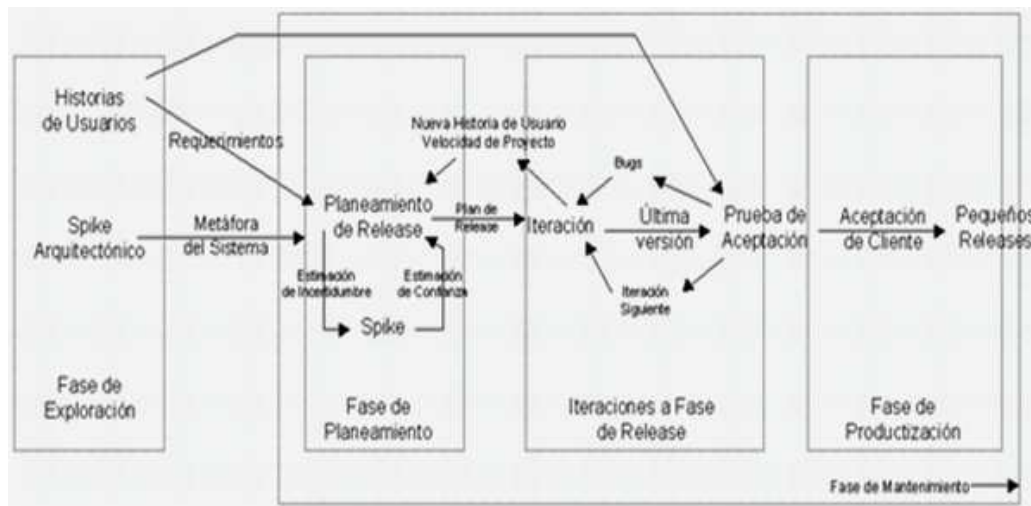


Fig. 4.1. Metodología de Desarrollo de Software

Siguiendo la metodología esquematizada en la figura 4.1, se han iniciado las siguientes fases de desarrollo: exploración, planeamiento, release y productización.

En la fase de exploración se han recopilado los requerimientos generales del software.

En la fase siguiente de planeamiento se procedió a la elaboración de la documentación preliminar del software, que incluye: las historias de usuario y las tareas de ingeniería.

Las historias de usuario permiten especificar con una terminología propia del usuario, el comportamiento que deberá tener el sistema en líneas generales. En cada una se debe indicar su numeración, nombre e iteración asignada. En el caso del presente proyecto se ha desarrollado una iteración o release.

Las tareas de ingeniería contienen las directivas para la codificación de las funcionalidades del software que cumplan con los requerimientos iniciales indicados en las historias de usuario.

La elaboración de los casos de usuario y de las tareas de ingeniería facilita las tareas de delimitar el alcance del proyecto, estimar los tiempos y planificar las pruebas.

La documentación preliminar del software, que incluye las historias de usuario y las tareas de ingeniería, está incluida en el Anexo 2.

Finalmente en la fase de productización se procedió a la codificación del programa en Visual Basic 6.0, tomando como base esta documentación preliminar.

4.3. Descripción de Procedimientos y Funciones del Programa

El código del programa está estructurado en base a las siguientes funcionalidades requeridas:

- Ordenamiento y lectura de corridas y espectros.
- Lectura del archivo de bandas con los sensores a analizar.
- Cálculo de valores RMS
- Despliegue gráfico de resultados.

4.3.1. Ordenamiento Cronológico de Corridas

Las corridas que contienen la información sobre los distintos espectros de un sensor o un determinado conjunto de sensores, son ordenadas cronológicamente (por fecha y por hora) como un requisito previo al cálculo de los valores RMS.

La finalidad de este ordenamiento es facilitar al usuario el análisis correcto de todos los espectros a lo largo de una línea de tiempo, para cada uno de los sensores listados en el archivo de bandas.

Para poder efectuar dicho ordenamiento, las corridas deben estar contenidas en carpetas cuyos nombres correspondan al formato <mDDHHMM>. Esta nomenclatura está descrita en la tabla 4.1.

En todos los casos, m es el mes en que se inició la adquisición de datos de la corrida, DD es el día, HH es la hora y MM son los minutos, respectivamente.

Por ejemplo se pueden tener las carpetas de corridas con los siguientes nombres “J201335”, “J221349” y así sucesivamente.

	Mes	Día	Hora	Minutos
Letra	m	DD	HH	MM
Valores	E = enero F = febrero Z = marzo A = abril M = mayo J = junio L = julio G = agosto S = septiembre O = octubre N = noviembre D = diciembre	01 a 31 (según el mes del año), con dos dígitos	00 a 23, con dos dígitos	00 a 59, con dos dígitos

Tabla 4.1. Nomenclatura de carpetas de corridas.

Esta aplicación de software, en el estadio de ordenamiento de corridas, efectúa las validaciones necesarias (especialmente para comprobar si la letra del mes es correcta de acuerdo a esta nomenclatura).

4.3.2. Lectura de los archivos de corridas

El usuario debe seleccionar la carpeta donde asimismo se encuentran las carpetas de corridas – cuya nomenclatura se ha descrito anteriormente - y que contienen la información de los distintos espectros.

4.3.3. Lectura del archivo de bandas

El panel izquierdo del formulario principal permite seleccionar el archivo de bandas que contiene un listado de los sensores para los que se calcularán los valores RMS.

4.3.4. Cálculo de valores NRMS

El resultado de la selección aparece en un recuadro en la esquina inferior izquierda con campos donde el usuario deberá hacer clic en el botón “Aplicar” para ingresar efectivamente tanto el archivo de bandas como las corridas a ser analizadas. Una vez seleccionados el archivo de bandas y las corridas, el usuario debe presionar el botón “Calcular RMS”, para iniciar el cálculo de estos valores a partir de los distintos espectros y para cada sensor que esté listado en el archivo de bandas. Los cálculos se efectúan de acuerdo a las fórmulas relacionadas con el análisis de señales y que han sido explicadas en el capítulo 3.

4.3.5. Visualización de resultados

En la parte inferior derecha de la pantalla figura la lista de los archivos de resultados o valores NRMS (que son guardados como archivos de texto con extensión .RMS). Por cada sensor analizado se tiene un archivo cuyo nombre es el mismo identificador del sensor. En esta versión de software, el usuario puede utilizar el comando que le permite estos datos automáticamente a planillas Excel, luego de presionar el botón correspondiente “Exportar a Excel”. Si el usuario ejecuta la acción de exportar a Excel por segunda vez para otro detector, se generará otra planilla Excel. En todos los gráficos generados (ya sean en Excel o a través del control ActiveX) se utilizan exclusivamente los datos que han sido resultado de los cálculos y que han sido almacenados en los archivos con extensión .RMS.

El usuario deberá tener en cuenta que los datos de los archivos .RMS son temporales y son sobreescritos en cada procesamiento (es decir, luego de presionar el botón “Calcular RMS”). Para ello deberá exportar los resultados a Excel y guardar estos datos.

El gráfico generado en Excel permite el despliegue de información numérica en coordenadas cartesianas, donde las abscisas contienen la información temporal (fecha/hora) y las ordenadas permiten desplegar los valores RMS correspondientes.

Los comandos de visualización propios del control gráfico de la pantalla principal son accesibles al usuario a través de la barra de herramientas que aparece en la parte superior del área de despliegue gráfico. Estos incluyen ejes horizontales y verticales para posicionarse en cualquier lugar del gráfico y ver fácilmente la fecha/hora y el RMS correspondiente, y funciones de acercamiento y alejamiento (zoom). La barra de herramientas está descrita en detalle en el Anexo 1.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

5.1. Introducción

En este capítulo se exponen los resultados del cálculo de raíces medias cuadráticas para distintos espectros neutrónicos, obtenidos utilizando el software propuesto.

Las señales de planta que se han considerado para el cálculo de los valores de raíces medias cuadráticas, son las siguientes:

- Cámaras de ionización del |rango de potencia:
YX04X01, YX04X02, YX04X03, YX04X04
- Cámara de ionización del rango lineal medio:
YX04X03
- Detectores autoenergizados de las lanzas 5 a 8:
NU21X165, NU21X115, NU21X125, NU21X135

5.2. Archivo de bandas

De acuerdo a lo especificado en el capítulo anterior, se requiere como entrada un archivo de bandas con nombre "BANDAS.INP", donde debe editarse el texto que contiene los datos de las bandas o zonas de frecuencias que serán utilizadas en el procesamiento.

Para tal efecto, es suficiente utilizar el editor Wordpad de Windows u otro editor de texto plano.

Consecuentemente, se ha procedido a la edición del archivo de bandas, tomando en cuenta los casos de las cámaras de ionización y los detectores de las lanzas 5 a 8, respectivamente.

El contenido del archivo de bandas editado para las cámaras de ionización es el siguiente:

```

<-> DETECTOR (DEBEN SER 3 CARACTERES EN MAYUSCULAS)
NBan<=10 Fi1 Fs1 Fi2 Fs2 Fi3 Fs3 Fi4 Fs4 Fi5 Fs5 Fi6
YX04X01
3      1.  5.  5.  15.  15.  40.
YX04X02
3      1.  5.  5.  15.  15.  40.
YX04X03
3      1.  5.  5.  15.  15.  40.
YX04X04
3      1.  5.  5.  15.  15.  40.

```

Los primeros tres renglones no cuentan en el procesamiento. Los datos relevantes se encuentran a partir del tercer renglón (el algoritmo está diseñado para este formato que es el requerido). A continuación de este renglón, y para cada cámara considerada en el análisis, se debe especificar: en un renglón el identificador de sensor, y en el siguiente renglón el número de bandas y los pares de frecuencias para cada banda respectiva.

En el presente caso el número de bandas es 3 y las frecuencias de vibración van de 1 a 40 Hz.

La primera banda, de 1 a 5 Hz, caracteriza al conjunto canal más elementos combustibles (teniendo en cuenta que la detección se producirá en el caso de los elementos que estén cercanos a la cámara).

La segunda banda, de 5 a 15 Hz, caracteriza al movimiento pendular y al modo shell de la vasija de presión. Estas dos bandas incluyen lo que se denominan las frecuencias naturales de vibración de los internos y que son detectables por las cámaras de ionización cercanas a los mismos.

Finalmente en la tercera banda, de 15 a 40 Hz, si bien no se observa picos causados por la vibración normal de los internos, podrían aparecer oscilaciones debido a vibraciones anómalas o debido a la vibración de las bombas de refrigeración principales cuya frecuencia de giro es de 24.9 Hz.

Las frecuencias naturales de vibración de los internos estén alrededor de los 2.7 Hz para los canales y elementos combustibles, 7 Hz

para el movimiento pendular y 13 a 14 Hz para el modo shell de la vasija de presión.

En la figura 4.1 está representado un espectro obtenido de la cámara YX04X02, donde pueden distinguirse las tres zonas de frecuencia incluidas en el archivo de bandas.

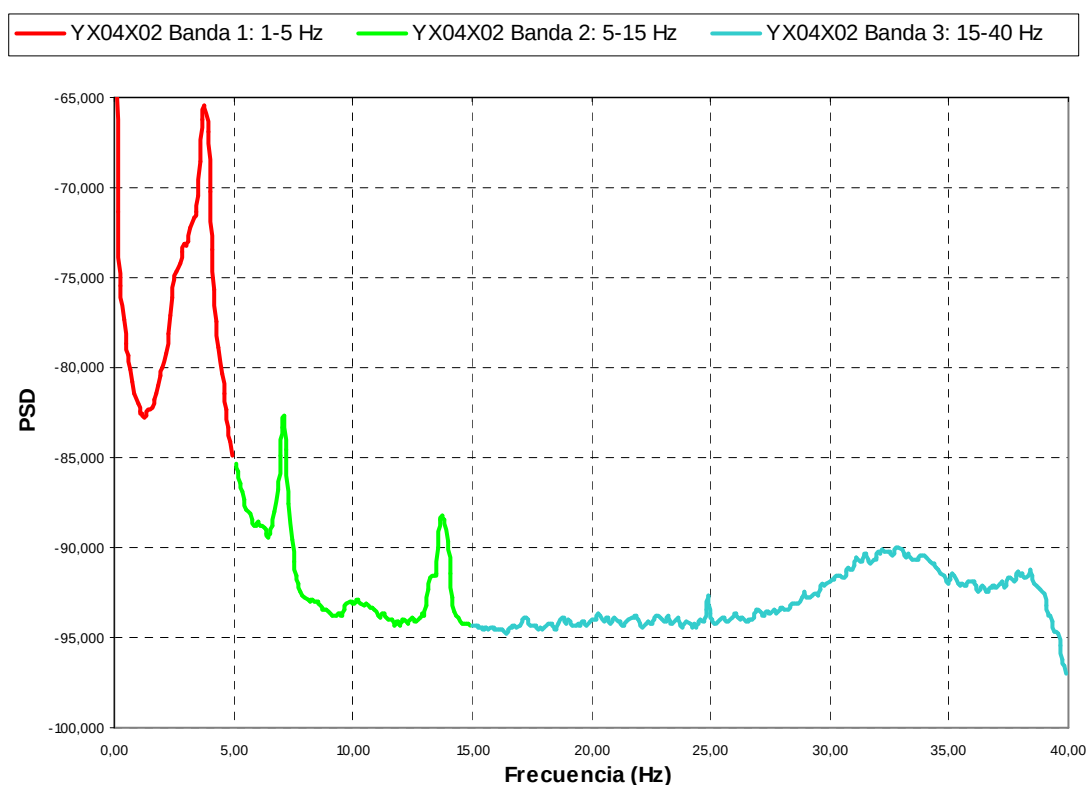


Fig 4.1. Espectro típico de la cámara de ionización YX04X02 mostrando las tres bandas.

De forma análoga, se procedió a la edición del archivo de bandas para los sensores autoenergizados.

En este caso, la zona que caracteriza a las frecuencias naturales de vibración de los internos va de 1 a 10 Hz.

En general, con los sensores autoenergizados se efectúa el análisis de ruido neutrónico dentro de dos zonas de frecuencias, que van de 1 a 5 Hz y 5 a 10 Hz, para la vibración el conjunto canal más elemento combustible, y la de la propia lanza respectivamente.

Esta nueva versión del archivo de bandas puede verse a continuación:

```
<-> DETECTOR (DEBEN SER 3 CARACTERES EN MAYUSCULAS)
NBan<=10 Fi1 Fs1 Fi2 Fs2 Fi3 Fs3 Fi4 Fs4 Fi5 Fs5 Fi6
NU21X115
2 1. 5. 5. 10.
NU21X125
2 1. 5. 5. 10.
NU21X135
2 1. 5. 5. 10.
NU21X165
2 1. 5. 5. 10.
```

5.3. Carpetas y archivos de corridas

Las corridas a ser procesadas están almacenadas como archivos dentro de carpetas y responden a una nomenclatura específica que ha sido descrita en el capítulo 3.

Se ha procedido a la verificación de las mismas, para constatar la validez del nombre de la carpeta con respecto a la fecha en que fueron tomados los datos, y también para asegurarse de que contienen datos válidos característicos de los espectros objeto de análisis.

Las carpetas de corridas consideradas como caso de estudio dentro del alcance de este trabajo son: G131126, G141327, G160936, G240937, G271010, G271317, G281359, S141203, O040949, O041332, O171019, N061005, N061420, N071147, N071256.

Todas las corridas contienen asimismo una carpeta con nombre "PSD" donde están los datos de los espectros medidos y otra con el nombre "DATA" que contiene la información general de la corrida en el archivo "APSDPRO.INP". Los datos contenidos corresponden al período Agosto-Noviembre 2007.

Las corridas han sido ubicadas asimismo dentro de un subdirectorío o carpeta con nombre indistinto, pero que se han

seleccionado posteriormente a través de la interfaz gráfica del software utilizando el botón del formulario programado para ese fin.

A continuación se incluye un fragmento de un archivo típico APSDPRO.

```

5  16  1024  120  100  75  10
  400  400  400  400  400  400  400  2000
 2000 2000 2000 2000 2000 2000 2000 2000
  1  1  1  1  1  1  1  1
  1  1  1  1  1  1  1  1
YX04X01
YX04X02
YX04X03
YX04X04
YX03X04
YX01X04
YX01X06
NU21X143
NU21X145
NU21X135
NU21X155
NU21X125
NU21X165
NU21X116
NU21X117
NU21X223
Y41
Y42
Y43
Y44
Y34
Y14
Y16
143
145
135
155
125
165
116
117
223
Grabado Automatico = Desactivado
Modelo PCL para AC = 818

```

En el primer renglón los datos que son útiles para el cálculo de los valores NRMS son los siguientes: $\Delta t = 5$, $N = 1024$, número máximo de canales utilizados = 16. Los datos contenidos en los renglones que van del segundo al quinto no se utilizan. Luego, a partir del sexto renglón se listan de forma consecutiva los sensores conectados a la tarjeta de adquisición de datos. Dicho ordenamiento va del primer al último canal con un sensor conectado.

Así, en este ejemplo, se utilizan 16 canales. La cámara YX04X01 está conectada al canal 0, que sería el primer canal; y el sensor autoenergizado NU21X223 está conectado al canal 15.

Finalmente, a partir del renglón 22 se listan los mismos sensores pero con otra notación alternativa que no se utiliza en esta fase de desarrollo del software.

5.4. Ejecución del programa

Utilizando los datos de entrada ya descritos para la ejecución del programa se han obtenido los resultados o valores NRMS para las cuatro cámaras de ionización ex-core de plena potencia, a partir de sus espectros neutrónicos normalizados. Los datos resultantes han sido almacenados en archivos, uno para cada sensor considerado.

Las instrucciones del programa que permiten procesar los datos de los espectros para cada sensor listado en el archivo de bandas, son las siguientes:

```
Sub Calcular_RMS()
  narchpsd = FreeFile
  Open dir_ARCH_PSD for Input As #narchpsd
  narchpsd1 = FreeFile
  NInarch = 0
  DF = 1000! / (DT * NT)
  NPF = NT / 2 + 1
  Do
    Get #narchpsd, Espectro.Sensor
    Get #narchpsd, Espectro.Fecha
    Get #narchpsd, Espectro.Hora
    Get #narchpsd, Espectro.DC
    For j = 1 To NPF
      Get #narchpsd, Espectro.PSD(j)
      Espectro.PSD(j) = 10 ^ (Espectro.PSD(j) / 10)
    Next j
    For k = 1 To NBANDAS1
      KINI = Int(FRECINI1(k) / DF) + 1
      KFIN = Int(FRECFIN1(k) / DF) + 1
      For l = KINI To KFIN
        Espectro.RMS(k) = Espectro.RMS(k) + Espectro.PSD(l)
      Next l
      Espectro.RMS(k) = Sqr(Espectro.RMS(k) * DF * 2 / BINTV)
    Next k
    Print #narchrms, Espectro.Fecha & "|" & Espectro.Hora & "|";
  Loop
```

```
Espectros(NInarch).Fecha = Espectro.Fecha
Espectros(NInarch).Hora = Espectro.Hora
For m = 1 To NBANDAS1
    Print #narchrms, Espectro.RMS(m) & "|";
    Espectros(NInarch).RMS(m) = Espectro.RMS(m) * 1
Next m
Print #narchrms,
NInarch = NInarch + 1
Get #narchpsd, Espectro.Sensor
Loop Until EOF(narchpsd)
Close #narchpsd
Close #narchrms
End Sub
```

De acuerdo a los requerimientos iniciales, este procesamiento se efectuó únicamente para cada uno de los sensores incluidos en el archivo de bandas, considerando el número de bandas y pares de frecuencias para cada sensor.

Consecuentemente, el programa efectuó la búsqueda de cada uno de estos sensores en cada corrida. Cada corrida incluía su propio archivo APSDPRO, que contiene la información de los sensores que fueron conectados al sistema de alerta temprana con la fecha y hora en que se adquirieron los datos.

Luego se procedió a la selección de este archivo de bandas y de las corridas de interés para el análisis (indicadas en el inciso 5.3) a través de las cajas de listas en el panel izquierdo de la interfaz gráfica, presionando luego el botón “Aplicar” para que el programa registre dichas selecciones.

Una vez hechas las selecciones, se presionó el botón con el comando “Calcular RMS”, con lo que se inició previamente la lectura del archivo de bandas y luego el ordenamiento cronológico de las corridas. El programa calculó el área de cada uno de los espectros leídos dentro de cada banda, y finalmente los valores NRMS correspondientes.

El objetivo de la utilización de este programa es facilitar al usuario el análisis de las vibraciones mecánicas. La obtención automática de los resultados y su despliegue gráfico permitió un análisis más rápido y eficiente en una línea de tiempo para la evolución de estas vibraciones.

5.4.1. Valores NRMS para las cámaras de ionización

En el caso de las cámaras, los datos resultantes del procesamiento han sido almacenados automáticamente en los archivos YX04X01.RMS, YX04X02.RMS, YX04X03.RMS, YX04X04.RMS e YX03X04. RMS. Estos datos han sido exportados posteriormente a Microsoft Excel utilizando el botón con el comando correspondiente.

El libro generado en Excel a partir de los resultados presenta la información de forma textual y gráfica a través de series de puntos en coordenadas cartesianas, desplegando las fechas en el eje X y los valores NRMS correspondientes en el eje Y.

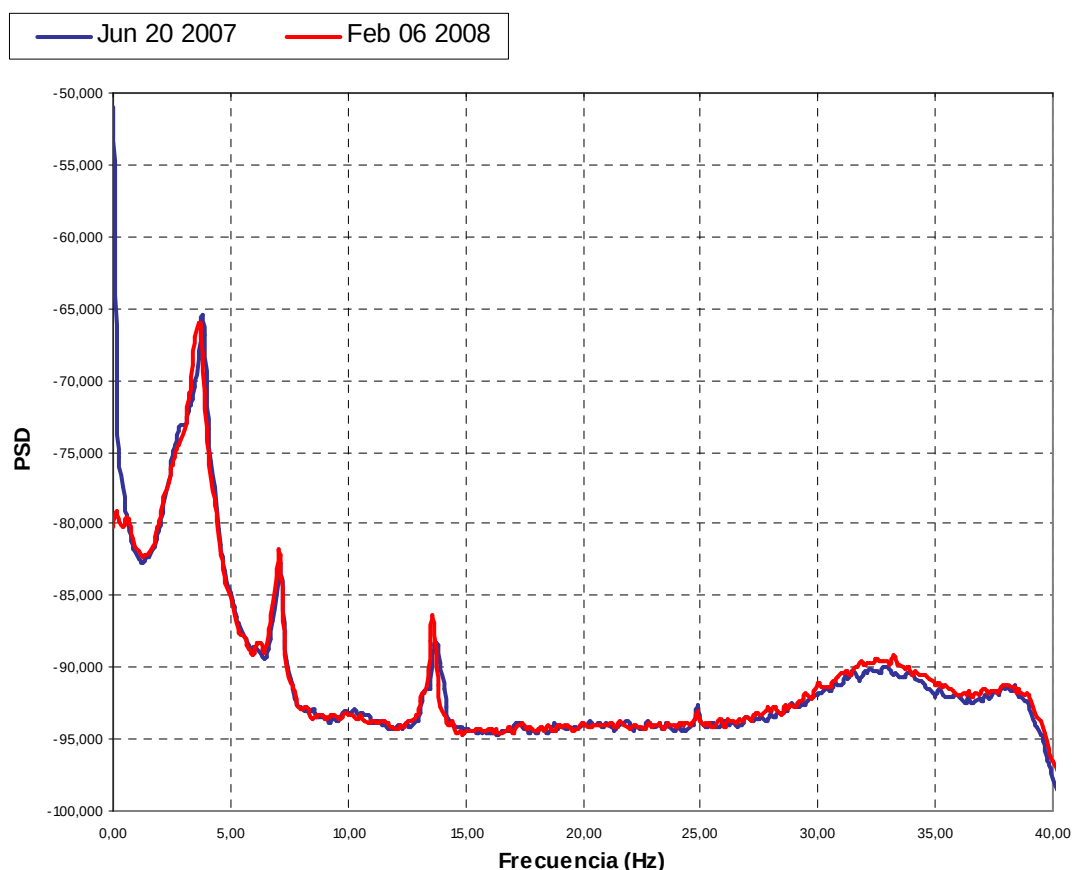


Fig 4.2. Espectros de la cámara YX04X02 obtenidos en Junio 2007 y Febrero 2008

En la figura 4.2 están representados dos espectros de fecha 20 de junio de 2007 y 6 de febrero de 2008, respectivamente. Ambos han sido obtenidos del sensor YX04X02, y se consideran frecuencias que van de 0 a 40 Hz. Se observa que los espectros neutrónicos de esta cámara y que están relacionados con la vibración de los internos cercanos a la misma, no presentan variaciones significativas.

Resulta de mucha importancia ver la evolución de las vibraciones a largo plazo, en el caso de cada detector neutrónico o de un grupo determinado de detectores, y considerando todas las bandas de frecuencias.

En la figura 4.3 están representados los valores NRMS obtenidos a partir de las corridas obtenidas de Agosto a Noviembre de 2007. Se ha observado que estos valores no presentan variaciones significativas en el caso de las cámaras YX04X01, YX04X02, YX04X03 e YX03X04, lo que indica que los espectros neutrónicos en este período son estables.

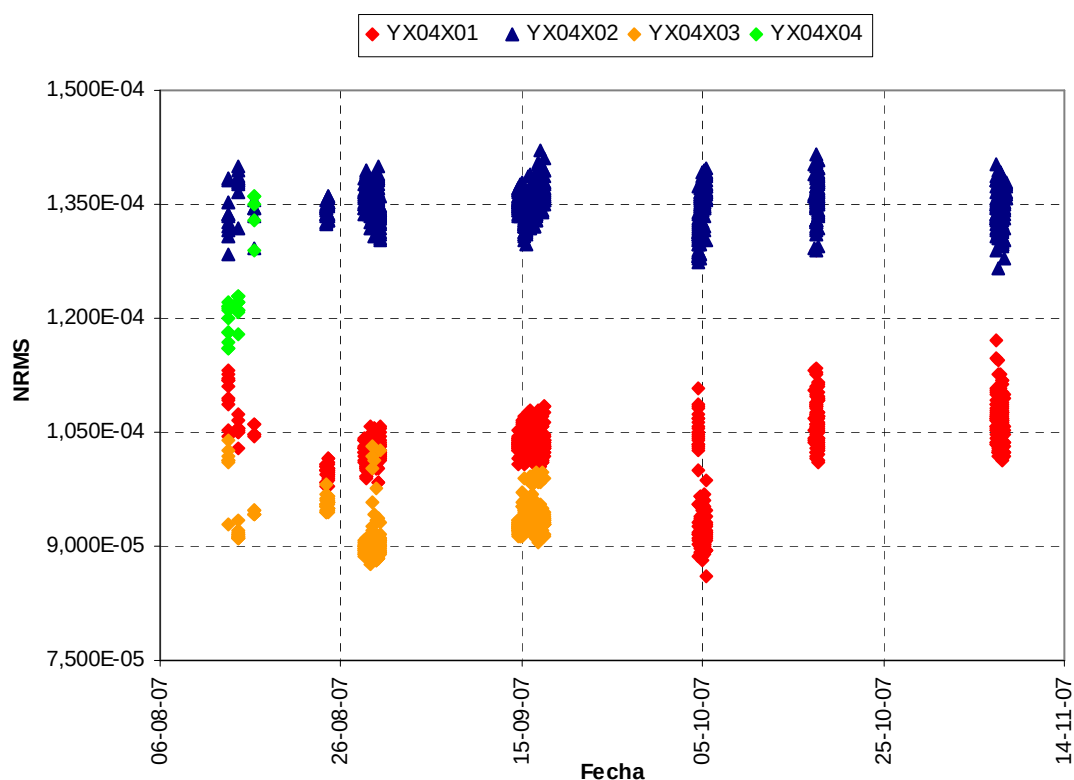


Fig 4.3. Valores NRMS para las cámaras de ionización en la banda de 1-5 Hz.

En el caso de la cámara YX04X04 se puede apreciar un aumento significativo en los valores NRMS que corresponden a este período, debido a desajustes en la cadena de medición.

Es necesario tomar en cuenta que los datos de la figura 4.3 no han sido promediados cada cierta cantidad de horas, por lo que puede apreciarse cierta dispersión en los mismos.

Como antecedente de la evolución temporal de los valores NRMS para la banda de 1-5 Hz, se presentan los valores NRMS promediados cada 4 horas, correspondientes al período Enero – Junio 2007 [6]. Los mismos están representados en la figura 4.4.

A partir de dichos promedios, se verifica que los espectros de estas cámaras se han mantenido estables durante el período considerado, presentando una estructura característica causada por las vibraciones mecánicas de los distintos componentes internos del reactor.

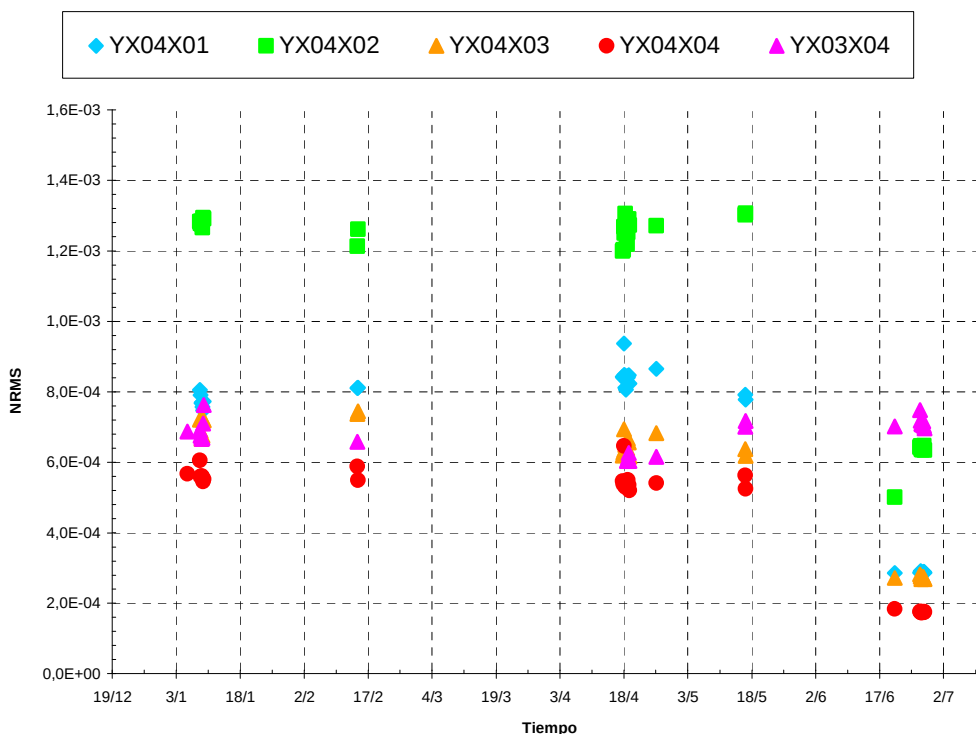


Fig 4.4. Valores NRMS promediados de cámaras en el período Enero – Junio 2007

5.4.2. Valores NRMS para los sensores autoenergizados

Como ya se ha mencionado, se han considerado para su análisis los detectores in-core de las lanzas 5 a 8: NU21X165 (lanza 5), NU21X115 (lanza 6), NU21X125 (lanza 7) y NU21X135 (lanza 8).

Estos detectores están ubicados en el plano medio del reactor y son los que presentan mayor fluctuación del flujo neutrónico debido a la vibración de los internos.

En la figura 4.5 aparecen representados los valores de dos espectros del sensor NU21X165, obtenidos en Junio de 2007 y Febrero de 2008 respectivamente.

Se observa que los espectros neutrónicos correspondientes a la vibración de los internos próximos a este sensor no presentan variaciones significativas.

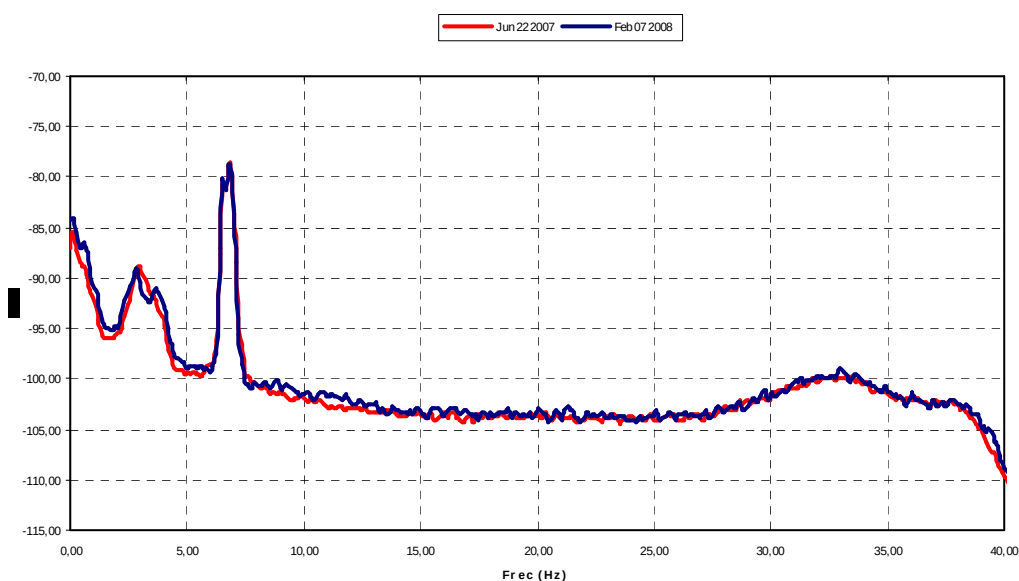


Fig 4.5. Espectros del sensor NU21X165 obtenidos en Junio 2007 y Febrero 2008

La figura 4.6 muestra los valores NRMS promediados de Enero a Julio 2007, para los detectores de las lanzas 5 a 8 del plano medio del reactor [6]. A partir de los mismos se concluye que el comportamiento en los espectros adquiridos hasta Junio 2007 se mantiene estable. Se toma como base el análisis efectuado en la banda de 1 a 10 Hz.

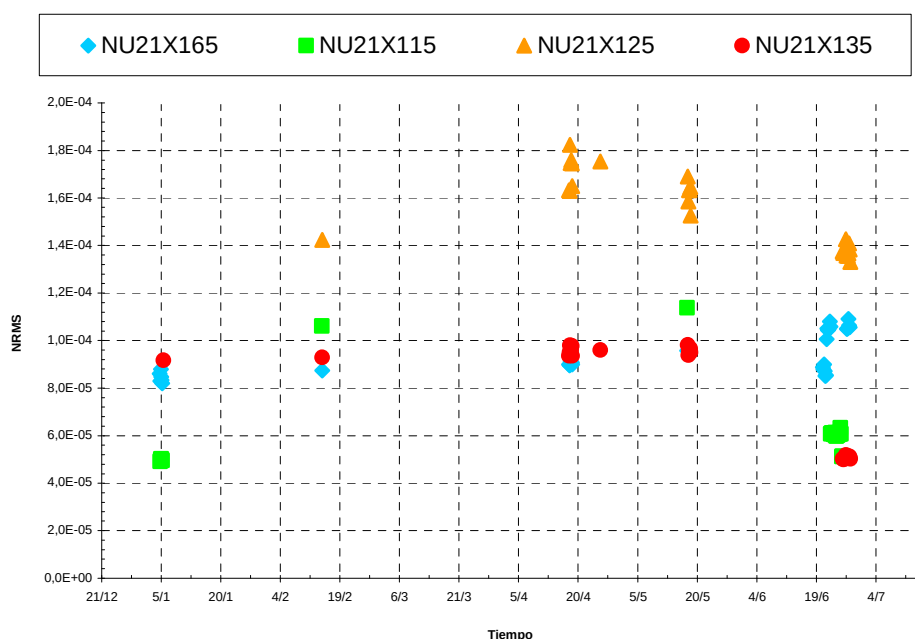


Fig. 4.6. Valores NRMS para detectores in-core en la banda de 1-10 Hz.

Las causas que originan las fluctuaciones en los datos no constituyen fallas en los internos del reactor, responden a las siguientes situaciones que se presentan en toda medición: [3]

- La aparición de señales transitorias, que producen perturbaciones en los espectros neutrónicos.
- Variaciones en el nivel de ruido de fondo de los espectros medidos (debidos posiblemente a cambios aleatorios en las condiciones operativas de los amplificadores de planta).

CONCLUSIONES

- El software permite calcular los valores de raíz media cuadrática de espectros de forma automática y versátil para una o varias bandas, y para uno o más sensores, en función al análisis de ruido que se necesita realizar. Así, en el caso del presente trabajo, se consideraron determinados sensores neutrónicos, dentro de la banda de 1 a 5 Hz.
- El despliegue gráfico de dichos valores permite visualizar de forma rápida la evolución temporal de los distintos espectros de cada detector dentro de una banda en particular.
- De las aplicaciones y análisis realizados se puede establecer que no se observa una variación significativa en el estado de vibración de los internos del reactor.

RECOMENDACIONES

- Con el fin de reducir las fluctuaciones estadísticas y para minimizar los efectos de señales transitorias en los espectros, incluir una ampliación futura en la funcionalidad del software que permita el cálculo automático del promedio de los valores de raíz media cuadrática obtenidos cada 4 o más horas.
- Incluir en el análisis de ruido el rango de frecuencia menor a 1 Hz para la vigilancia del comportamiento termohidráulico (ondas de presión, entre otros.)
- Ampliar la funcionalidad gráfica del software para desplegar en un mismo gráfico resultados de varios sensores y para varias bandas.
- Considerar la inclusión del paradigma de las redes neuronales o inteligencia artificial en una versión futura del software, de tal manera que éste pueda reconocer espectros característicos de vibraciones mecánicas, en base a un aprendizaje a partir de datos

disponibles. Las redes neuronales son especialmente útiles en aplicaciones de cierta complejidad como el reconocimiento de imágenes y señales, entre otras.

- Efectuar un seguimiento del correcto funcionamiento de todas las cadenas de medición (incorporando en el programa el cálculo de los valores NRMS para la zona de frecuencias entre 50 y 100 Hz, donde prevalece el ruido blanco correspondiente al proceso de detección neutrónica. La constancia de este valor de NRMS en el tiempo, garantiza el buen funcionamiento de la cadena de medición), y disminuir tanto como sea posible el ruido de fondo, revisando en particular los amplificadores de planta.
- Incluir una ampliación al código con el fin de facilitar el cálculo del parámetro $f^{(q)}$ (explicado en detalle en [7]), que permite verificar el funcionamiento correcto de las cámaras que forman parte de los canales lineales de marcha de los reactores de investigación RA-1 y RA-3, a partir de sus espectros neutrónicos normalizados. Extender esta ampliación para facilitar el cálculo del parámetro $f^{(q)}$ en el caso de reactores de potencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Libros:

- [1] Thie, J. "Power Reactor Noise", American Nuclear Society (1981)
- [2] Ceballos, J. "Enciclopedia de Microsoft Visual Basic 6". Edit. Alfaomega (2005)

Informes:

- [3] Flores, M. "Desarrollo de un Software de Adquisición de Datos para monitorear la vibración de los componentes internos de la Central Nuclear Atucha I mediante la Técnica de Análisis de Ruido Neutrónico". CEATEN - Instituto Balseiro (2006)
- [4] Wentzeis, L. "Monitoring the Reactor Internals Vibrations of Atucha I Nuclear Power Plant, by means of Neutron Noise Analysis". CNEA (1998)
- [5] Estryk, D. Documento Técnico CNEA.C.RCN.MUS.015 Rev. 0. "Manual de Usuario. Sistema de Alerta Temprana por Ruido Neutrónico". CNEA (1998).
- [6] Wentzeis, L. Informe de Tarea ITA-06REC-289. Rev. 0. "Monitoreo del Estado de Vibración de los Internos del Reactor de la Central Nuclear Atucha I. 1º Informe Semestral Año 2007". CNEA (20 07).
- [7] Gómez, A. Documento Técnico CNEA.C.RCN.ITE.187 Rev. 0. "Aplicación de la técnica de ruido neutrónico en la evaluación del correcto funcionamiento de las cadenas de detección de los canales de marcha de un reactor de investigación". CNEA (2005).

Papers y otras publicaciones:

- [8] Rajlich, V. "A Methodology for Incremental Changes". Wayne State University (2006).
- [9] Website: www.extremeprogramming.org (2008)

Anexo 1

Información para el Usuario

“Programa para Monitorear la Vibración de los Internos del Reactor Nuclear de CNA-I por Ruido Neutrónico”

Introducción

El objetivo de este software es calcular los valores de raíz media cuadrática (RMS) para cada uno de los espectros neutrónicos obtenidos mediante el sistema de alerta temprana que funciona actualmente en CNA-I para el monitoreo de vibraciones mecánicas en los internos del reactor, y que ha sido desarrollado por el Grupo de Física Experimental de Reactores.

Dichos espectros son obtenidos a partir de las señales provenientes de los detectores neutrónicos propios de la instrumentación estándar del reactor (cámaras de ionización y detectores autoenergizados).

La finalidad es facilitar el análisis de estos espectros presentando gráficamente sus valores RMS en coordenadas cartesianas versus la fecha de adquisición del espectro, para que el usuario pueda hacer un análisis rápido de la evolución de las vibraciones en el tiempo.

Requerimientos de Instalación

La computadora en la que se instalará el software debe ser compatible con IBM y cumplir además con los siguientes requisitos:

- Sistema operativo Microsoft Windows XP / 2000
- 256 MB de memoria RAM

- 10 MB de espacio en disco duro
- Monitor color con resolución mínima de 800x600
- Para la exportación de los resultados a Excel, se requiere la instalación correcta de la versión MS Excel 2000 o una superior.

Sistema Operativo

El software fue implementado y probado para funcionar sobre plataforma Windows en sus versiones XP y 2000.

Estructura de Directorios en el Disco Duro

El software en esta primera versión requiere su instalación en un subdirectorio C:\RUIDO donde se copiará el archivo ejecutable RMS1.EXE.

Los resultados se almacenan como archivos de texto para cada sensor en el subdirectorio C:\RUIDO\RMS. Las carpetas de corridas y el archivo de bandas se pueden copiar en el subdirectorio C:\RUIDO o bien en otro subdirectorio que el usuario prefiera.

Preparación de los Datos de Entrada

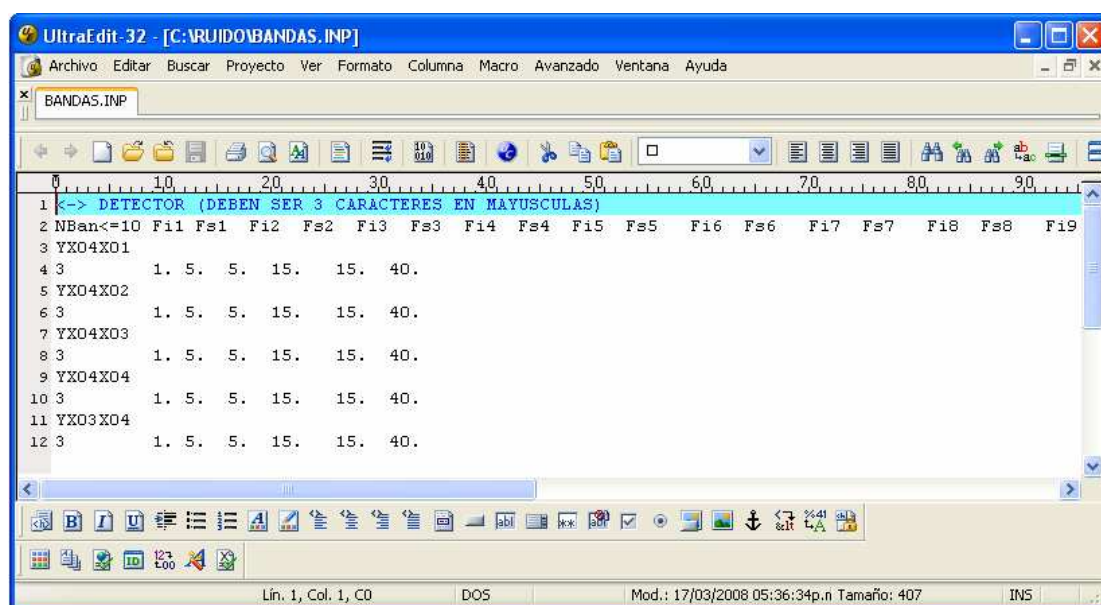
a) Archivo de Bandas

El archivo de bandas contiene la información de cada sensor a analizar, así como la cantidad de bandas, frecuencia inicial y frecuencia final que sean de interés en el análisis a efectuar.

Se puede trabajar con una o más bandas, y con uno o varios sensores. El software está diseñado para trabajar con un máximo de 5 bandas y 16 sensores.

Por convención, este archivo tiene el nombre BANDAS.INP pero puede utilizarse otro nombre y extensión de archivo, mientras sea un archivo de tipo texto y esté correctamente editado.

La edición del archivo de bandas puede llevarse a cabo utilizando en general los editores de texto plano disponibles en el mercado. Se recomienda la utilización de UltraEdit-32 o en su defecto Wordpad. El texto de un archivo de bandas es similar al siguiente:

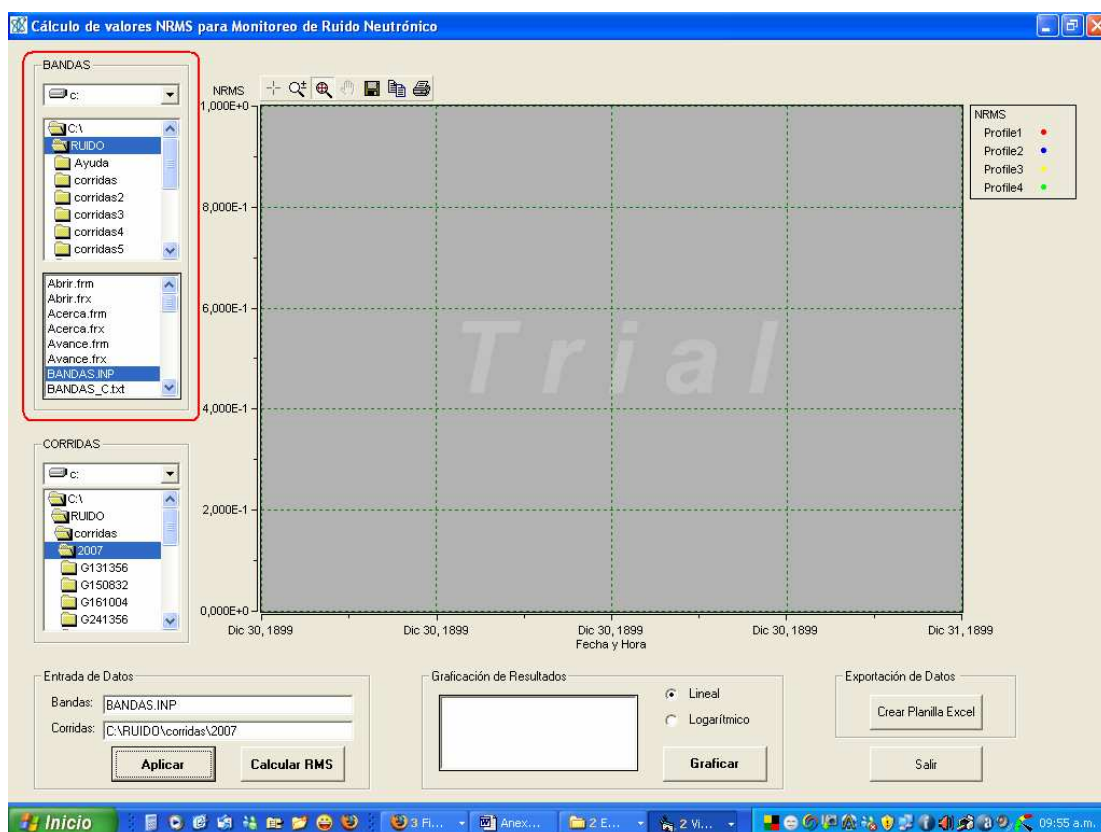


El texto de este ejemplo indica que se deben analizar cuatro sensores con los identificadores YX04X01, YX04X02, YX04X03 e YX04X04. La cantidad de bandas es 3 y se tienen por lo tanto tres pares de frecuencia inicial y frecuencia final para cada banda.

De acuerdo a los datos especificados en este archivo, se efectuará el análisis de dichos sensores en las bandas de 1 a 5 Hz, 5 a 15 Hz y 15 a 40 Hz respectivamente.

Por medio de la misma interfaz gráfica del software, el usuario puede seleccionar el archivo de bandas requerido para iniciar el cálculo. Esto puede verse en la figura siguiente.

Nótese el recuadro rojo de la siguiente figura, que muestra el área de la interfaz donde están programados los controles que permiten al usuario seleccionar dicho archivo de bandas.



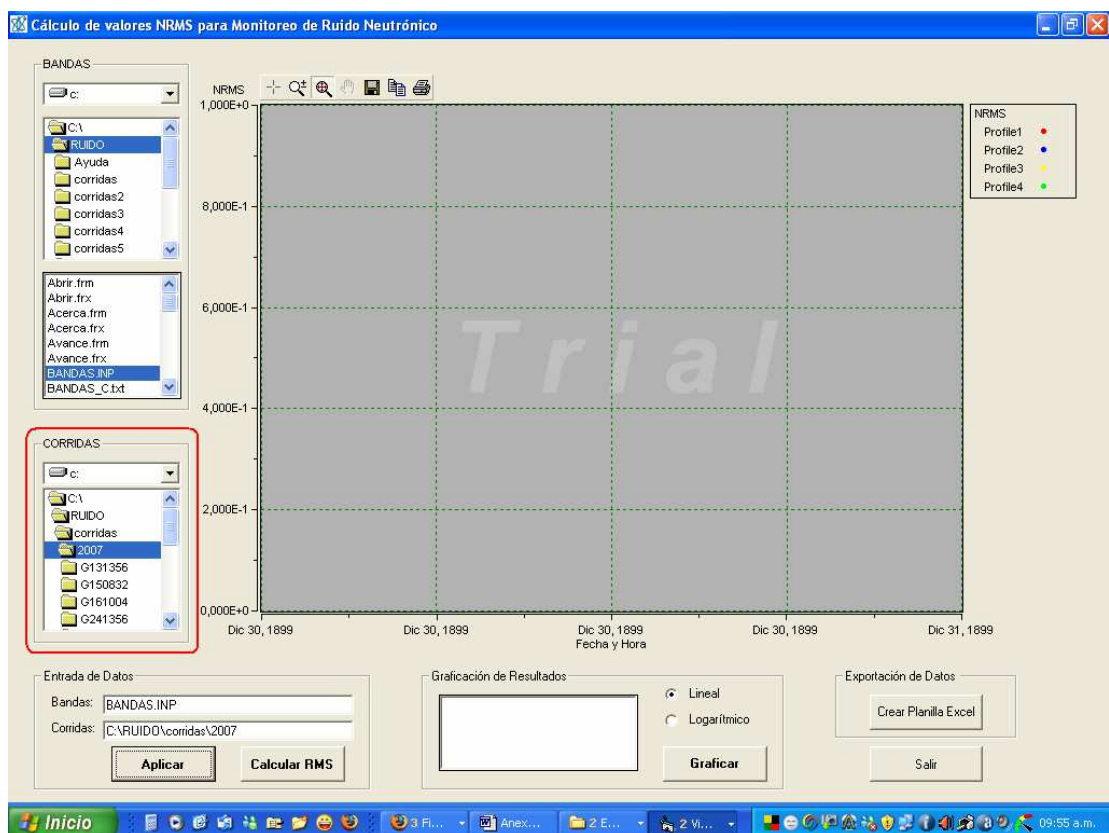
b) Corridas

El sistema de alerta temprana permite adquirir datos de espectros almacenándolos como corridas, donde el nombre de cada corrida responde al formato <mDDHHMM>, siendo m = mes, DD = día, HH = hora, MM = minutos. Por ejemplo la carpeta con nombre “J201335” contiene espectros neutrónicos medidos el día 20 de Junio, a las 13:35 horas.

El usuario deberá almacenar y organizar todas estas corridas en una carpeta, que deberá seleccionarla oportunamente a través de la misma interfaz gráfica del software como se muestra en la figura. El

recuadro destaca el área de la interfaz gráfica donde están programados los controles para seleccionar la carpeta que contiene todas las corridas.

Los datos que son útiles para el procesamiento son los que se encuentran en los subdirectorios DATA y PSD de cada corrida. Por ej., para la corrida J201335 almacenada en cualquier carpeta del disco duro C, los datos se encontrarán en C:\...\J201335\DATA y C:\...\J201335\PSD.



Procesamiento. Cálculo de Valores NRMS

Previamente al inicio del cálculo de los valores NRMS, el usuario deberá presionar el botón “Aplicar” (en la sección inferior izquierda de la interfaz) para registrar las selecciones efectuadas de bandas y corridas.

Para iniciar efectivamente el cálculo, el usuario podrá iniciar el cálculo de los valores NRMS de las corridas haciendo clic en el botón “Calcular RMS”. Conforme el software calcula los RMS de los espectros (tomando los sensores indicados en el archivo de bandas), va

almacenando los resultados en archivos cuya nomenclatura indica el identificador del sensor analizado. Los mismos son almacenados como archivos de tipo texto pero con la extensión .RMS. (Por ej: YX04X01.RMS).

Es necesario tener en cuenta que en este subdirectorio estos archivos se almacenan como información temporal cada vez que el usuario ordena la ejecución del cálculo de los valores RMS para un conjunto determinado de corridas.

Los archivos generados pueden verse en el recuadro de “Graficación de Resultados” (sección central inferior de la interfaz).

Los resultados obtenidos pueden ser graficados (utilizando el botón “Graficar”) en escala lineal que es como se almacenan por defecto en los archivos de resultados, o en escala logarítmica.

Barra de Herramientas

La barra de herramientas para la visualización detallada del gráfico está ubicada en la parte superior del mismo:



Las herramientas están descritas de izquierda a derecha de la figura anterior.

- Crosshairs: consta de un eje vertical, que puede ser movido a voluntad por el usuario, y que permite ver fácilmente el valor de la fecha/hora a lo largo de las abscisas.
- Zoom in/out: Permite un mayor/menor acercamiento a una porción seleccionada del gráfico.
- Zoom out all: Permite volver a las condiciones iniciales de acercamiento del gráfico (es decir, tal como se ve el gráfico antes de ejecutar comandos de zoom in/out).

- **Pan:** Permite moverse dentro de la porción seleccionada del gráfico (utilizando previamente el comando zoom in/out). Si no se ha efectuado zoom previamente, este comando no está disponible.
- **Save Image:** Permite guardar el gráfico en formato de archivo de mapa de puntos. Al presionar este botón, aparece el formulario Save Image que permite el almacenamiento efectivo de dicha información. El usuario deberá escribir el nombre del archivo y asegurarse de almacenarlo en el disco duro presionando el botón “Guardar”.
- **Export data:** Permite exportar los datos del gráfico (obtenidos previamente a partir del cálculo de los valores RMS) a un archivo de formato de texto plano. Análogamente al comando anterior, en el formulario que aparece el usuario debe escribir el nombre del archivo y guardarlo.
- **Print chart:** Permite desplegar la ventana de impresión de acuerdo a la configuración del sistema operativo propio de la máquina donde se ejecuta la aplicación.

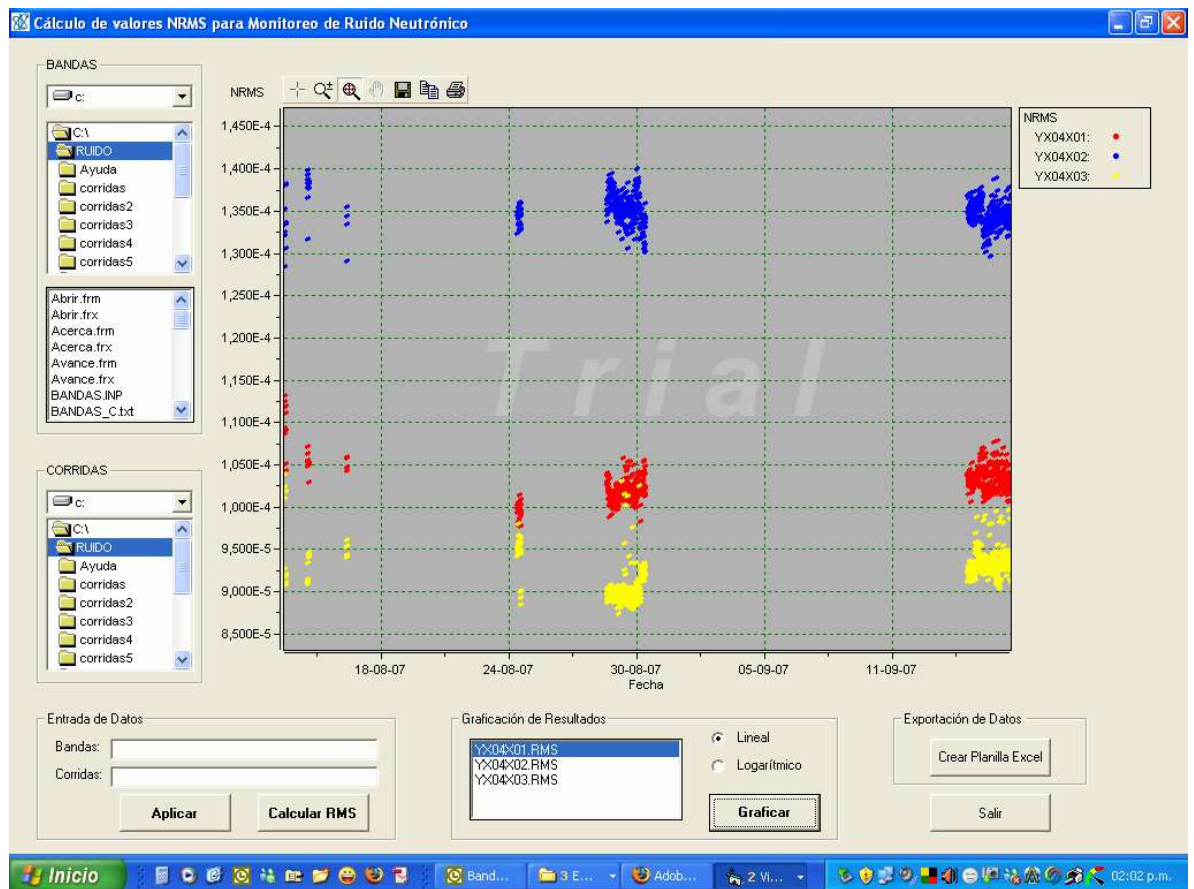
Exportación de Datos

El usuario tiene la posibilidad de exportar resultados como los mostrados a planillas Excel. Para ello deberá seleccionar el archivo de salida deseado en la ventana de Graficación de Resultados.

El archivo seleccionado deberá aparecerá sombreado en azul, y luego el usuario deberá hacer clic en el botón etiquetado “Crear Planilla Excel” para generar una nueva planilla Excel de forma automática.

La planilla Excel generada contiene en sus columnas la información de fecha, hora y RMS por banda de los espectros. Se puede generar una planilla Excel por cada sensor.

Los resultados RMS son distinguibles para cada detector por medio de distintos colores. Las etiquetas correspondientes se pueden visualizar a la derecha de la pantalla.



La siguiente figura muestra el contenido de un archivo exportable con valores RMS calculados para el detector YX04X02:

UltraEdit-32 - [C:\Documents and Settings\Dolly Calvo\Escritorio\YX04X02.RMS]		
YX04X02.RMS		
1	13/08/07 11:26	4,728058E-04
2	13/08/07 11:32	5,215073E-04
3	13/08/07 11:39	5,304701E-04
4	13/08/07 11:48	5,029996E-04
5	13/08/07 11:57	5,395223E-04
6	13/08/07 12:06	5,296861E-04
7	13/08/07 12:15	5,257555E-04
8	13/08/07 12:24	5,149645E-04
9	13/08/07 12:33	5,133745E-04
10	13/08/07 12:42	5,575478E-04
11	13/08/07 12:51	5,414938E-04
12	13/08/07 13:00	4,993424E-04
13	14/08/07 13:27	4,851136E-04
14	14/08/07 13:33	5,252124E-04
15	14/08/07 13:40	5,813502E-04
16	14/08/07 13:47	5,452966E-04
17	14/08/07 13:54	5,534363E-04
18	14/08/07 14:01	5,608157E-04
19	14/08/07 14:08	5,353919E-04
20	14/08/07 14:15	5,437332E-04
21	14/08/07 14:24	5,120092E-04
22	14/08/07 14:30	5,801151E-04
23	14/08/07 14:37	5,401527E-04
24	16/08/07 09:36	4,980724E-04
25	16/08/07 09:40	5,219026E-04
26	16/08/07 09:45	5,137826E-04
27	16/08/07 09:50	4,80968E-04
28	16/08/07 09:55	5,088442E-04
29	24/08/07 09:37	5,363451E-04

Anexo 2

Documentación Preliminar del Programa

Casos de Usuario

Historia de Usuario	
Número: 1	Nombre de Historia de Usuario: LEER BANDAS
Modificación (extensión) de la Historia de Usuario <Nro. y Nombre>: No	
Usuario: CNEA- NASA	Iteración: 1
Descripción: Leer los sensores del archivo de bandas, y los datos de las bandas.	

Historia de Usuario	
Número: 2	Nombre de Historia de Usuario: LEER CORRIDAS
Modificación (extensión) de la Historia de Usuario <Nro. y Nombre>: No	
Usuario: CNEA- NASA	Iteración: 1
Descripción: Seleccionar la carpeta que contiene las corridas, y ordenarlas cronológicamente por mes, día, horas y minutos, con el fin de obtener los resultados mostrando su evolución temporal.	

Historia de Usuario	
Número: 3	Nombre Historia de Usuario: CALCULAR VALORES RMS
Modificación (extensión) de la Historia de Usuario <Nro. y Nombre>: No	
Usuario: CNEA- NASA	Iteración Asignada: 1
Descripción: Calcular las áreas PSD de los espectros de los sensores a analizar y los valores RMS por cada banda. Desplegar los resultados gráficamente.	

Historia de Usuario	
Número: 4	Nombre Historia de Usuario: EXPORTAR VALORES RMS
Modificación (o extensión) de Historia de Usuario (Nro. y Nombre):	
Usuario: CNEA- NASA	Iteración Asignada: 2
Descripción: Exportar los resultados RMS a una planilla de Microsoft Excel.	

Tareas de Ingeniería

Tarea de Ingeniería	
Número de Tarea: 1	Historia de Usuario: 1
Nombre de Tarea: LEER ARCHIVO DE BANDAS	
Tipo de Tarea : Desarrollo	
Fecha Inicio: 3/Dic/2007	Fecha Fin: 27/Dic/2007
Descripción: El programa deberá abrir archivo BANDAS.INP y proceder a su lectura. Dicho archivo debe ser de tipo texto y tendrá el siguiente formato: - Renglón 3. Identificador del primer sensor. - Renglón 4. Número de bandas, frecuencia final y frecuencia inicial para el primer sensor. Los renglones 1 y 2 no son relevantes para el procesamiento. Se efectuará la lectura consecutiva para cada sensor hasta llegar al fin de archivo. El programa deberá comprobar que la frecuencia inicial de cada banda es inferior a la final. Se calcularán automáticamente los valores NRMS solamente para los sensores que estén listados en el archivo de bandas. El programa reconocerá la notación larga de 7 a 8 caracteres para la identificación de instrumentos. Por ejemplo: UN21X156, YX04X01.	

Tarea de Ingeniería	
Número de Tarea: 2	Historia de Usuario: 2
Nombre de Tarea: VALIDAR CORRIDAS	
Tipo de Tarea : Desarrollo	
Fecha Inicio: 3/Dic/2007	Fecha Fin: 27/Dic/2007
Descripción: Las corridas están organizadas en carpetas cuyo nombre responde al formato <mDDHHMM>, donde m = mes, DD = día, HH = hora, MM = minutos. Por ejemplo la carpeta denominada "J201335" contiene espectros de valores medidos en Junio 20, a las 13:35 horas. El software debe efectuar las validaciones para cargar en un vector las carpetas cuyo nombre cumplan con el formato requerido.	

Tarea de Ingeniería	
Número de Tarea: 3	Historia de Usuario: 2
Nombre de Tarea: ORDENAR CORRIDAS	
Tipo de Tarea : Desarrollo	
Fecha Inicio: 3/Dic/2007	Fecha Fin: 27/Dic/2007
Descripción: El software deberá permitir al usuario ubicar fácilmente el subdirectorío donde se encuentren las carpetas de corridas que contienen los datos de los distintos espectros. El software deberá ordenar automáticamente todas las corridas del subdirectorío de forma cronológica, para facilitar un posterior análisis en una línea de tiempo de la evolución de las vibraciones producidas en el reactor durante su funcionamiento.	

Tarea de Ingeniería	
Número de Tarea: 4	Historia de Usuario: 2
Nombre de Tarea: ADQUIRIR DATOS DE CORRIDAS	
Tipo de Tarea : Desarrollo	
Fecha Inicio: 3/Dic/2007	Fecha Fin: 27/Dic/2007
Descripción: Para cada corrida, el software deberá efectuar: - La lectura de parámetros del archivo de texto APSDPRO.INP en el subdirectorío DATA de la corrida (Número máximo de canales, Δt, N). - La lectura de los espectros desde los archivos CAN*.ALL, donde * es el número de canal, y que se encuentran en el subdirectorío PSD de la corrida.	

Tarea de Ingeniería	
Número de Tarea: 5	Historia de Usuario: 3
Nombre de Tarea: CALCULAR VALORES RMS	
Tipo de Tarea : Desarrollo	
Fecha Inicio: 3/Dic/2007	Fecha Fin: 27/Dic/2007
Descripción: Para cada sensor listado en el archivo de bandas, y que se encuentre en la corrida: - Calcular las áreas de los espectros adquiridos y calcular el valor RMS. - En caso contrario, determinar si el sensor en cuestión se encuentra en la siguiente	

corrida.

- Calcular los valores RMS manteniendo la información de la fecha y hora de los espectros adquiridos.
- Utilizar para el cálculo la fórmula de la media cuadrática RMS (valor de raíz media cuadrática). Implementar el software de acuerdo a la teoría de análisis de señales explicada en el Capítulo 3.

Efectuar este cálculo para todas las corridas seleccionadas previamente.

Tarea de Ingeniería	
Número de Tarea: 6	Historia de Usuario: 3
Nombre de Tarea: ALMACENAR RESULTADOS	
Tipo de Tarea : Desarrollo	
Fecha Inicio: 3/Dic/2007	Fecha Fin: 27/Dic/2007
Descripción: Los valores RMS calculados deberán almacenarse en archivos. Se tendrá un archivo por cada sensor listado en el archivo de bandas, con formato tipo texto y con extensión .RMS. La nomenclatura para la creación de estos archivos es la siguiente: <identificador de sensor>.RMS. Ejemplo: NU21X221.RMS. Los datos grabados incluirán fecha, hora y valor RMS por cada banda.	

Tarea de Ingeniería	
Número de Tarea: 7	Historia de Usuario: 3
Nombre de Tarea: GRAFICAR RESULTADOS	
Tipo de Tarea : Desarrollo	
Fecha Inicio: 2/Ene/2008	Fecha Fin: 25/Ene/2008
Descripción: Se graficarán los resultados de los archivos con extensión .RMS en coordenadas cartesianas, donde las abscisas mostrarán la fecha/hora y las ordenadas el valor RMS correspondiente. Para cada banda se tendrá un trazado independiente y fácil de identificar a través de distintos colores. Opcionales: escala lineal/logarítmica, zoom, impresión. El usuario podrá exportar automáticamente los datos a planillas de Microsoft Excel.	