



**“CORRELACIÓN DE VARIABLES DE PROCESO EN SISTEMAS DE LA CNA I  
– APLICACIÓN PARA DIAGNOSTICO DE FALLAS Y/O ANÁLISIS DE  
PROCESO Y/O VALIDACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN”**

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

**Alumna: Ing. Panzino Marina**

**Director del Trabajo Final: Lic. Urrutia Guillermo**

**Marzo de 2012**



**UNSAM**  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE  
SAN MARTÍN

## ÍNDICE

1. OBJETIVO .....	4
2. METODOLOGÍA .....	4
2.1. Descripción de la regulación de potencia y regulaciones relacionadas .....	4
2.2. Variables relacionadas con la regulación de potencia .....	5
2.3. “Visual Data” - Obtención de los datos.....	6
2.4. Correlación cruzada .....	7
2.5. Función de autocorrelación .....	7
2.6. Aplicaciones.....	8
3. DESARROLLO.....	10
3.1 Gráficos temporales de señales de Visual Data .....	10
3.2 Funciones de correlación cruzada entre señales (día 06/01/12).....	10
3.2.1 YX04X01P3-QH01T001P3 (Flujo neutrónico - diferencia de temperaturas sistema primario).....	11
3.2.2 YX04X001P3 – RA01F001 (Flujo neutrónico – caudal de vapor).....	12
3.2.3 YX04X001P3 – RL11F002 (Flujo neutrónico – Caudal de alimentación del Generador de Vapor) .....	13
3.2.4 YX04X001P3 – SA12P024 (Flujo neutrónico – Presión en la primera etapa de baja presión de la turbina) .....	14
3.2.5 YX04X001P3 – SA12T025 (Flujo neutrónico – Temperatura en la primera etapa de baja presión de la turbina).....	14
3.2.6 SA12P024-SA12T025 (Presión en la primera etapa de baja presión de la turbina - Temperatura en la primera etapa de baja presión de la turbina) .....	16
3.2.7 QH01T001P3 – RA01F001 (Diferencia de temperaturas sistema primario – caudal del vapor) .....	17
3.2.8 QH01T001P3 – RL11F002 (Diferencia de temperaturas sistema primario – Caudal de alimentación al generador de vapor) .....	17
3.2.9 QH01T001P3 – SA12P024 (Diferencia de temperaturas sistema primario – presión en la primera etapa de baja presión de la turbina) .....	18
3.2.10 QH01T001P3 – SA12T025 (Diferencia de temperaturas sistema primario - temperatura en la primera etapa de baja presión de la turbina) .....	20
3.2.11 RL11F002 – SA12P024 (Caudal de agua de alimentación al generador de vapor – presión en la primera etapa de baja presión de la turbina) .....	21
3.2.12 RL11F002 – SA12T025 (Caudal de agua de alimentación al generador de vapor – temperatura en la primera etapa de baja presión de la turbina).....	23
3.2.13 YX04X01P3-QM00T021 (Flujo neutrónico – temperatura de salida sistema moderador).....	23
3.2.14 QH01T001P3 – QM00T021 (Diferencia de temperaturas sistema primario – temperatura de salida del sistema moderador).....	25
3.2.15 QH01T001P3 - QM01T022 (Diferencia de temperaturas sistema primario – temperatura de entrada del sistema moderador) .....	26
3.2.16 QM00T021 – QM01T022 (Temperatura de salida del sistema moderador – temperatura de entrada al sistema moderador) .....	27

3.2.17	RL11F002 – QM01T022 (Caudal de agua de alimentación al generador de vapor – Temperatura de entrada del sistema moderador) .....	28
3.2.18	RL11F002 – RESTAQM1 (Caudal de agua de alimentación al generador de vapor – diferencia de temperatura del sistema moderador) .....	29
3.3	Funciones de correlación cruzada entre señales (día 02/11/11).....	29
3.2.19	YX04X01P3 – QH01T001P3 (Flujo neutrónico - diferencia de temperaturas sistema primario).....	30
3.2.20	YX04X001P3 – SA12P024 (Flujo neutrónico – presión en la primera etapa de baja presión de la turbina) .....	31
3.2.21	RL11F002 – RESTAQM1 (Caudal de agua de alimentación al generador de vapor – diferencia de temperaturas en el sistema moderador) .....	32
3.4	Funciones de autocorrelación.....	33
3.5	Error.....	35
3.6	Modelos .....	40
3.6.1	Modelo A .....	40
3.6.2	Modelo B.....	44
4.	CONCLUSIONES.....	49
5.	REFERENCIAS .....	50
	ANEXOS.....	51

## **1. OBJETIVO**

La CNA I posee un sistema de adquisición de datos que contribuye, mediante el análisis de las variables de proceso, al diagnóstico y toma de decisiones.

El objetivo del presente trabajo es analizar correlaciones temporales de variables mediante cálculo de funciones de correlación.

Se espera de esta manera obtener correlaciones empíricas entre variables de proceso y compararlas con las esperables para algunos sistemas.

Se espera obtener además herramientas que mediante el uso de algoritmos, tengan en algunos casos la capacidad de diagnosticar en forma temprana potenciales fallas de los equipos y/o de la instrumentación.

A futuro se plantea la instalación en línea de alguno de estos algoritmos.

## **2. METODOLOGÍA**

Debido a que se han usado para estos estudios algunas pocas variables vinculadas a la potencia del reactor o influidas por la misma, se presenta previo a la descripción de la metodología, una somera explicación tanto de la regulación de potencia como regulaciones influenciadas por ésta.

### **2.1. Descripción de la regulación de potencia y regulaciones relacionadas**

En el Anexo 1 se presenta un esquema de la regulación de potencia "Por turbina", que es el modo de operación normal en la CNA I. En el Anexo 2 se presenta un diagrama del ciclo de potencia con los principales sistemas involucrados, para su mayor comprensión. Se describe a continuación el modo de funcionamiento en el modo seguimiento por turbina:

El BlockSollwert (Block generador de consignas) genera una consigna para el generador y para la turbina. En este modo el error entre la consigna en la potencia generada por el generador eléctrico y el valor real, tendrá poca influencia y el mismo será estará dado por el turbinado del vapor que produce el generador de vapor al recibir la potencia del reactor.

El reactor sí seguirá a la consigna generada por el BlockSollwert. Como señal a comparar con la consigna usará el flujo neutrónico corregido que debe ser entendido como la potencia calculada a partir de los saltos térmicos en el primario y moderador al cual el flujo neutrónico no corregido influye sólo bajo circunstancias de variación rápida.

En el regulador de flujo neutrónico corregido éste se compara con la consigna y ordena subir o bajar barras de control cuando las diferencias entre medición y consigna superan una banda muerta del 1%.

La turbina seguirá esta potencia turbinando todo el vapor producido, el regulador de presión tratara de mantener el valor de presión en un valor de consigna. La consigna

tiene un ajuste fino adicional a fin de mantener el valor medio de la presión en 41,5 Kg/cm<sup>2</sup>.

Como consecuencia de este tipo de regulación el caudal de vapor producido oscila entre los mismos rangos relativos de la potencia y el nivel del generador de vapor debe ser regulado por la válvula de alimentación de agua la que es accionada por un regulador proporcional respecto al error de nivel y la diferencia entre los caudales de agua y vapor.

## 2.2. Variables relacionadas con la regulación de potencia

En la siguiente tabla se mencionan las señales que fueron tenidas en cuenta para el análisis de correlación y que están relacionadas ya sea de forma directa o indirecta con la regulación de la potencia:

Nº	Señal	Descripción	Tipo de instrumento
1	QH01T001P3	Diferencia entre temperatura de salida y entrada del circuito primario, ramal 1	2 termocuplas en oposición
2	QH02T001P3	Diferencia entre temperatura de salida y entrada del circuito primario, ramal 2	2 termocuplas en oposición
3	QM00T021	Temperatura de salida del tanque del moderador, colector común	PT100 de 3 hilos en conexión directa a computadora
4	QM01T022	Temperatura de entrada al tanque del moderador, ramal 1	PT100 de 3 hilos en conexión directa a computadora
5	QM02T022	Temperatura de entrada al tanque del moderador, ramal 2	PT100 de 3 hilos en conexión directa a computadora
6	RA01F001	Caudal de salida del Generador de Vapor, ramal 1	Placa orificio con celda diferencial de presión
7	RA02F001	Caudal de salida del Generador de Vapor, ramal 2	Placa orificio con celda diferencial de presión
8	RESTAQM1	Diferencia entre temperatura de salida y entrada al tanque del moderador, ramal 1	Nota: señal creada a fines del presente trabajo. QM00T021 – QM01T022
9	RESTAQM2	Diferencia entre temperatura de salida y entrada al tanque del moderador, ramal 2	Nota: señal creada a fines del presente trabajo. QM00T021 – QM02T022
10	RL11F002	Caudal de entrada al Generador de Vapor, ramal 1	Placa orificio con celda diferencial de presión

Nº	Señal	Descripción	Tipo de instrumento
11	RL12F002	Caudal de entrada al Generador de Vapor, ramal 2	Placa orificio con celda diferencial de presión
12	SA12P024	Presión en la extracción A3 de la primera etapa de baja presión de la turbina	Transductor de presión
13	SA12T025	Temperatura en la extracción A3 de la primera etapa de baja presión de la turbina	PT100 de 3 hilos
14	YX04X01P3	Flujo neutrónico no corregido. Canal 1	Detector de BF <sub>3</sub>
15	YX04X03P3	Flujo neutrónico no corregido. Canal 3	Detector de BF <sub>3</sub>

### 2.3. “Visual Data” - Obtención de los datos

Las señales detalladas en el punto 2.3 se obtienen de la computadora de procesos de CNAI, que es una computadora solo para información y análisis.

A continuación se listan algunas características de la adquisición de datos por computadora:

- Período mínimo de muestreo: 4 seg
- Nº de bits en la conversión A/D :12
- Rango de las señales analógicas que arriban a la computadora: es transformado en pulsos de entre 0 y 3264.
- Canales por conversor: 32 canales por placa y cada placa tiene 2 conversores.

Los pulsos son transformados en diferentes valores para la variable física correspondiente y guardados en un formato definido junto con el tiempo de adquisición en discos rígidos.

#### Acceso a los datos

El acceso a los datos se hace desde programas residentes en computadoras asociados a la computadora de proceso.

La visualización de los datos se hace a través de un programa residente denominado Visual Data, el cual representa las variables en función del tiempo. Algunos datos son extraídos, procesados y vuelven a guardar con otro nombre en la misma base y pueden ser visualizados en la misma escala temporal.

Además se agregan datos obtenidos por lectura en campo de los operadores.

Para el presente trabajo la Div. Sistemas Informáticos elaboró un software q permite extraer los datos para análisis con programas no residentes.

## 2.4. Correlación cruzada

La correlación cruzada indica causalidad entre dos señales como función de un tiempo  $t$ . Esto se expresa mediante la siguiente ecuación para dos funciones continuas:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau)dt \quad (\text{ec. 1})$$

donde

$x(t)$  = función 1

$y(t)$  = función 2

$\tau$  = retardo entre  $x(t)$  e  $y(t)$

$T$  = intervalo de integración

Para variables discretas o continuas con muestras discretas se utiliza la siguiente fórmula:

$$R_{xy}(j) = E\left[\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n x_i y_{i+j}\right] \quad (\text{ec.2})$$

donde

$E$  es el valor esperado

$j$  representa a  $\tau$

$i$  al tiempo

$n$  es el número de puntos por intervalo de análisis

Las funciones de correlación cruzada satisfacen las siguientes propiedades:

- a.  $R_{xy}(-\tau) = R_{yx}(\tau)$
- b.  $|R_{xy}|^2 \leq R_{xx}(0)R_{yy}(0)$

## 2.5. Función de autocorrelación

La función de autocorrelación es un caso particular de la correlación cruzada. En este caso, se utiliza la ecuación 1 para una sola función. Es decir:

Para funciones continuas:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau)dt \quad \text{ec. 3}$$

Para funciones discretas:

$$R_{xy}(j) = E\left[\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n x_i x_{i+j}\right] \quad \text{ec. 4}$$

donde

E es el valor esperado

Además de cumplirse las propiedades del punto 2.4.1, la función de autocorrelación es par.

Esto se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$R_{xx}(-\tau) = R_{xx}(\tau) \quad \text{ec. 5}$$

## 2.6. Aplicaciones

Al margen de la aplicación de las funciones de correlación cruzada en procesamiento de señales en general, a continuación se listan algunas de las aplicaciones relacionadas con señales de procesos de la CNAI:

- Relación de causalidad entre dos variables

En caso de que dos señales se encuentren relacionadas y esto no se observe directamente en los gráficos de señal vs. tiempo, se puede hallar por ejemplo el tiempo de desfase entre ambas.

- Relación de excitación por un modo común de dos variables

Esto permite hallar la relación entre dos señales que en primera instancia de análisis no se encontrarían relacionadas. Mediante análisis de correlación cruzada se puede observar una relación entre ellas. Esto se debe a que las mismas poseen una misma fuente de origen.

- Eliminación de ruido

La función de correlación permite dejar de lado el ruido aleatorio para poder ver por ejemplo el tiempo de desfase que hay entre dos señales, o en el caso de la autocorrelación, la periodicidad de una señal.

Cabe aclarar que promediar las señales es otra forma de eliminar el ruido, sin embargo en este caso se pierde la dinámica del proceso.

- Covarianza normalizada

La función de correlación cruzada para  $\tau = 0$  es equivalente a la covarianza normalizada de dos señales. La aplicación de la ecuación 3 (con  $\tau=0$ ) permite obtener un coeficiente de correlación mediante el cual se puede hacer un análisis sencillo e inmediato de la relación que hay entre dos señales.

- Funciones de autocorrelación

Las funciones de autocorrelación se pueden usar por ejemplo para encontrar patrones de periodicidad en una señal.

### **3. DESARROLLO**

Tal como fue descrito en el punto 2.2 en el presente trabajo se analizaron 15 señales de proceso de la CNA I en un período de 3 hs. Se tomaron al azar dos días diferentes con el fin de verificar que los resultados fueran equivalentes.

Primero se presentan las señales en escala temporal, luego el análisis mediante funciones de correlación con una explicación para cada gráfico y por último las funciones de autocorrelación para todas las señales.

#### **3.1 Gráficos temporales de señales de Visual Data**

En el Anexo 3 se presentan los gráficos de las señales de proceso correspondientes a los días 06/01/12 y 02/11/11.

#### **3.2 Funciones de correlación cruzada entre señales (día 06/01/12)**

En función de lo explicado en el punto 2.1, se considera necesario realizar la correlación entre algunos pares de señales y no todas las combinaciones posibles, ya que varios pares carecen de sentido.

También se omitió combinar las mismas señales para ambos ramales de proceso, ya que no aporta al análisis, por dar resultados equivalentes entre sí.

Para obtener la función de correlación cruzada entre señales se utilizó la ecuación 2 donde a cada variable se le restó el valor medio en el intervalo de interés y se la normalizo con su desvío estándar.

Los cálculos se realizaron mediante el programa "Matlab". En el Anexo 4 se encuentra el código mediante el cual se obtuvieron las funciones de correlación.

En el período considerado hay 3000 puntos. Para el análisis se dividieron estos puntos en 18 intervalos con 150 puntos cada uno. El número intervalos y con ello el número de puntos por intervalo, se eligieron de manera aleatoria, aunque luego se comprobó que más allá de 150 puntos en general no se observan máximos relativos en la función de correlación.

Sin embargo, en algunos casos este número se modificó en función de la conveniencia para expresar resultados.

El programa de cálculo da como resultado 18 funciones de correlación, de las cuales se obtiene una curva promedio, que es la que se presenta en los gráficos.

El primer par de señales analizadas fue el siguiente:

### 3.2.1 YX04X01P3-QH01T001P3 (Flujo neutrónico - diferencia de temperaturas sistema primario)

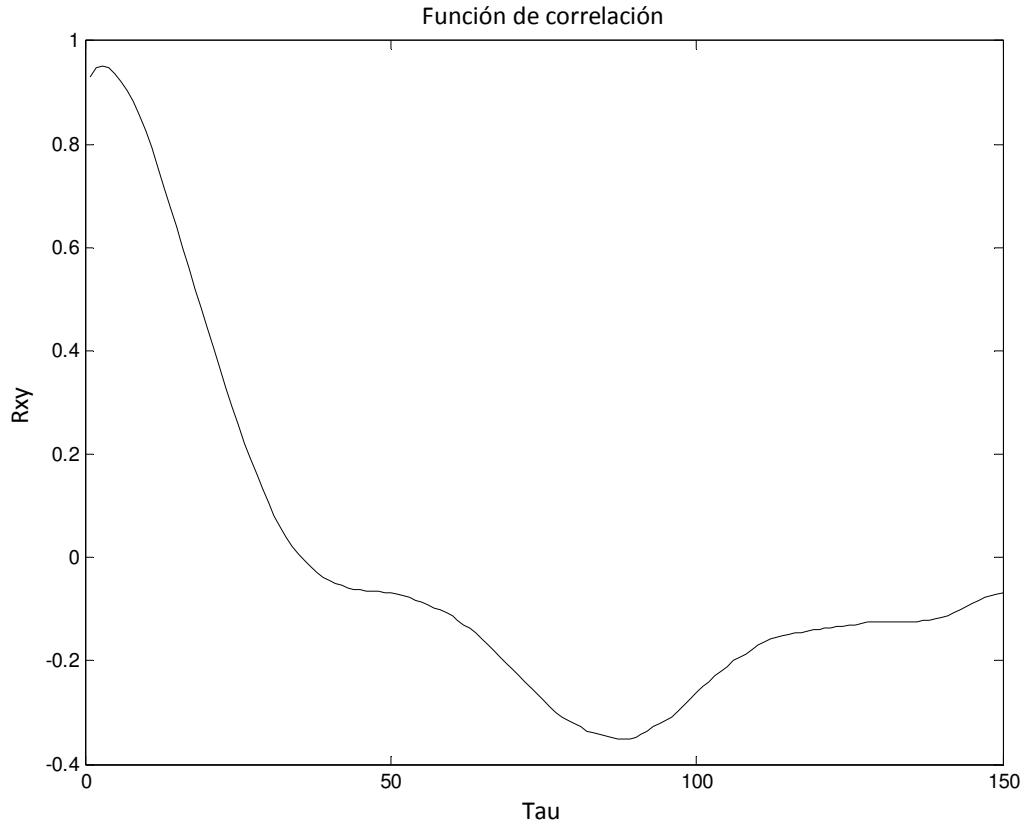


Figura 1 – Función de correlación para YX04X001P3 – QH01T001

En este caso se observa un máximo para  $n=2$ , lo que se corresponde con un tau de **8 segundos** (frecuencia de colección de datos = 4 seg).

Un máximo en la función de correlación está relacionado con una correlación positiva entre las dos señales analizadas.

Es decir, una variación en un sentido de la primera señal, produce otra variación en el mismo sentido de la segunda señal analizada. Cabe aclarar que en cuanto a los resultados, no es indiferente el lugar que ocupan las señales en la ecuación 2.

En el primer caso analizado, el máximo podría indicar un desfase de 8 segundos entre las señales. Un aumento en el flujo neutrónico (más potencia térmica) genera 8 segundos después un incremento en la diferencia de temperaturas en el sistema primario.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> El análisis de la diferencia de temperatura en el sistema primario es equivalente al análisis de la temperatura de la rama caliente, ya que es la temperatura que más varía debido a los cambios en el reactor dado que el Generador de Vapor actúa amortiguando pequeñas variaciones de temperatura.

Este desfase se puede atribuir al tiempo de calentamiento de la vaina combustible, la transmisión de calor a los diferenciales de volumen más próximos del sistema primario, al transporte de éstos hasta el instrumento de medición y al calentamiento de la termocupla.

Alrededor de los **344 segundos** (alrededor de 6 minutos) aparece un mínimo en la función de correlación. Valor que se corresponde con el semiperiodo medio de la regulación de potencia. Este valor puede variar según el estado neutrónico del núcleo y no será analizado en la presente tesina.

Sí se verá que este mínimo se reproduce en varias de las siguientes figuras y tiene el mismo origen.

### 3.2.2 YX04X001P3 – RA01F001 (Flujo neutrónico – caudal de vapor)

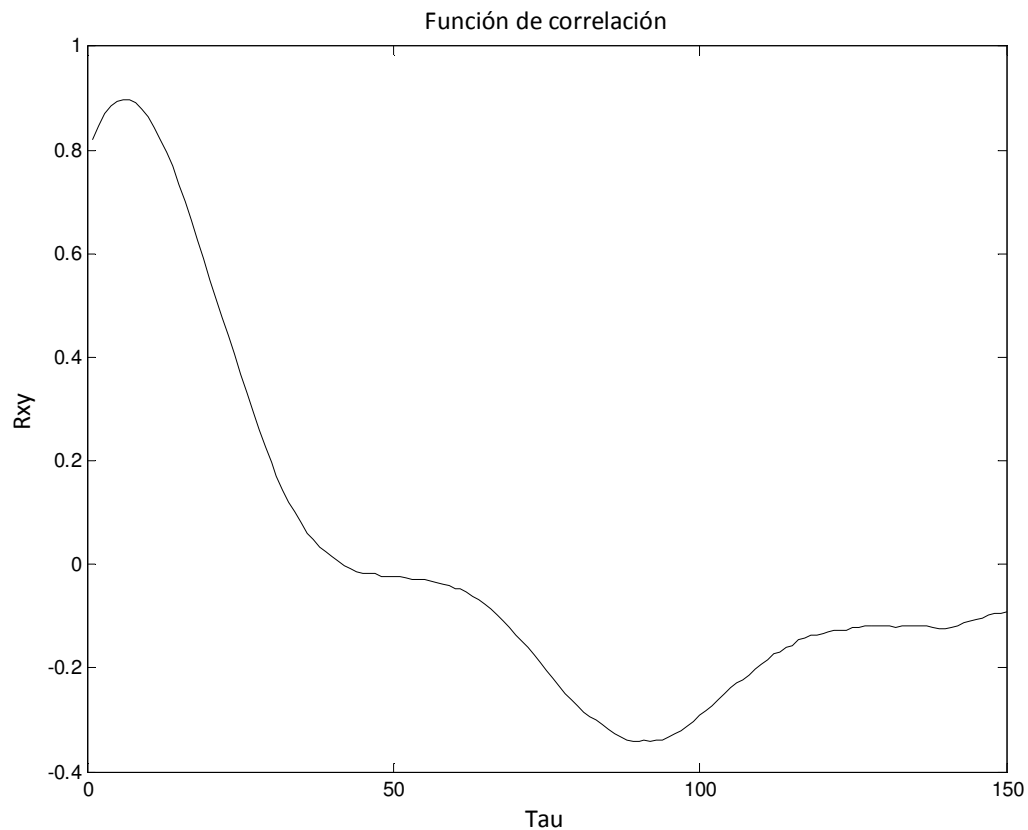


Figura 2 – Función de correlación para YX04X001P3 – RA01F001

Para este caso el máximo se obtiene a los **24 seg.**

El análisis de este par de señales es análogo al de YX04X001P3-QH01T001P3, dado que las tres variables están físicamente encadenadas. Ante un aumento de flujo neutrónico aumenta la temperatura del sistema primario, esto se traduce en mayor caudal de vapor generado. La diferencia en los retardos (8 segundos en el

primer caso y 24 en el segundo), radica en el contenido de energía del sistema generador de vapor – cañerías – turbina.

### 3.2.3 YX04X001P3 – RL11F002 (Flujo neutrónico – Caudal de alimentación del Generador de Vapor)

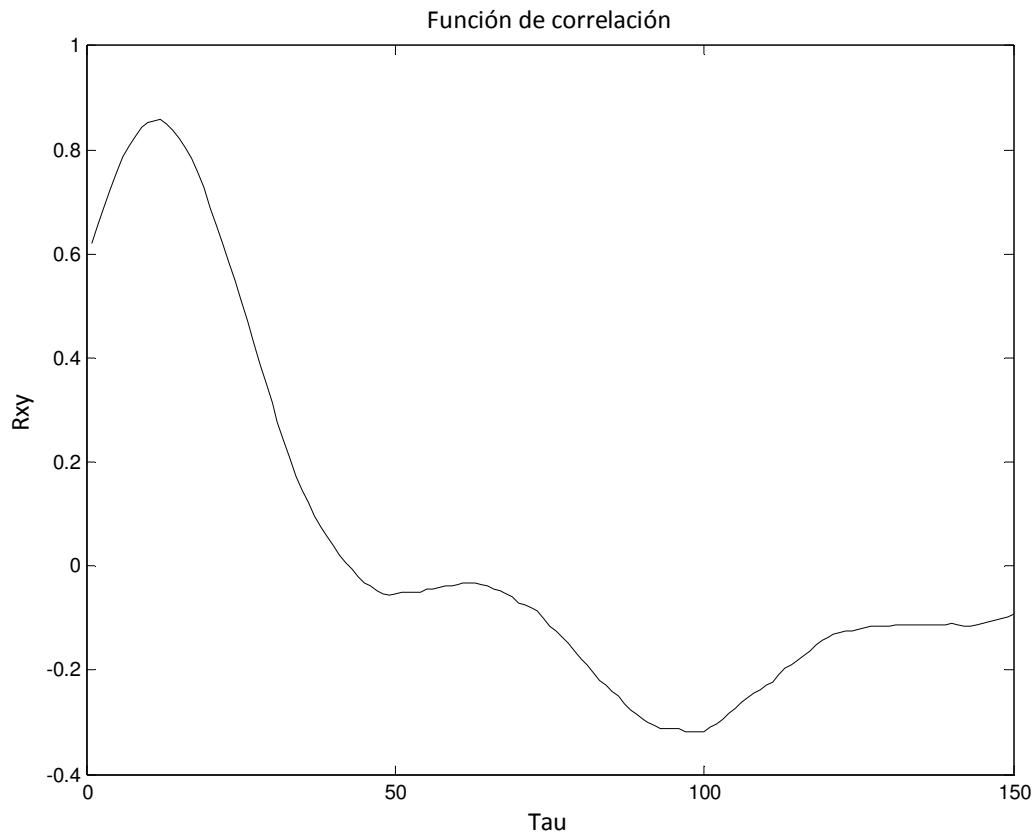


Figura 3 – Función de correlación para YX04X001P3 – RL11F002

El máximo de este par de señales se encuentra en un tiempo de desfase igual a **44 segundos**.

Este caso es similar al mencionado en el punto anterior: al aumentar el flujo neutrónico se genera más vapor, lo que provoca un descenso de nivel en el generador de vapor, demandando un mayor caudal de agua de alimentación para mantener el nivel, lo que se logra mediante la apertura de las válvulas RL11/12S005.

Es lógico que este tiempo de desfase resulte mayor al de los puntos 3.2.1 y 3.2.2, dado que se acumulan los retardos de los fenómenos explicados en los mismos.

### 3.2.4 YX04X001P3 – SA12P024 (Flujo neutrónico – Presión en la primera etapa de baja presión de la turbina)

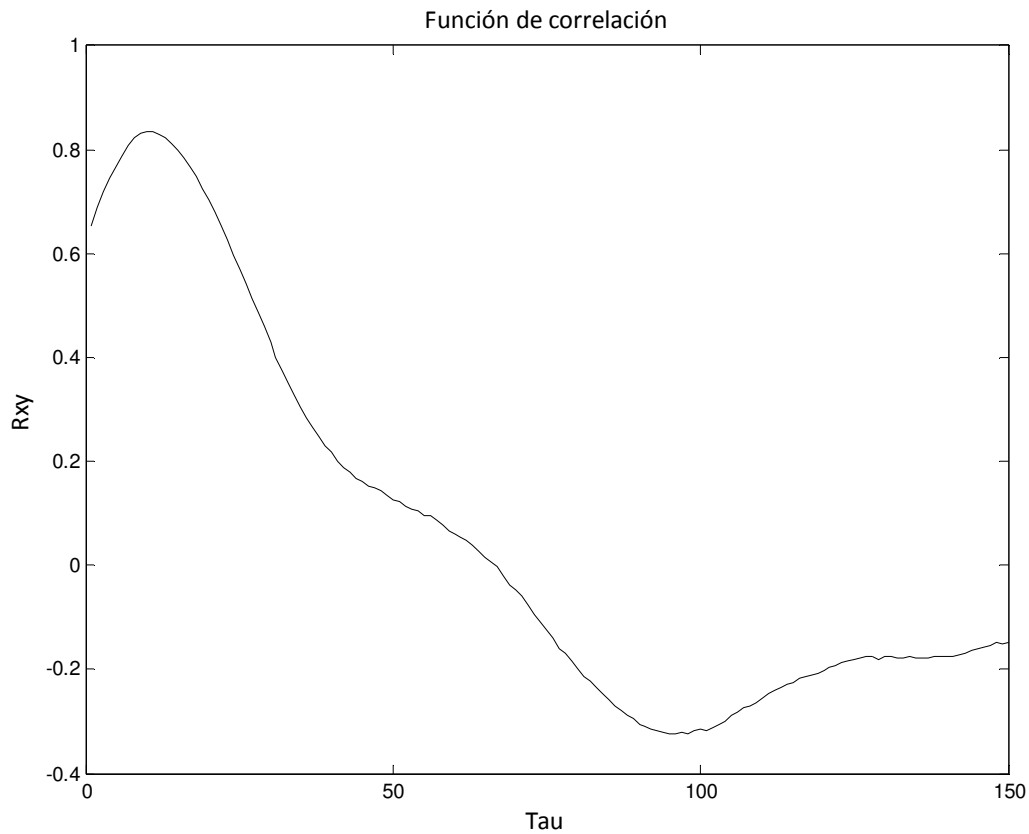


Figura 4 – Función de correlación para YX04X001P3 – SA12P024

El máximo corresponde a un tiempo de **40 segundos**.

La señal SA12P024 se encuentra ubicada en una extracción de la primera etapa de baja presión de la turbina. Es de esperar que el análisis sea semejante al del par de señales YX04X001P3 – RA01F001. Ante un aumento de la temperatura del primario, aumenta el caudal de vapor y en la turbina esto se traduce en un aumento de presión a lo largo de la misma. El retardo total de 40 segundos estaría dado por la suma de retardos antes mencionados: tiempo de calentamiento de la vaina combustible, la transmisión de calor a los diferenciales de volumen más próximos del sistema primario, transferencia de calor en el generador de vapor y recorrido del vapor hasta la medición de presión SA12P024.

### 3.2.5 YX04X001P3 – SA12T025 (Flujo neutrónico – Temperatura en la primera etapa de baja presión de la turbina)

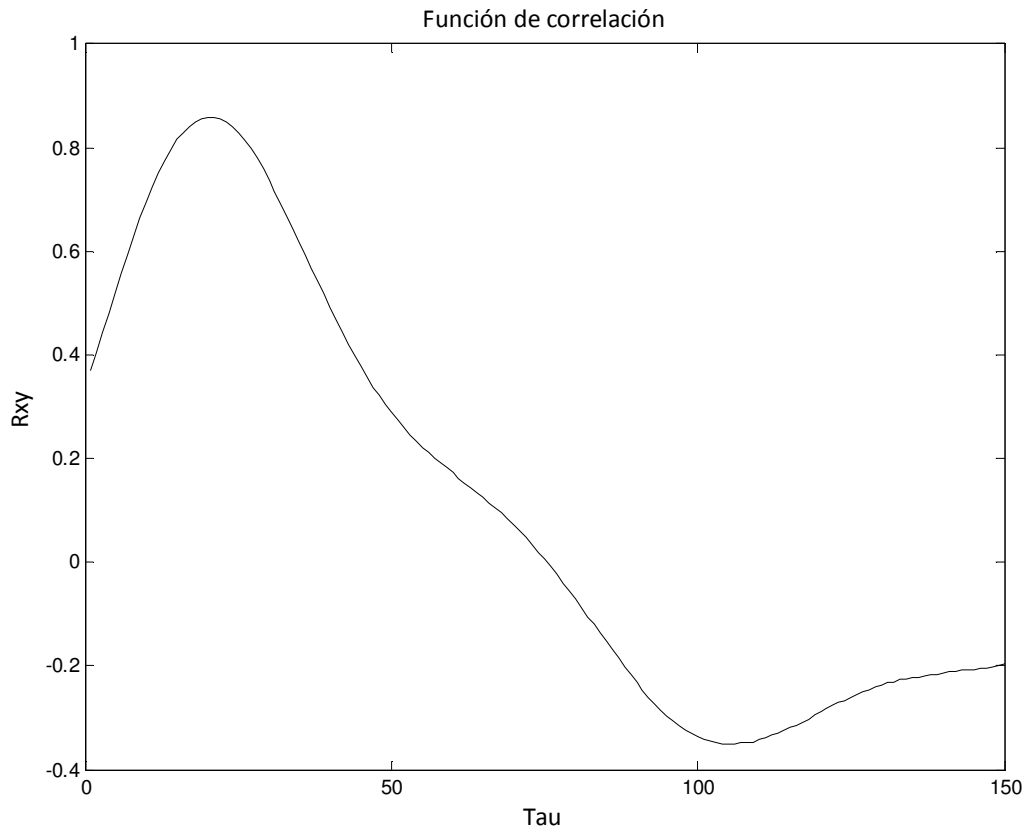


Figura 5 – Función de correlación para YX04X001P3 – SA12T025

El máximo de esta función se encuentra ubicado a los **76 segundos**. El análisis es el mismo que para el punto anterior. Se presupone que la diferencia radica principalmente en el tiempo de respuesta de ambos instrumentos (SA12P024/SA12T025). Los instrumentos de presión tienen una velocidad de respuesta considerablemente mayor que las PT100.

### 3.2.6 SA12P024-SA12T025 (Presión en la primera etapa de baja presión de la turbina - Temperatura en la primera etapa de baja presión de la turbina)

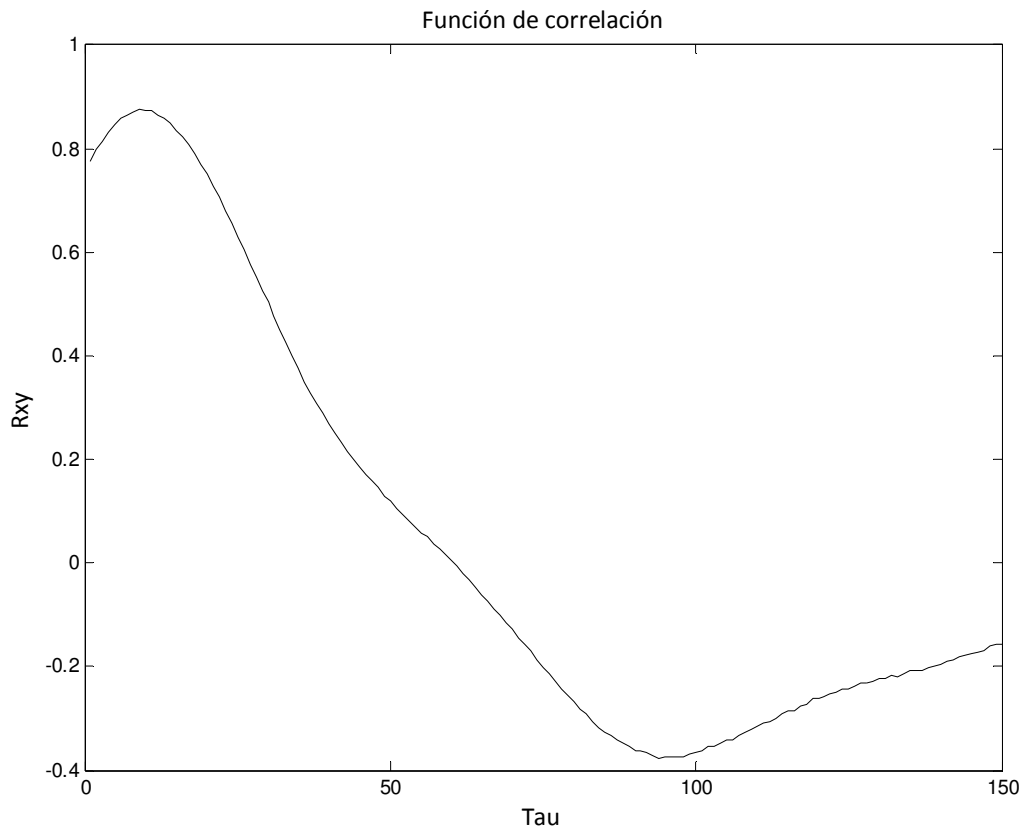


Figura 6 – Función de correlación para SA12P024 – SA12T025

El tiempo correspondiente al máximo de la función de correlación es de **32 segundos**. Nótese que este tiempo es aproximadamente igual a la diferencia de los tiempos determinados en los dos puntos anteriores.

Este retardo se puede atribuir directamente al retardo del instrumento de la señal de temperatura: PT100.

Este hallazgo es de especial importancia ya que permite por ejemplo, controlar el funcionamiento de la instrumentación colocada en líneas similares.

### 3.2.7 QH01T001P3 – RA01F001 (Diferencia de temperaturas sistema primario – caudal del vapor)

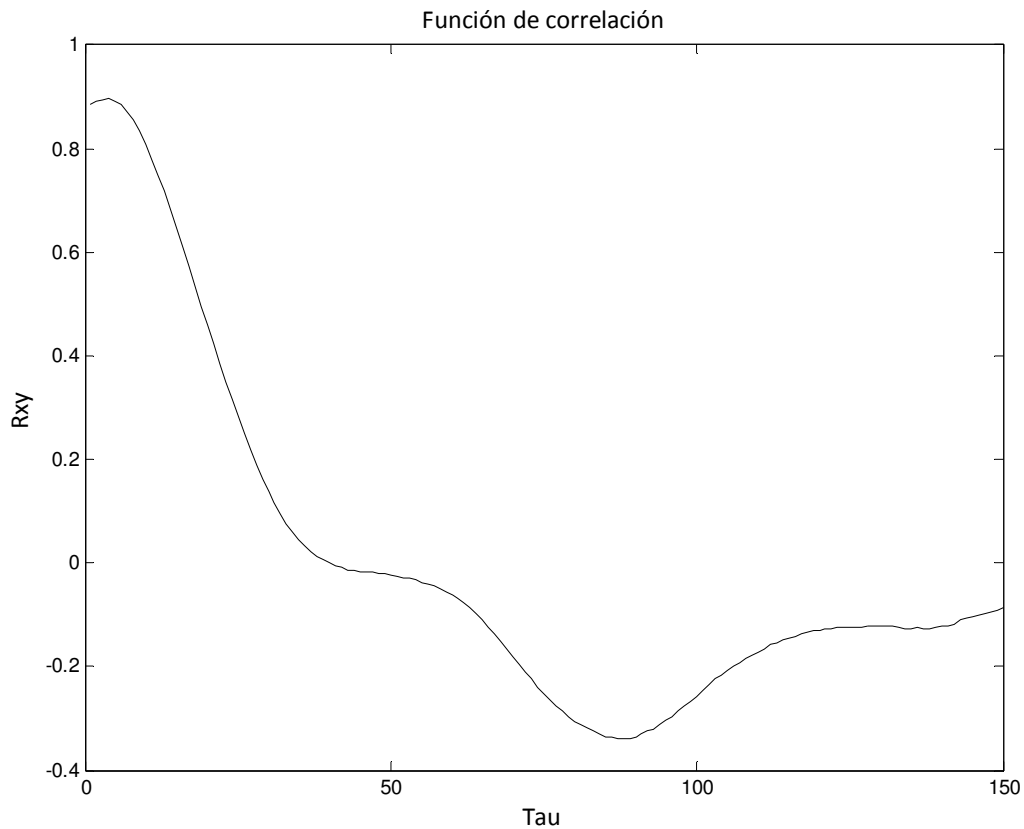


Figura 7 – Función de correlación para QH01T001P3 – RA01F001

A los **12 segundos** se observa un máximo en la función de correlación. La explicación se asemeja a la del punto 3.2.2 (señales YX04X001P3 – RA01F001).

La señal QH01T001P3 se encuentra encadenada con las otras dos mediante la secuencia YX04X001P3 – QH01T001P3 - RA01F001. Fueron mencionados ya los tiempos de retardo de los pares YX04X001P3 – QH01T001P3 (8 segundos) y de YX04X001P3 – RA01F001 (24 segundos). Resulta lógico que el tiempo de retardo del par restante: QH01T001P3 – RA01F001 esté incluido dentro de los 24 segundos. Los 12 segundos correspondientes a este par representan principalmente la capacidad de almacenamiento de energía del circuito generador de vapor – cañerías - turbina.

### 3.2.8 QH01T001P3 – RL11F002 (Diferencia de temperaturas sistema primario – Caudal de alimentación al generador de vapor)

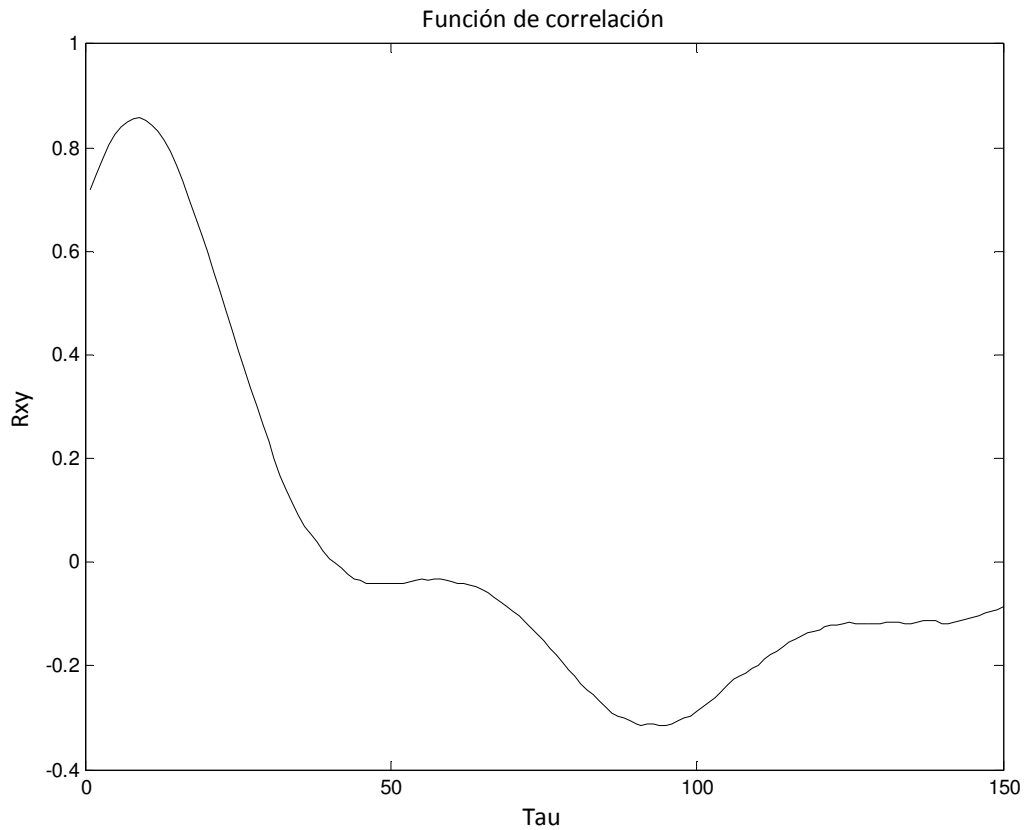


Figura 8 – Función de correlación para QH01T001P3 – RL11F002

El máximo se presenta en este caso a los **32 segundos**.

Cabe el mismo análisis que para los puntos 3.2.3 y 3.2.7. Es decir, este par de señales se puede considerar parte de la serie: YX04X001P3 – QH01T001 – RL11F002, en la que los tiempos de retardo de cada par forman el tiempo de retardo total de 44 segundos.

**3.2.9 QH01T001P3 – SA12P024 (Diferencia de temperaturas sistema primario – presión en la primera etapa de baja presión de la turbina)**

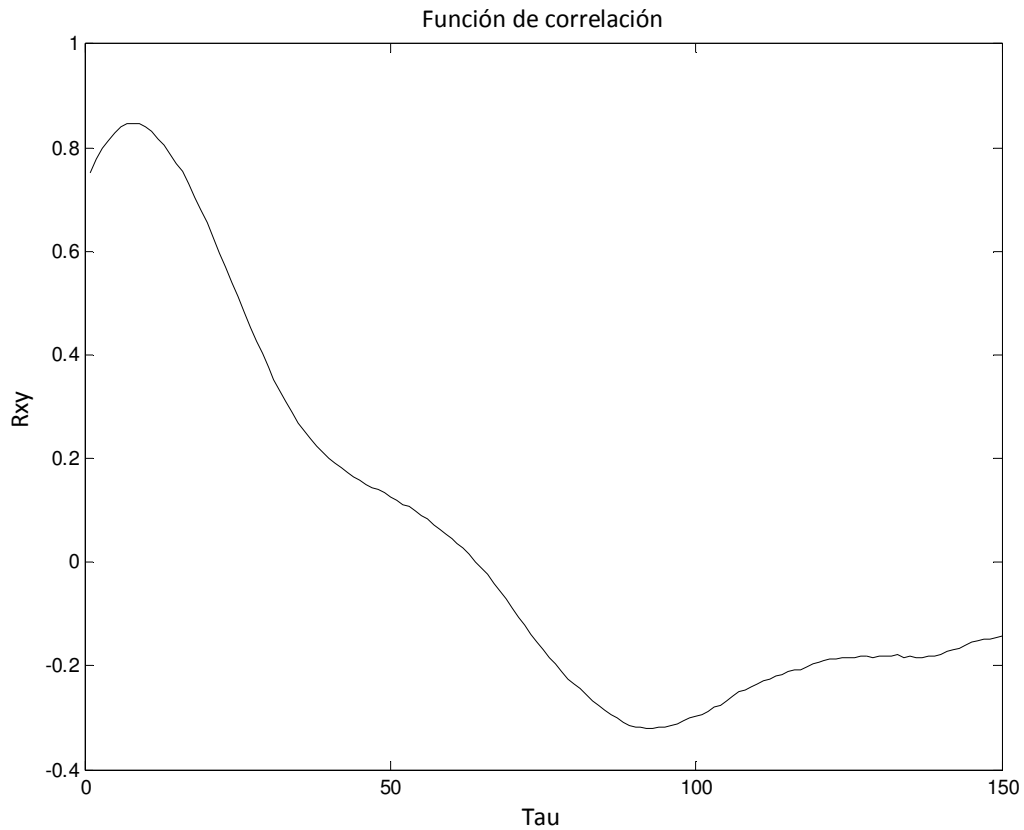


Figura 9 – Función de correlación para QH01T001P3 – SA12P024

El máximo para este par de señales se establece a los **28 segundos**.

Análogamente con el punto anterior, este par de señales forma parte de la secuencia YX04X001P3 – QH01T001P3 – SA12P024. El tiempo de retardo del par analizado está incluido dentro del tiempo de retardo total (40 segundos).

Los 28 segundos corresponden al tiempo en que aumenta la temperatura del sistema primario y su energía es transferida al vapor, aumentando su caudal y finalmente su presión.

**3.2.10 QH01T001P3 – SA12T025 (Diferencia de temperaturas sistema primario - temperatura en la primera etapa de baja presión de la turbina)**

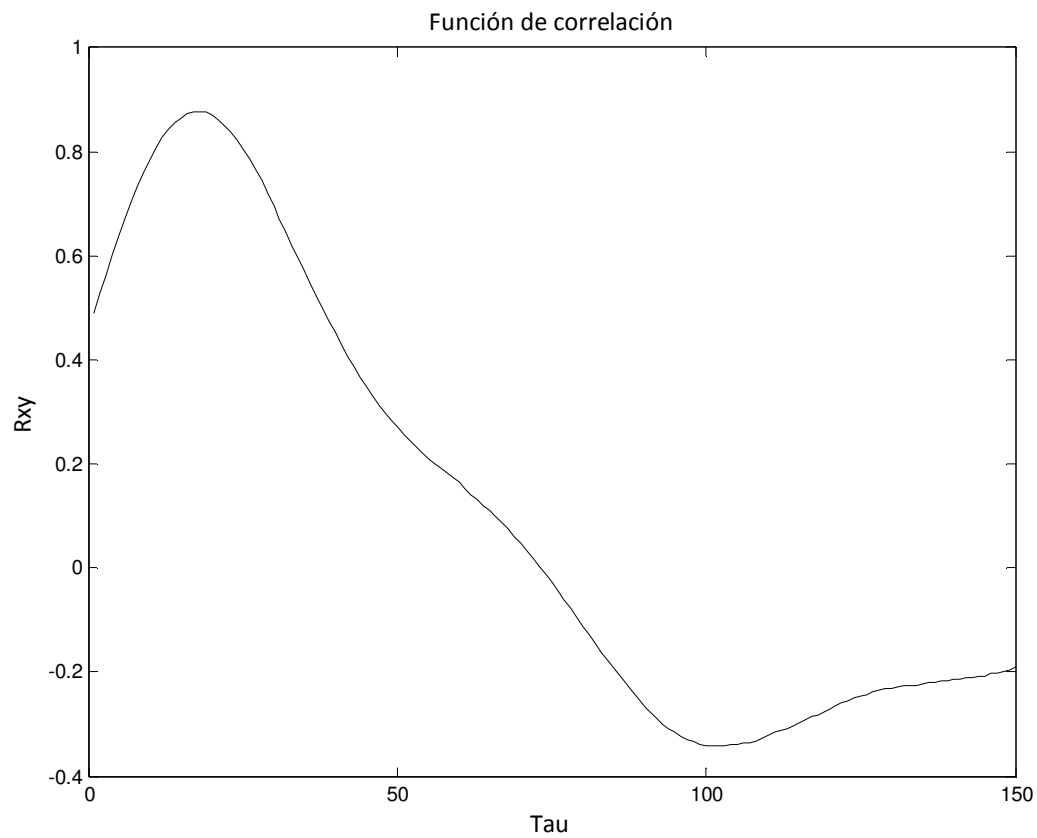


Figura 10 – Función de correlación para QH01T001P3 – SA12T025

El máximo en este caso se alcanza a los **64 segundos**.

Se analiza este caso de la misma forma que el anterior. Lo que varía es el tiempo de respuesta del instrumento de medición de temperatura (PT100).

**3.2.11 RL11F002 – SA12P024 (Caudal de agua de alimentación al generador de vapor – presión en la primera etapa de baja presión de la turbina)**

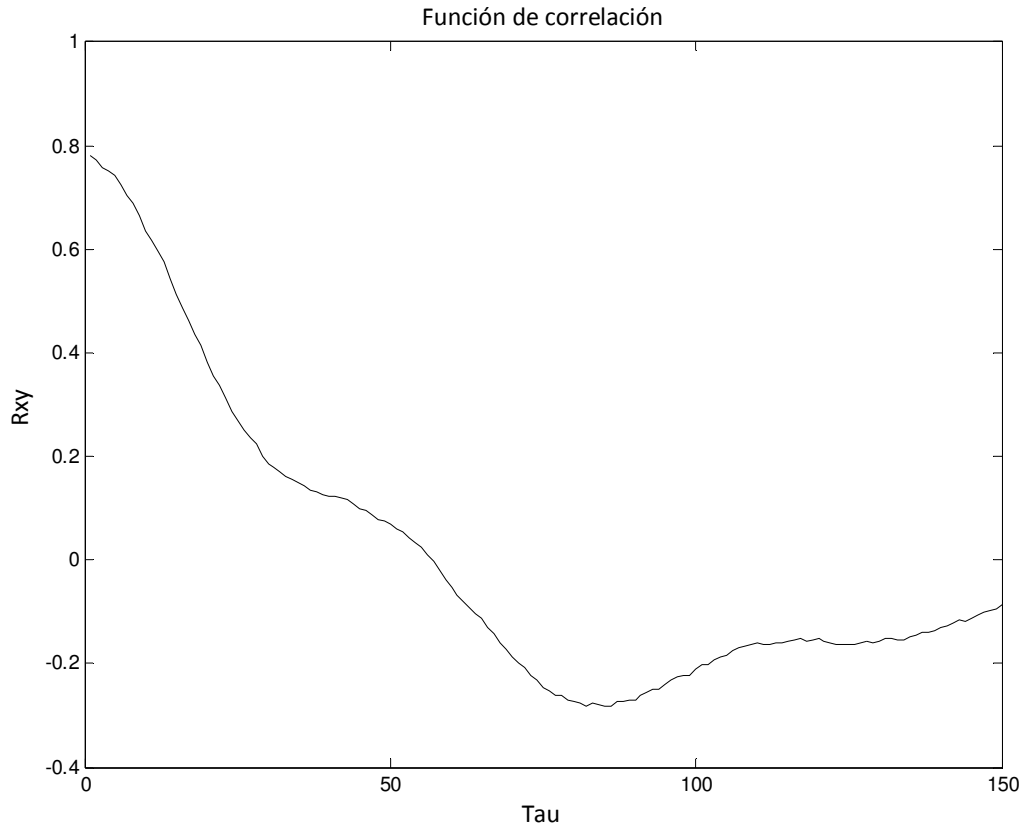


Figura 11 – Función de correlación para RL11F002 – SA12P024

Este caso resulta de especial interés, ya que el máximo de correlación se encuentra en **0 segundos**. Esto se puede apreciar mejor en un gráfico completo de  $R_{xy} / R_{yx}$ , centrado en  $\tau = 75$  donde la función que se encuentra al izquierda de 75 representa la correlación entre las señales SA12P024 y RL11F002, y la función de la derecha representa la correlación entre las señales RL11F002 y SA12P024. Esto se ve en la siguiente figura:

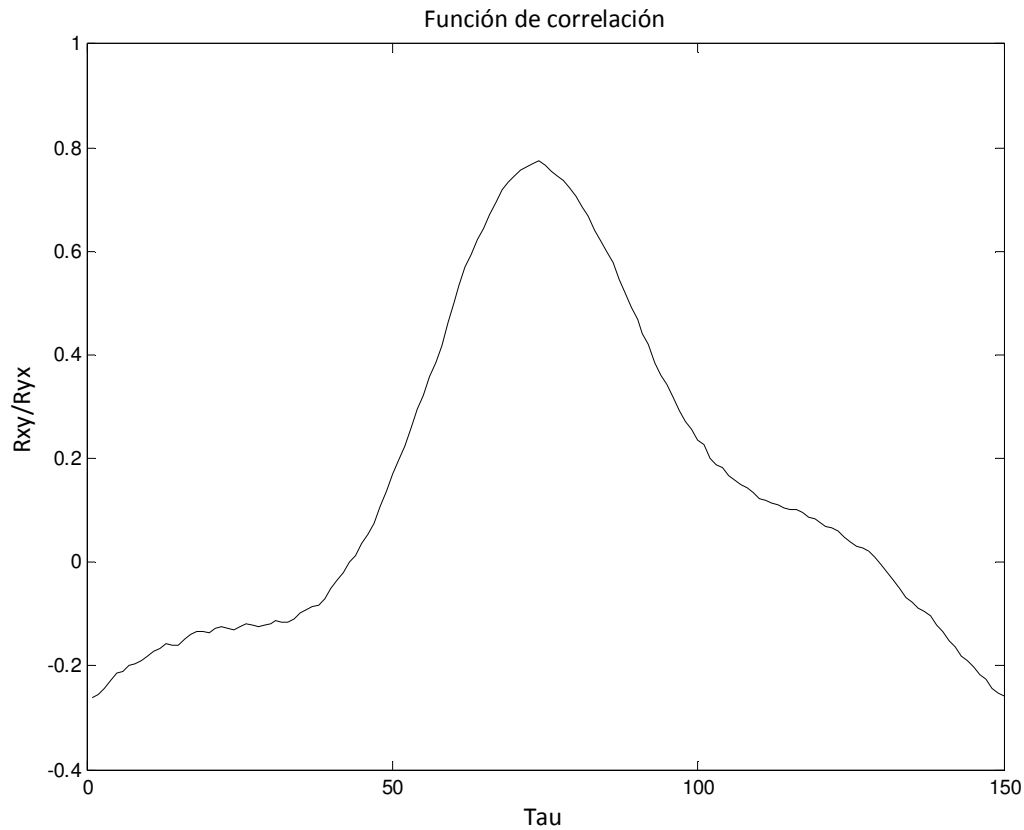


Figura 12 – Función de correlación para RL11F002 Y SA12P024

En esta figura se aprecia que la función está centrada a tiempo de desfase igual a 0 segundos. Esto no significa en este caso que las señales estén directamente relacionadas entre sí, pero sí indica que ante un mismo proceso de excitación (por ejemplo aumento de la temperatura del primario, QH01T001P3), ambas responden con un tiempo de retardo parecido. Del punto 3.2.8 se obtiene que el retardo entre las señales QH01T001P3 y RL11F002 es de 32 segundos, mientras que del punto 3.2.9 se obtiene un retardo de 28 segundos para las señales QH01T001P3 y SA12P024.

Si bien estos números no son iguales, se pueden considerar así para este análisis.

**3.2.12 RL11F002 – SA12T025 (Caudal de agua de alimentación al generador de vapor – temperatura en la primera etapa de baja presión de la turbina)**

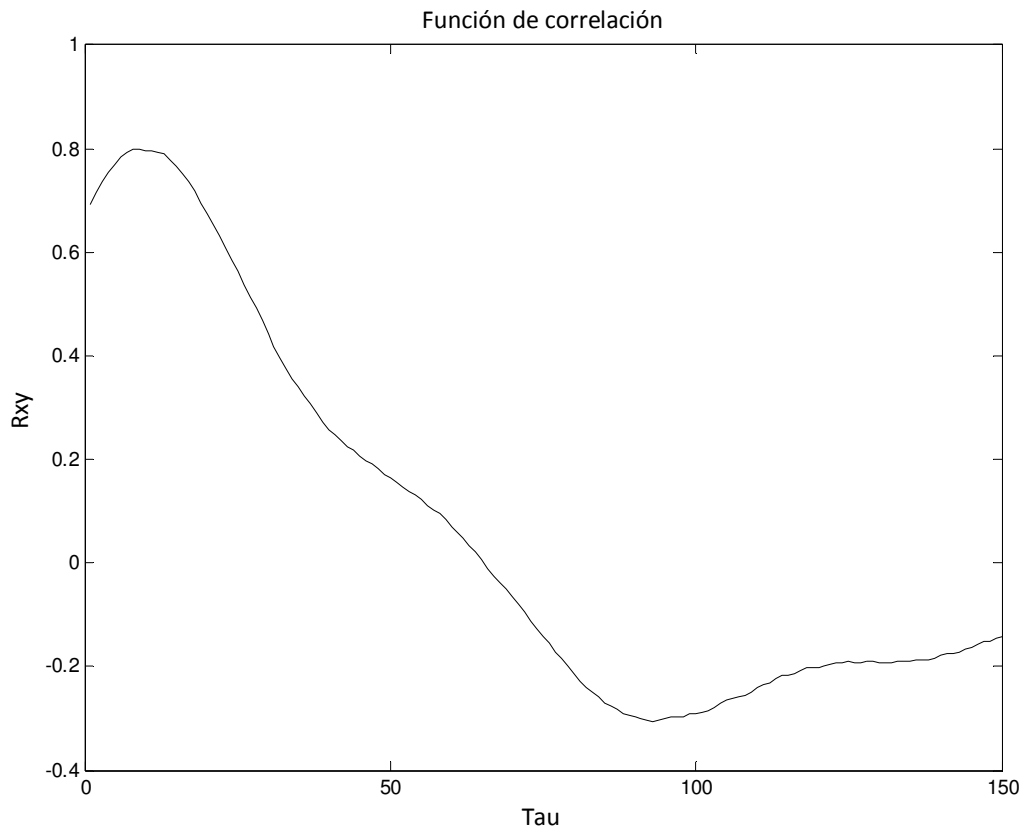


Figura 13 – Función de correlación para RL11F002 Y SA12T025

El máximo se da para un tiempo de **32 segundos**. Para este caso el análisis es el mismo que el anterior y el desplazamiento de 32 segundos seguramente esté relacionado con el retardo propio de la instrumentación (PT100).

**3.2.13 YX04X01P3-QM00T021 (Flujo neutrónico – temperatura de salida sistema moderador)**

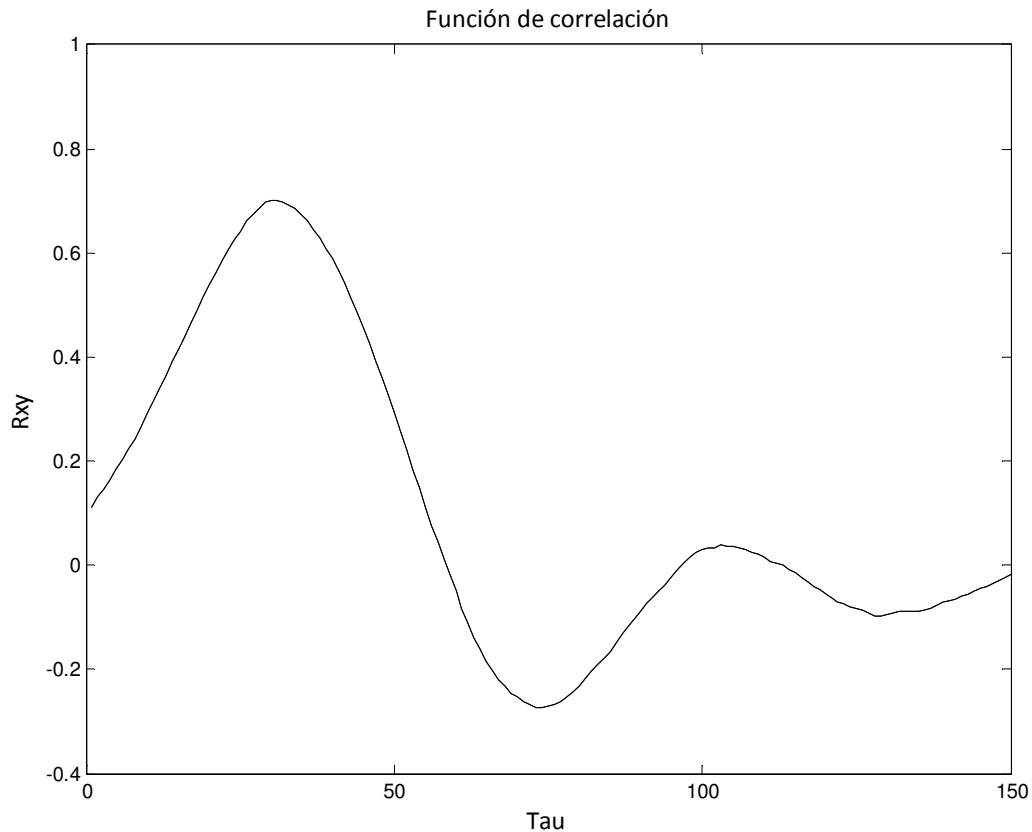


Figura 14 – Función de correlación para YX04X001P3 – QM00T021

En este caso el máximo principal se observa para un tiempo de **120 seg.**

Se observa también un mínimo a los **290 seg.**

Ante una subida del flujo neutrónico es esperable que en menos de 8 segundos suba la diferencia de temperaturas en el sistema primario.

El moderador recibirá los efectos de esta subida de varias maneras. Una inmediata (proceso de moderación y absorción gamma), otras demoradas ya que aparecen como consecuencia del calentamiento del primario.

Un análisis permite decir que los elementos de volumen del moderador próximos a la salida del tanque no sufren ninguno de los mencionados efectos, siendo los efectos máximos de:

- moderación y absorción gamma: 240 seg (coincide con el tiempo en que el moderador da una vuelta al circuito)
- ídem para la transmisión térmica a través de los canales (potencia transferida desde el sistema primario)
- convección desde el sistema primario a través del anillo de igualación de presiones: 60 seg.

Este proceso no es de una evaluación tan directa y el máximo y mínimo observados no pueden analizarse sobre la base de estos tiempos de tránsito pues

se producen realimentaciones de la temperatura del moderador hacia el flujo neutrónico.

Por lo tanto este proceso se transforma en un sistema de estudio de una mayor complejidad y que en una etapa posterior se solicitará un cálculo con código Relap o similar que pueda contemplar la complejidad del modelo.

Cabe agregar que a esta realimentación se producen las realimentaciones adicionales relacionadas con la regulación de nivel del generador de vapor que originan cambios también en la temperatura del moderador.

Debido a lo antes dicho todos los gráficos remanentes de funciones de correlación donde intervienen temperaturas del moderador, serán presentados pero no analizados.

### 3.2.14 QH01T001P3 – QM00T021 (Diferencia de temperaturas sistema primario – temperatura de salida del sistema moderador)

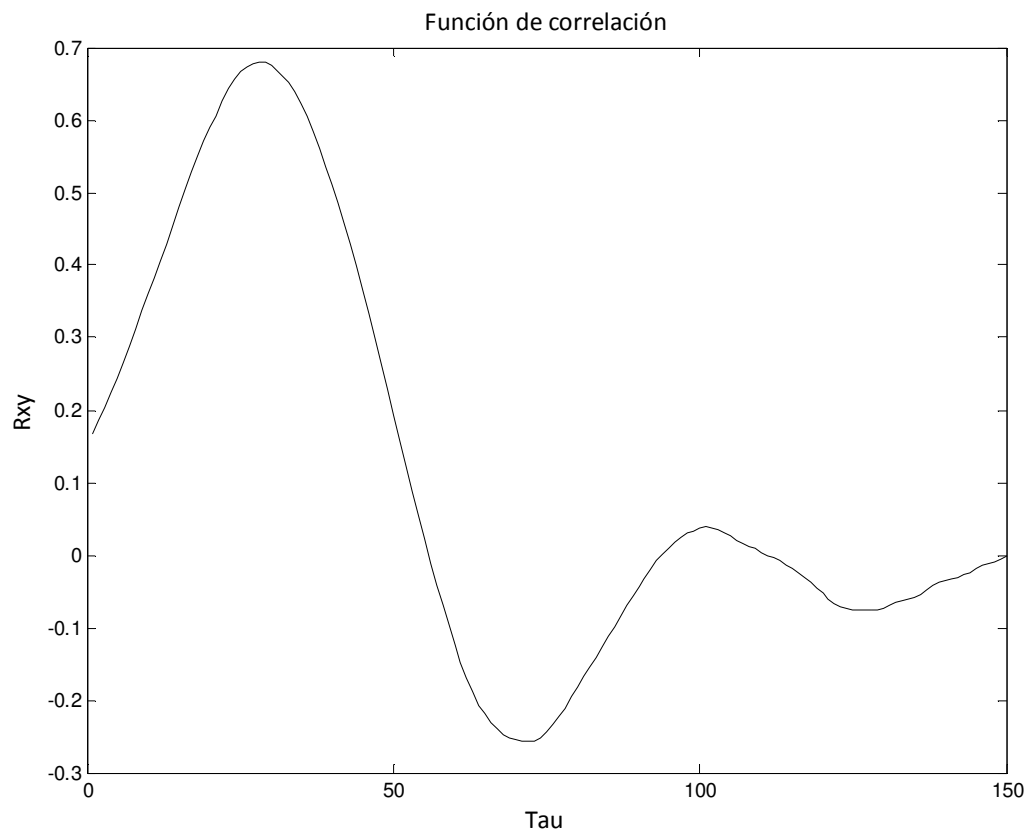


Figura 15 – Función de correlación para QH01T001P3 – QM00T021

**3.2.15 QH01T001P3 - QM01T022 (Diferencia de temperaturas sistema primario – temperatura de entrada del sistema moderador)**

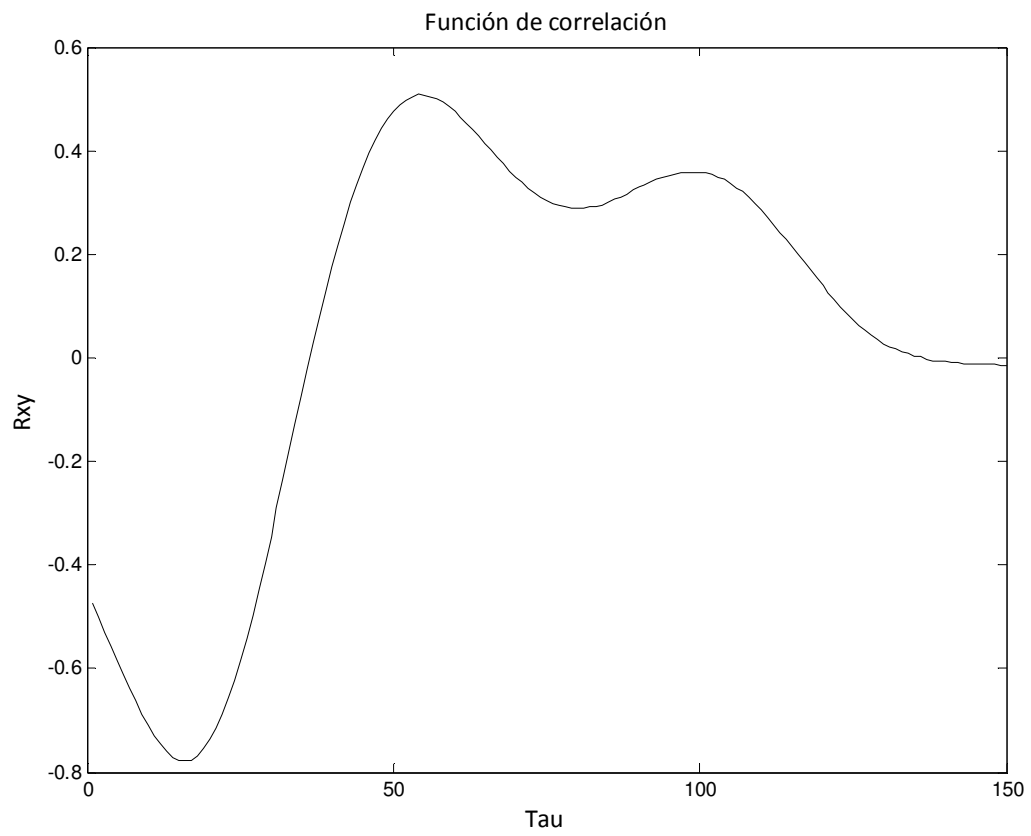


Figura 16 – Función de correlación para QH01T001P3 – QM01T022

**3.2.16 QM00T021 – QM01T022 (Temperatura de salida del sistema moderador – temperatura de entrada al sistema moderador)**

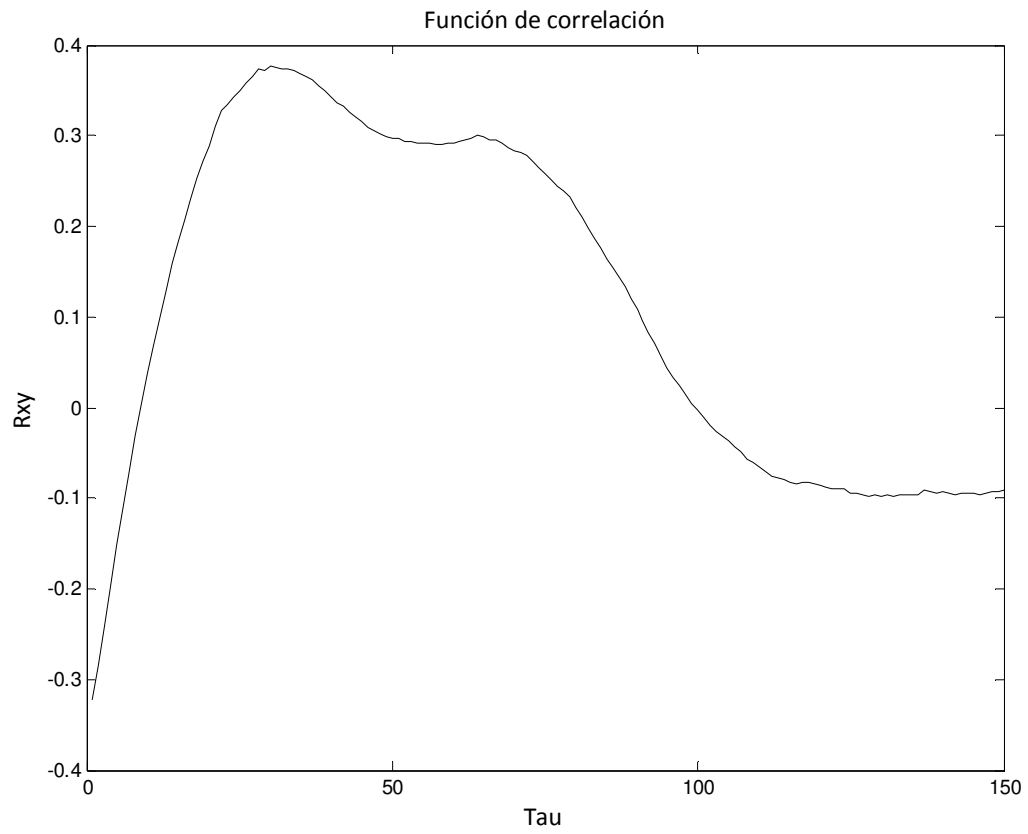


Figura 17 – Función de correlación para QM00T021 –QM01T022

**3.2.17 RL11F002 – QM01T022 (Caudal de agua de alimentación al generador de vapor – Temperatura de entrada del sistema moderador)**

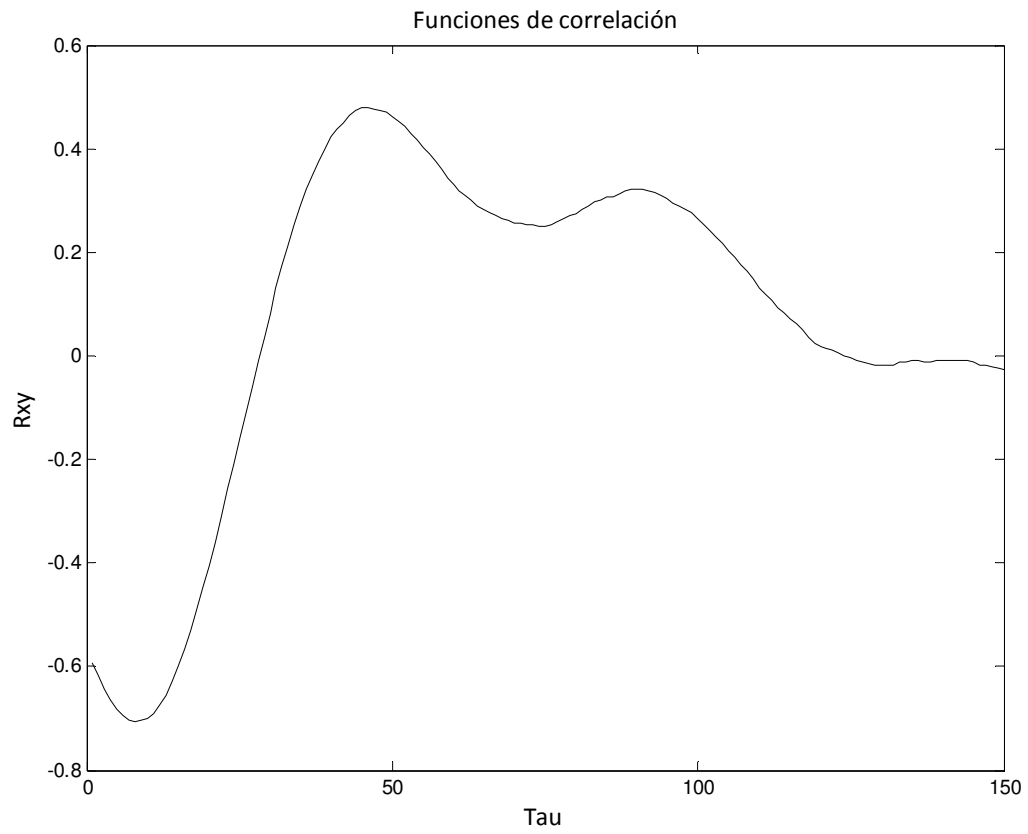


Figura 18 – Función de correlación para RL11F002 – QM01T022

### 3.2.18 RL11F002 – RESTAQM1 (Caudal de agua de alimentación al generador de vapor – diferencia de temperatura del sistema moderador)

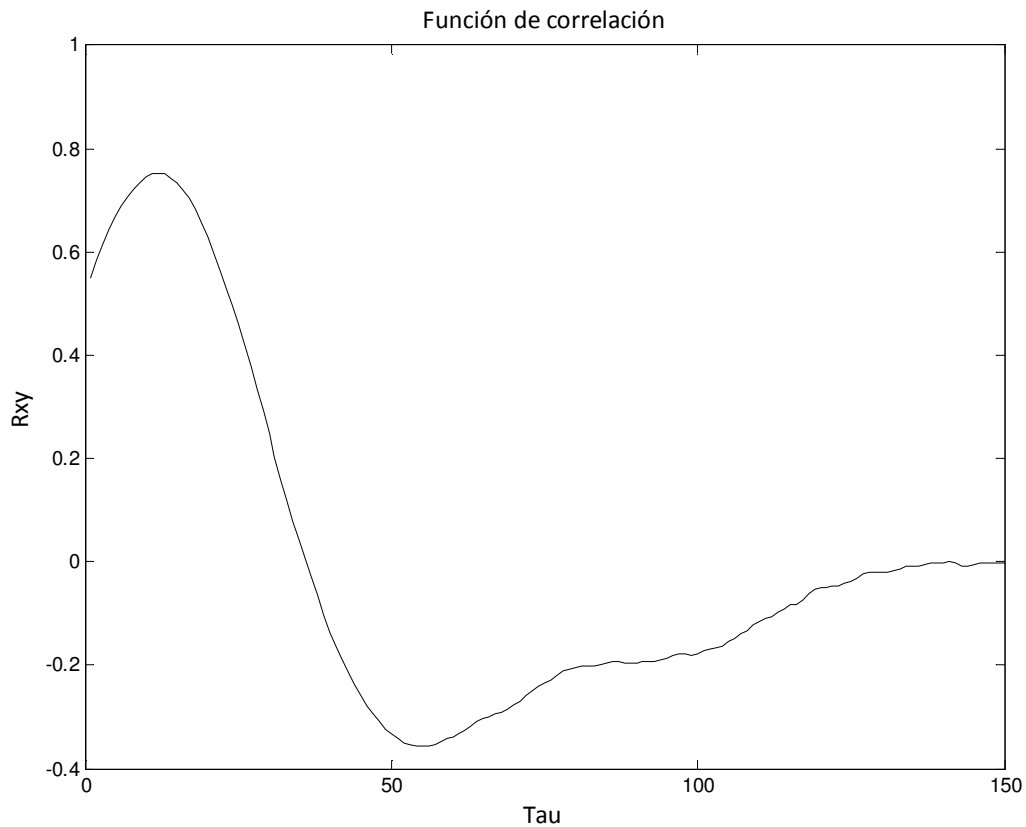


Figura 19 – Función de correlación para RL11F002 – RESTAQM1

El máximo de la función se encuentra en un tiempo de **44 segundos**.

La señal RESTAQM1 es la diferencia de temperatura del moderador entre la entrada y la salida de los intercambiadores de calor: QM00T021 – QM01T022.

Ante un aumento del caudal de agua de alimentación, la temperatura del moderador a la salida del intercambiador de calor desciende, por lo que la señal RESTAQM1 aumenta.

### 3.3 Funciones de correlación cruzada entre señales (día 02/11/11)

A continuación se muestran algunas figuras equivalentes a las analizadas, pero con datos tomados otro día. En general las funciones merecen el mismo análisis ya que coincide su forma y tiempo de máximos y mínimos.

### 3.2.19 YX04X01P3 – QH01T001P3 (Flujo neutrónico - diferencia de temperaturas sistema primario)

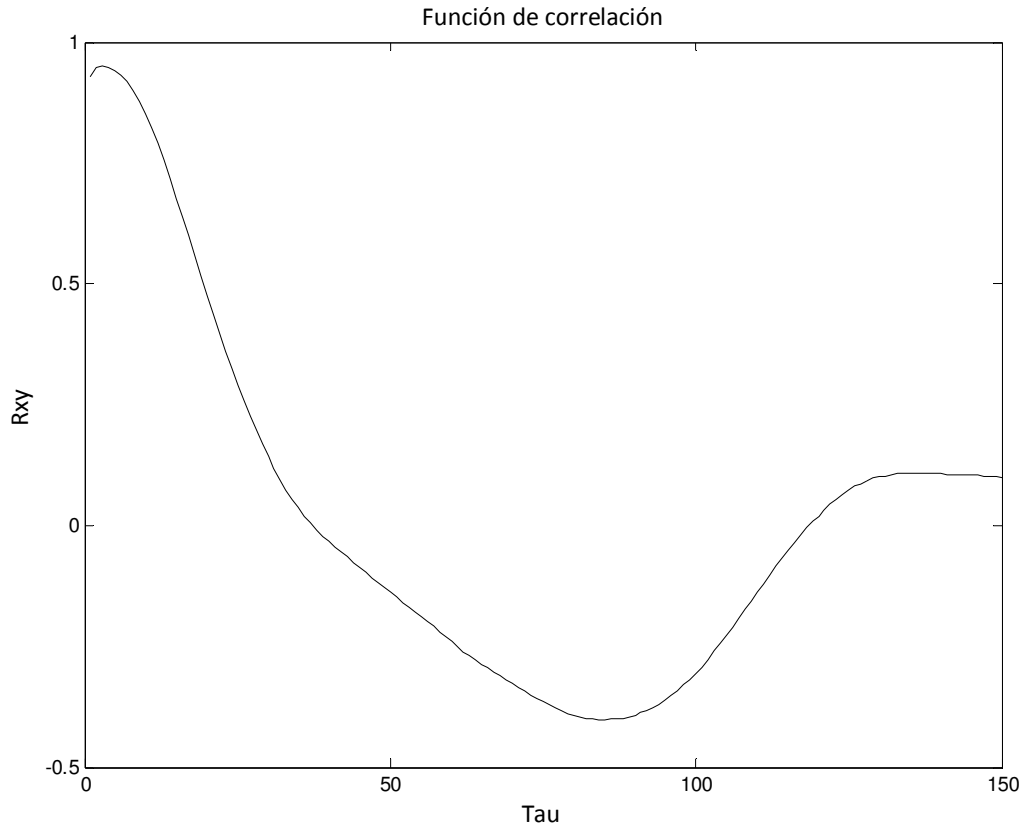


Figura 20 – Función de correlación para YX04X01P3 – QH01T001P3

El tiempo correspondiente al máximo es de **8 segundos**, al igual que en el punto 3.2.1.

Hasta  $\tau = 100$  segundos se observa prácticamente la misma función de correlación. Las diferencias cuantitativas observadas más allá de los 100 segundos corresponden a diferencias en la frecuencia de ciclos del reactor entre los dos días analizados. Esto aplica también a las dos siguientes figuras.

**3.2.20 YX04X001P3 – SA12P024 (Flujo neutrónico – presión en la primera etapa de baja presión de la turbina)**

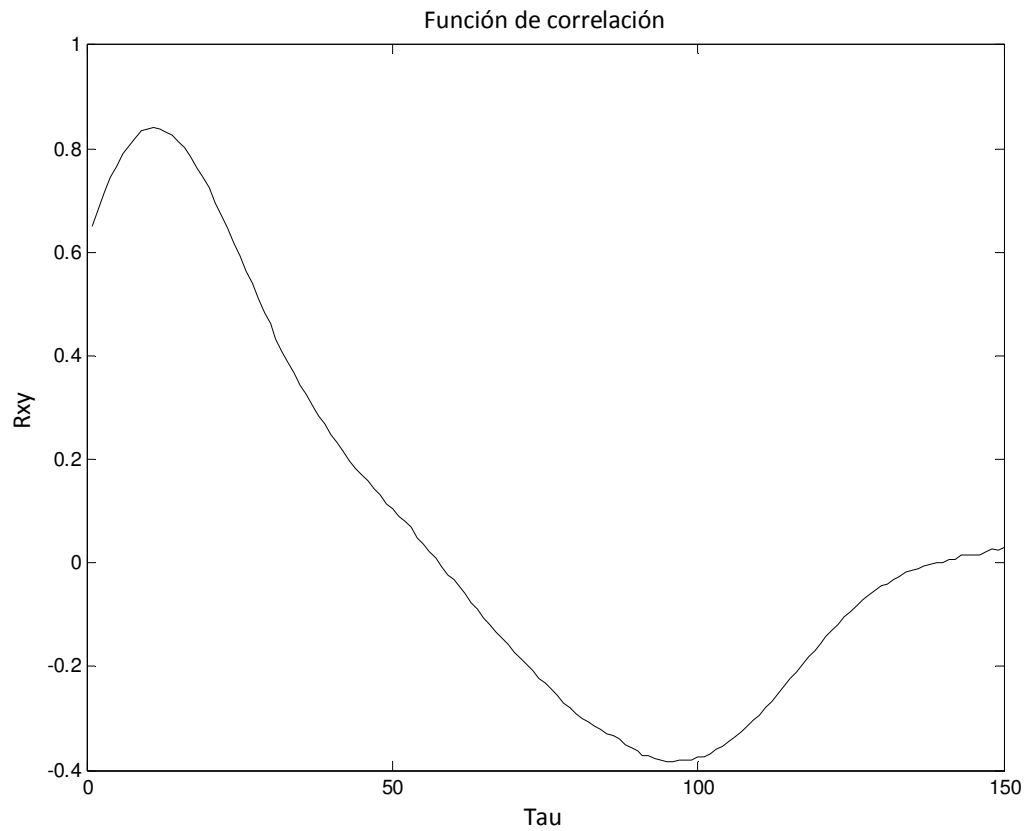


Figura 21 – Función de correlación para YX04X01P3 – SA12P024

En este caso, al igual que en el punto 3.2.4, el máximo se alcanza para un tiempo de **40 segundos**.

**3.2.21 RL11F002 – RESTAQM1 (Caudal de agua de alimentación al generador de vapor – diferencia de temperaturas en el sistema moderador)**

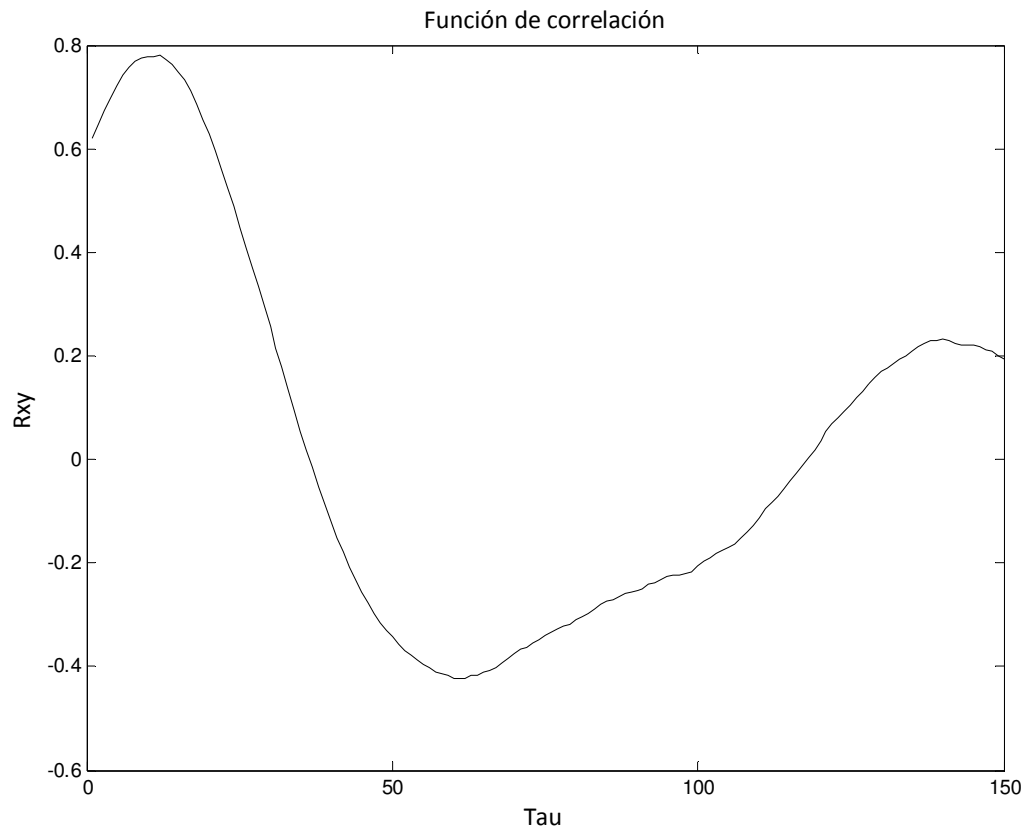


Figura 22 – Función de correlación para RL11F002 – RESTAQM1

En este caso, además de conservarse la forma de la función de correlación, también se conserva el tiempo correspondiente al máximo: **44 segundos**.

### 3.4 Funciones de autocorrelación

A continuación se presenta una figura que contiene las funciones de autocorrelación para todas las señales, superpuestas.

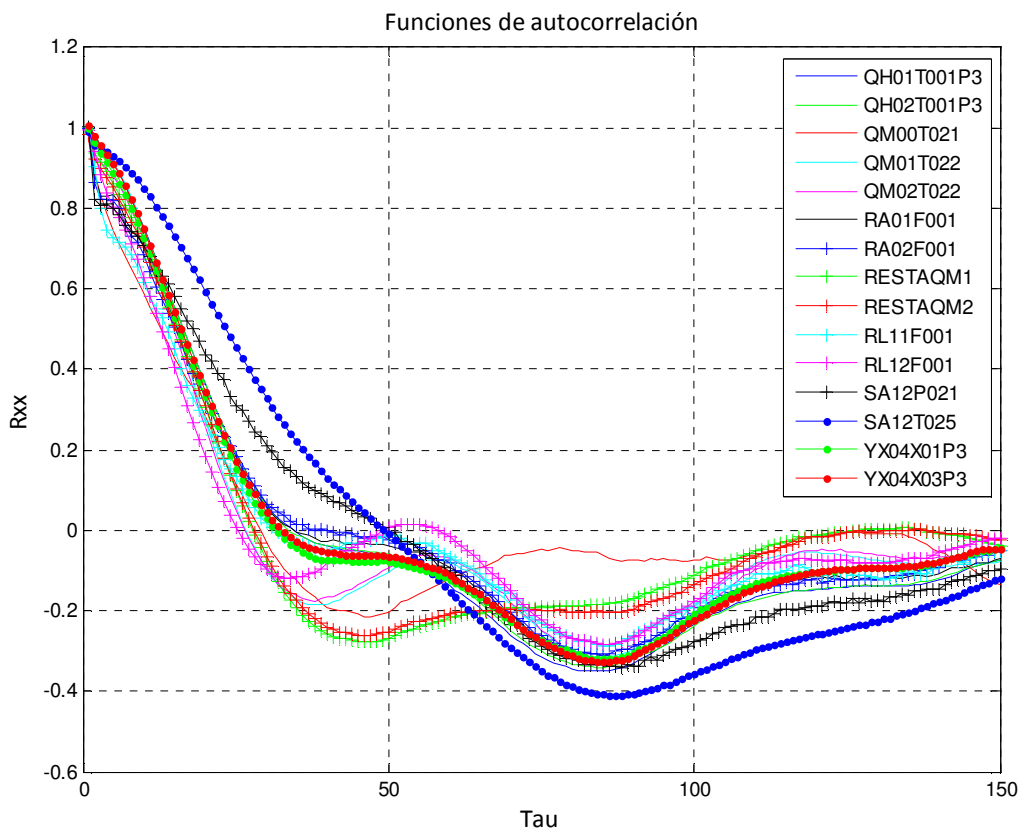


Figura 23 – Funciones de autocorrelación

Dado que en el programa de cálculo se utilizó la fórmula de covarianza normalizada, que es equivalente a la ecuación 4, dividida por el desvío estándar elevado al cuadrado, el valor de  $R_{xx}$  para  $\tau = 0$  es 1.

La siguiente figura muestra en detalle la zona cercana a 1.

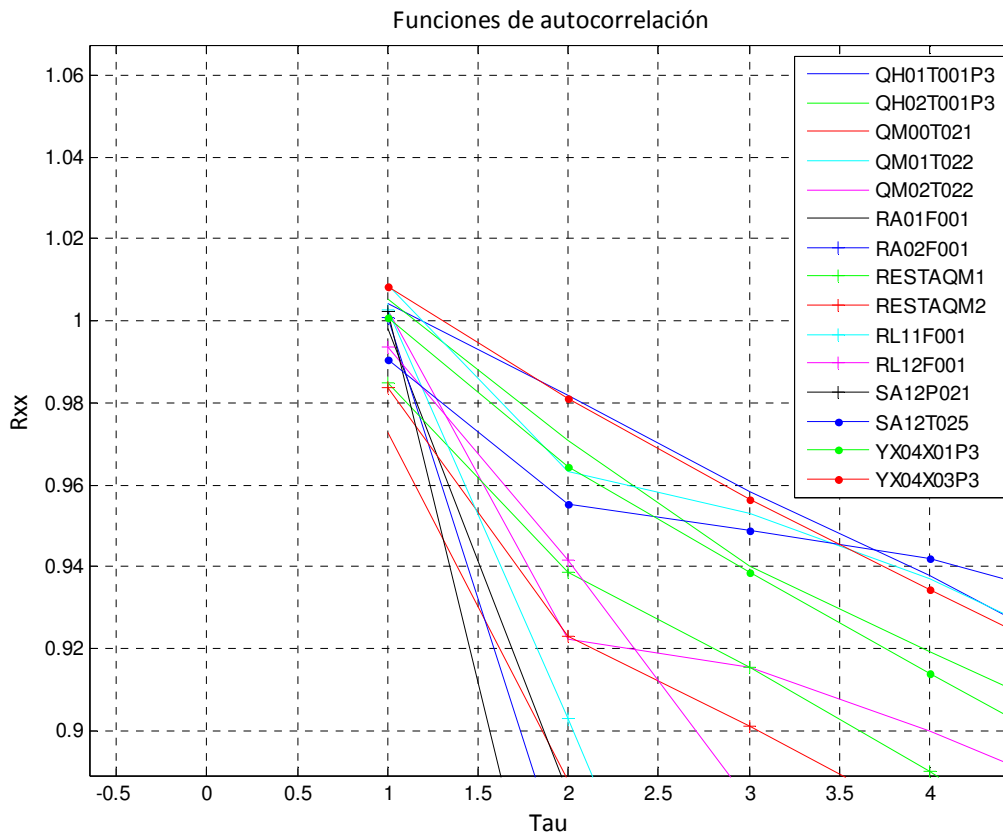


Figura 24 – Funciones de autocorrelación

Como se expresó en la ecuación 5 del pto. 2.4.2, la función de correlación es simétrica. Esto se puede apreciar en el siguiente gráfico:

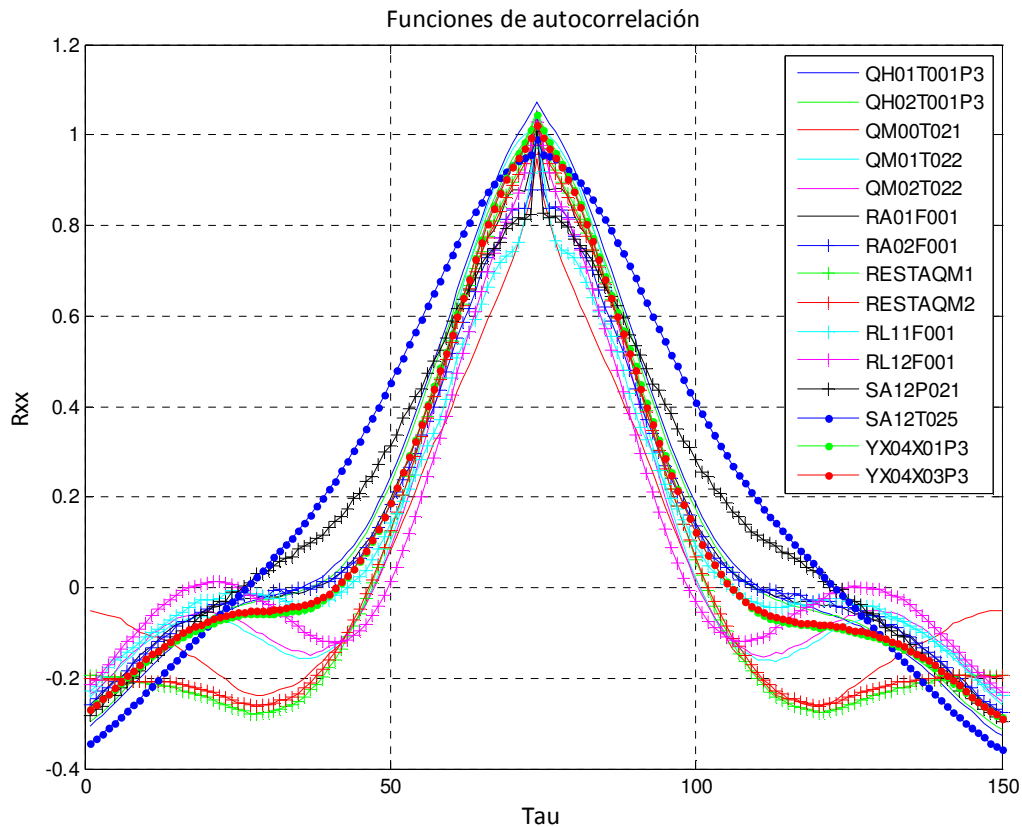


Figura 25 – Funciones de autocorrelación

### 3.5 Error

Para calcular el intervalo de confianza en el cual se presentan los resultados de las funciones de correlación, primero hubo que verificar que las curvas a partir de las cuales se calculó la curva promedio presentaran una distribución normal.

En algunos casos se halló que la distribución no es exactamente normal, y para estos casos, el resultado que se presenta es aproximado.

Esto se estudió mediante la herramienta del programa de cálculo Matlab llamada “Distribution Fitting Tool”.

A continuación se presentan los gráficos que se analizaron para algunos pares de señales.

Los puntos alrededor de las rectas son los valores a partir de los cuales se calculó el valor promedio, para algunos  $\tau$ .

Las rectas representan la distribución normal.

- YX04X001P3-QH01T001P3

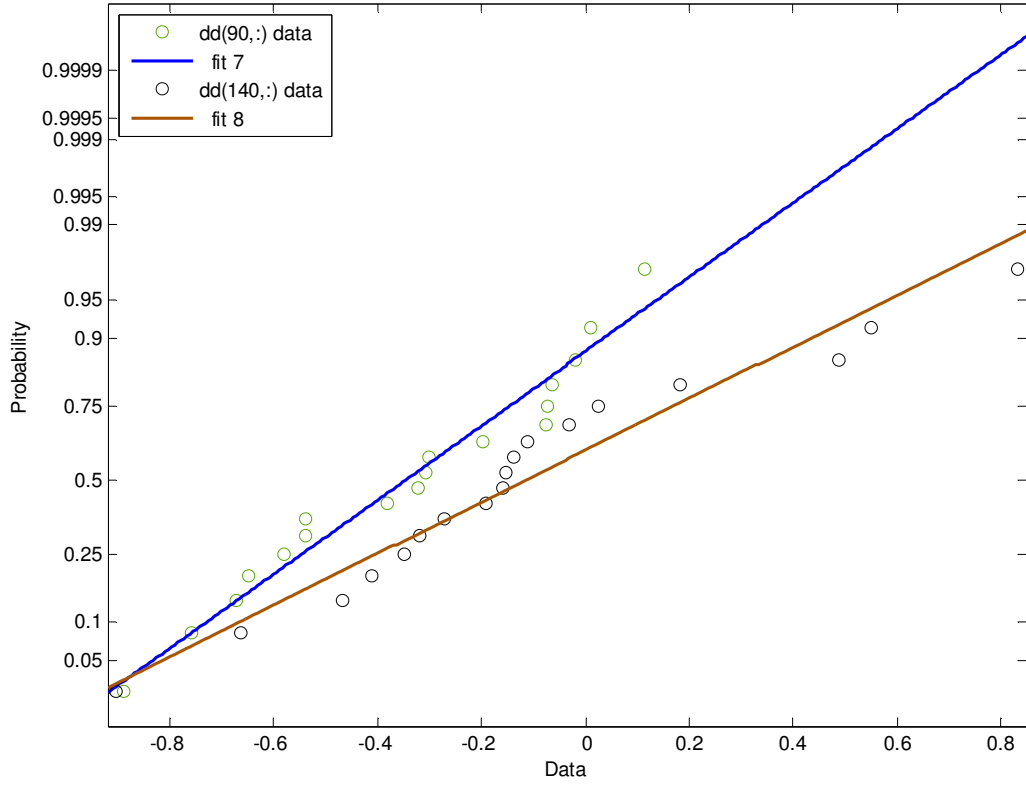


Figura 26 – Relación de los datos con la distribución normal

- SA12P024 – SA12T025

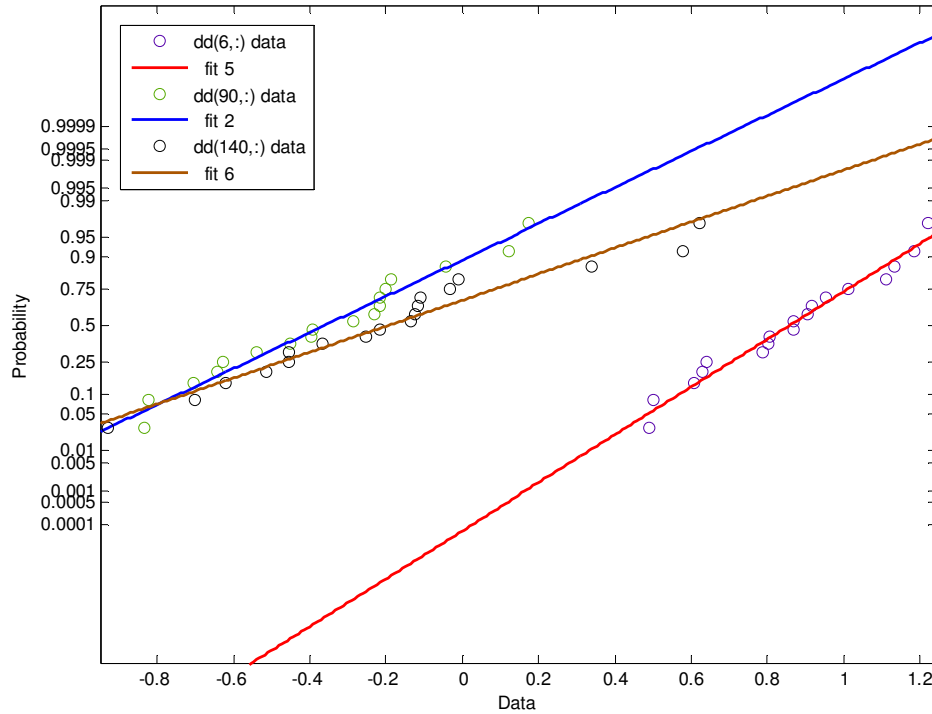


Figura 27 – Relación de los datos con la distribución normal

Del análisis de las tres figuras se puede concluir que los datos presentan en general una distribución normal.

Se representan a continuación los resultados de algunas funciones de correlación con los intervalos de confianza del 95%.

Los intervalos de confianza fueron calculados con la siguiente fórmula:

$$IC = \bar{x} \pm z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

donde

$z_{\alpha/2}$  es el valor crítico, 1,96 para IC= 95%

$\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$  es el error típico

- YX04X001P3 – SA12P024

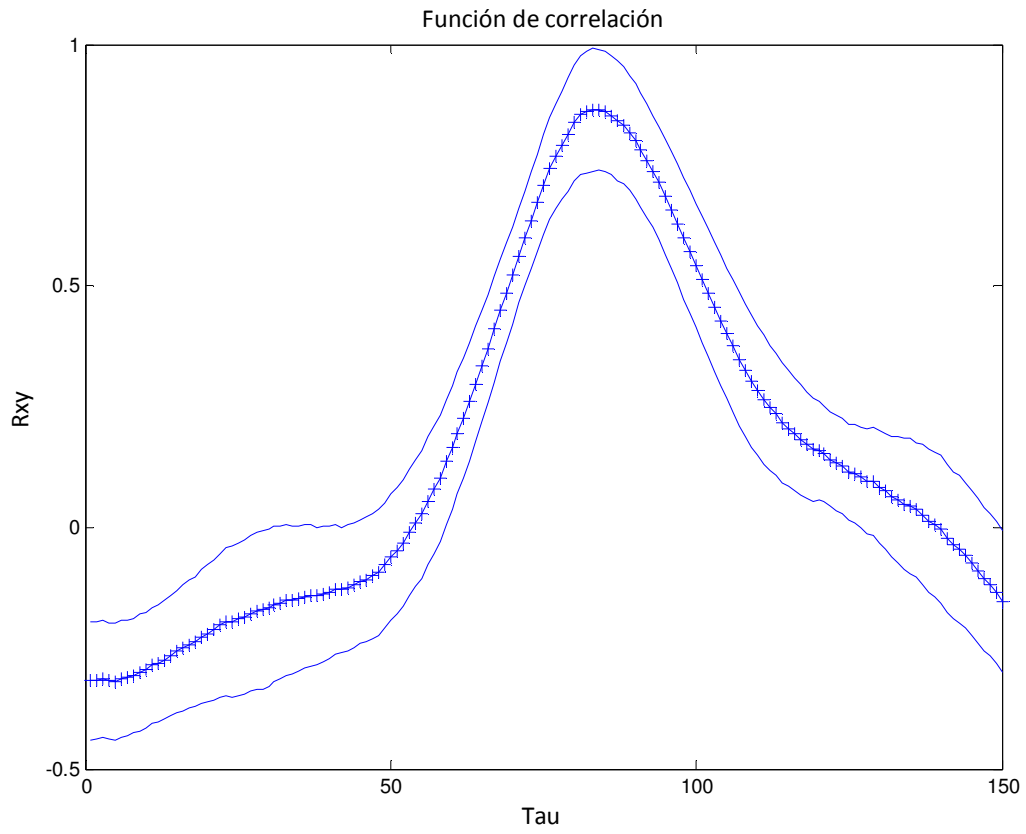


Figura 28 – Función de correlación con intervalo de confianza del 95%

- SA12P024 – SA12T025

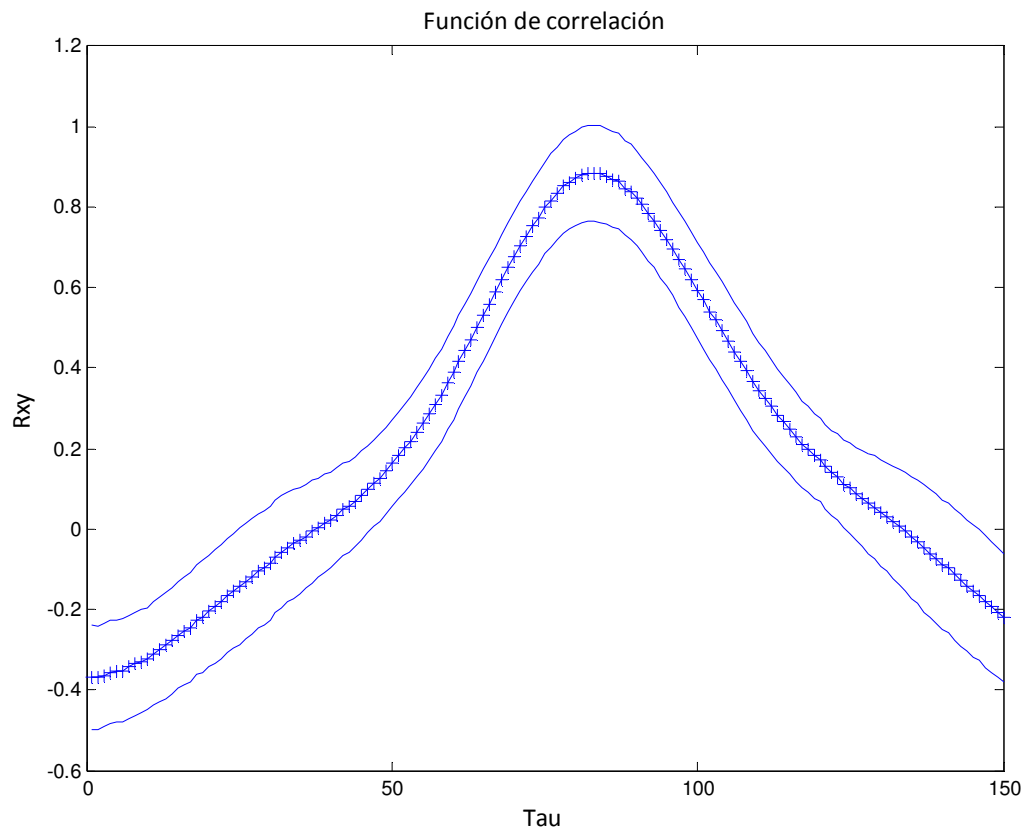


Figura 29– Función de correlación con intervalo de confianza del 95%

### 3.6 Modelos

Se realizaron para dos casos modelos semicuantitativos donde la relación funcional entre una variable y otra representa una distribución de tiempos de desfase entre la evolución de una y su influencia causal en la otra.

Estos modelos no pretenden ser una exacta representación de la realidad física.

En ambos modelos se usaron representaciones obtenidas teniendo en cuenta una distribución de tiempos de propagación de una señal hacia la otra. El término de máximo peso se corresponde con el valor de tau obtenido a partir del máximo de las figuras del punto 3.2.

La elaboración de un modelo de mayor realidad física será probablemente desarrollado a futuro.

El primer modelo se construyó para el par de señales YX04X001P3 – QH01T001P3 y el segundo para el par SA12P024 – SA12T025

#### 3.6.1 Modelo A

La ecuación del modelo se obtuvo por medio de ensayo y error. Es decir, el valor de los coeficientes se fue ajustando en función de la respuesta obtenida. En el Anexo 5 se presenta el código del programa en Matlab

$$B(i) = (B(i-1) + 0.01(A(i-1) + A(i-2)) + A(i-3) - 0.3B(i-1))0.5$$

donde

B representa la señal calculada con el modelo, en este caso QH01T001P3 y A la señal de flujo neutrónico YX04X001P3

Las siguientes figuras muestran las variables reales normalizadas y las variables calculadas con el modelo A:

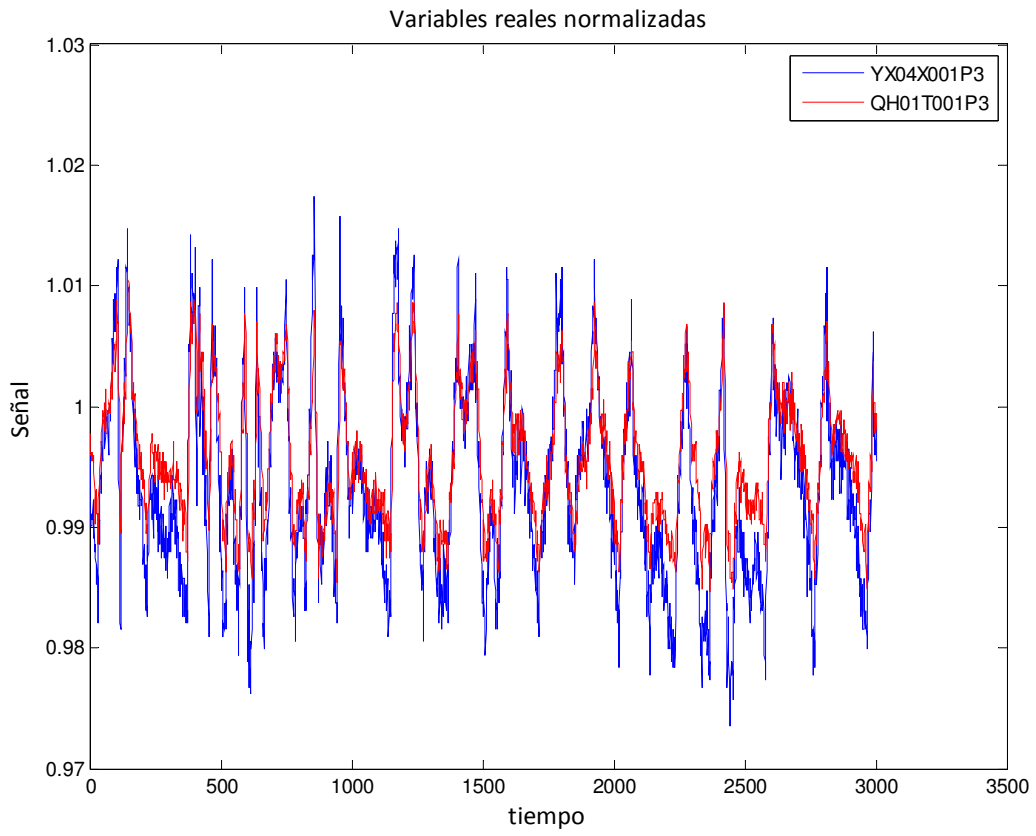


Figura 30 – Señales reales normalizadas

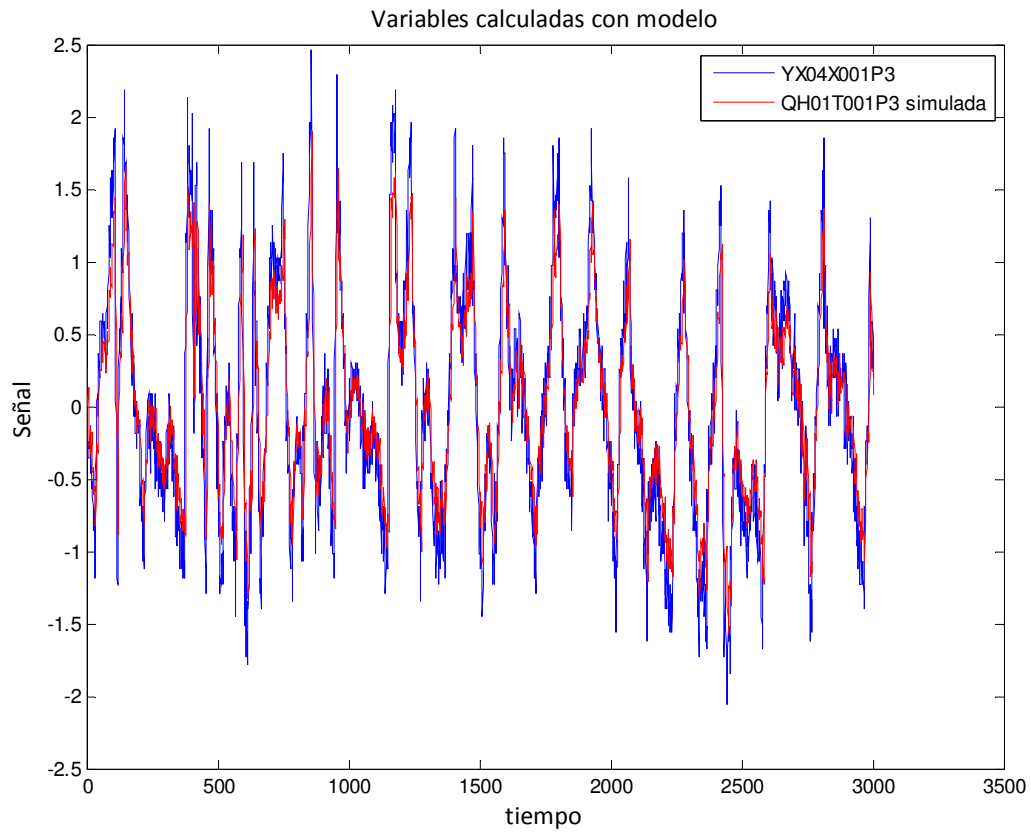


Figura 31 – Señales calculadas con modelo A

De comparar ambas figuras se puede concluir que el modelo que se eligió resulta representativo.

Esto se puede corroborar mediante la función de correlación entre la señal real de flujo neutrónico, y la simulada de temperatura del primario.

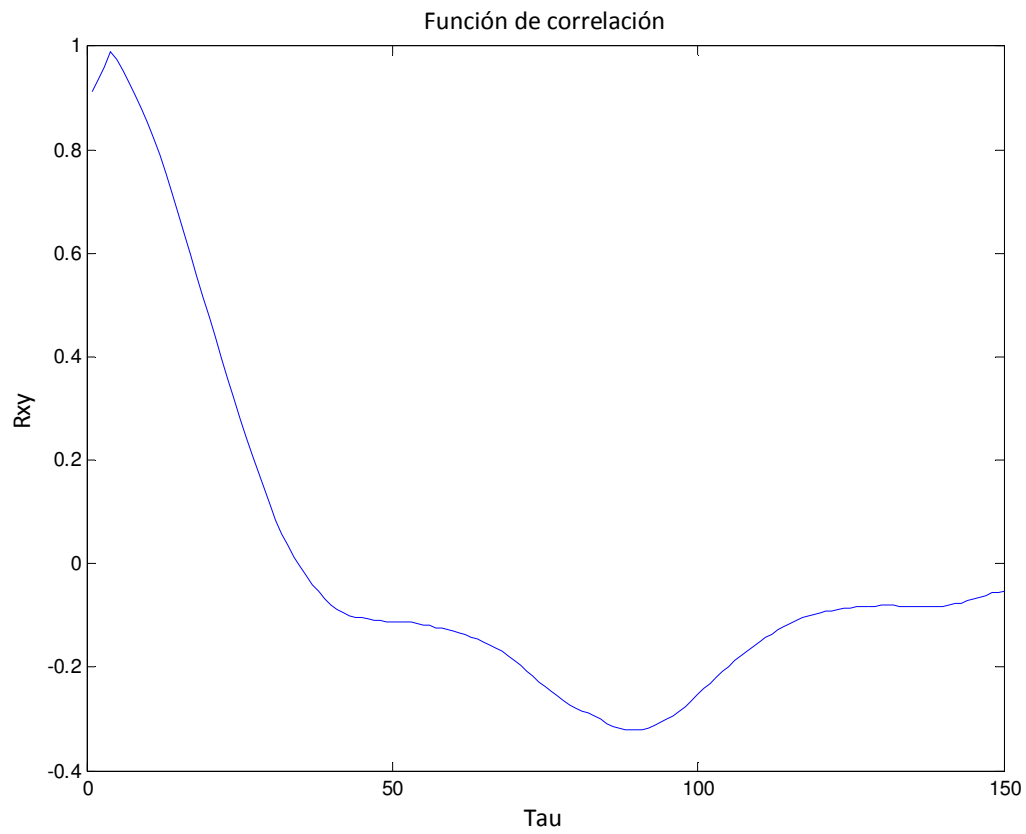


Figura 32 – Función de correlación entre YX04X001P3 y QH01T001P3 simulada

Al superponer esta función con la función de correlación de las señales reales se ve lo siguiente:

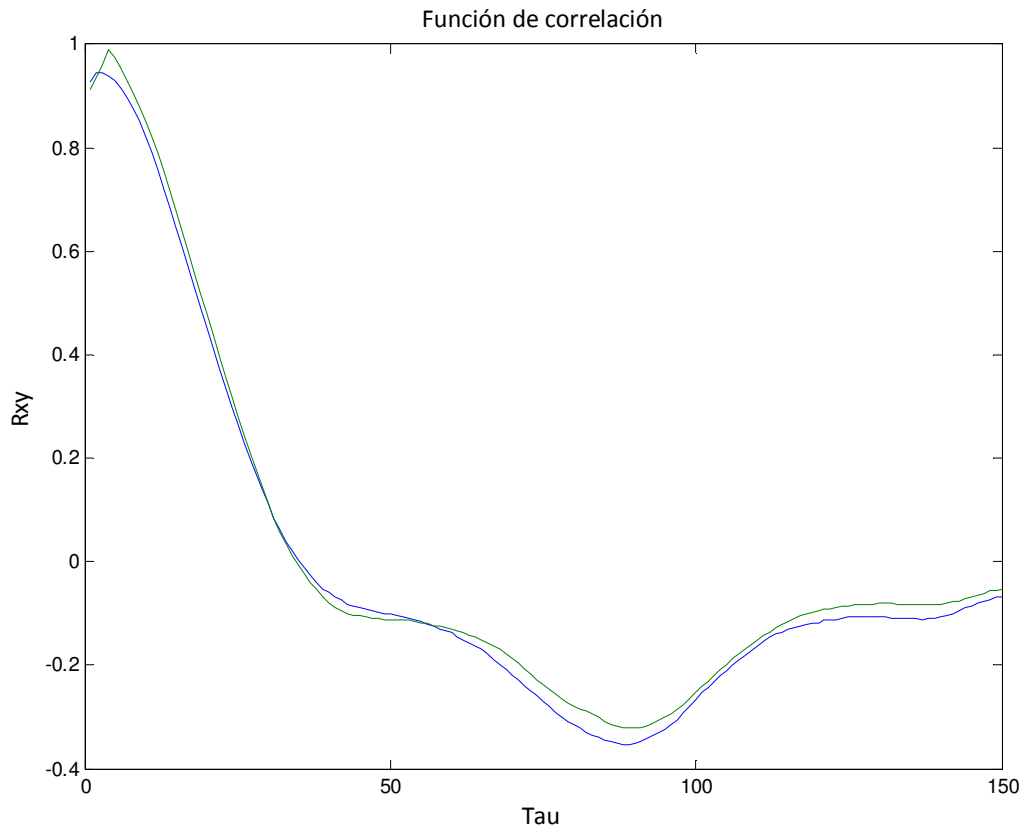


Figura 33 – Funciones de correlación superpuestas para el caso real y el modelado

### 3.6.2 Modelo B

La ecuación de este modelo también se obtuvo por medio de ensayo y error. En el Anexo 6 se presenta el código del programa en Matlab.

$$BL(i)=0.001*AL(i-5)+0.05*AL(i-6)+0.1*AL(i-7)+0.2*AL(i-8)+0.2*AL(i-9)+0.2*AL(i-10)+0.1*AL(i-11)+0.05*AL(i-12)+0.001*AL(i-13);$$

donde

B representa la señal calculada con el modelo, en este caso SA12T025  
y A la señal SA12P024

Cabe destacar que se le coloca un mayor peso al término que está relacionado con el máximo de la función de correlación, alrededor de los puntos 8 y 9 (32 segundos de desfase).

Las siguientes figuras muestran las variables reales normalizadas y las variables calculadas con el modelo B

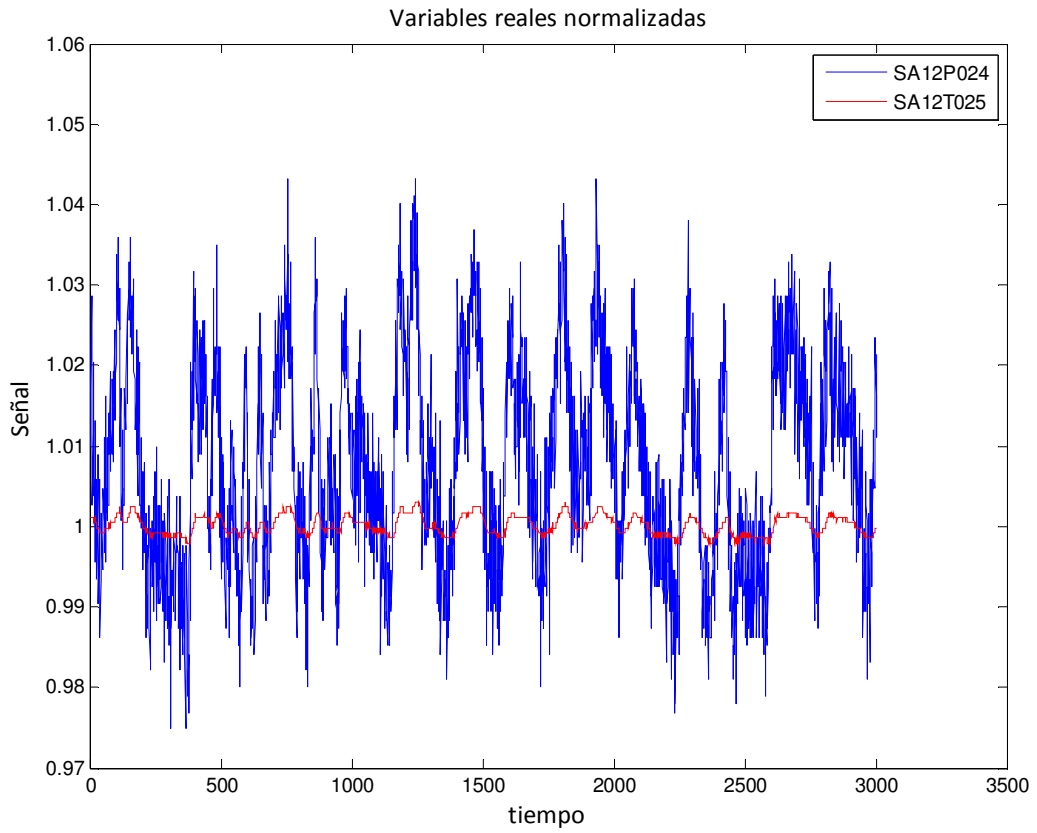


Figura 34 – Señales reales normalizadas

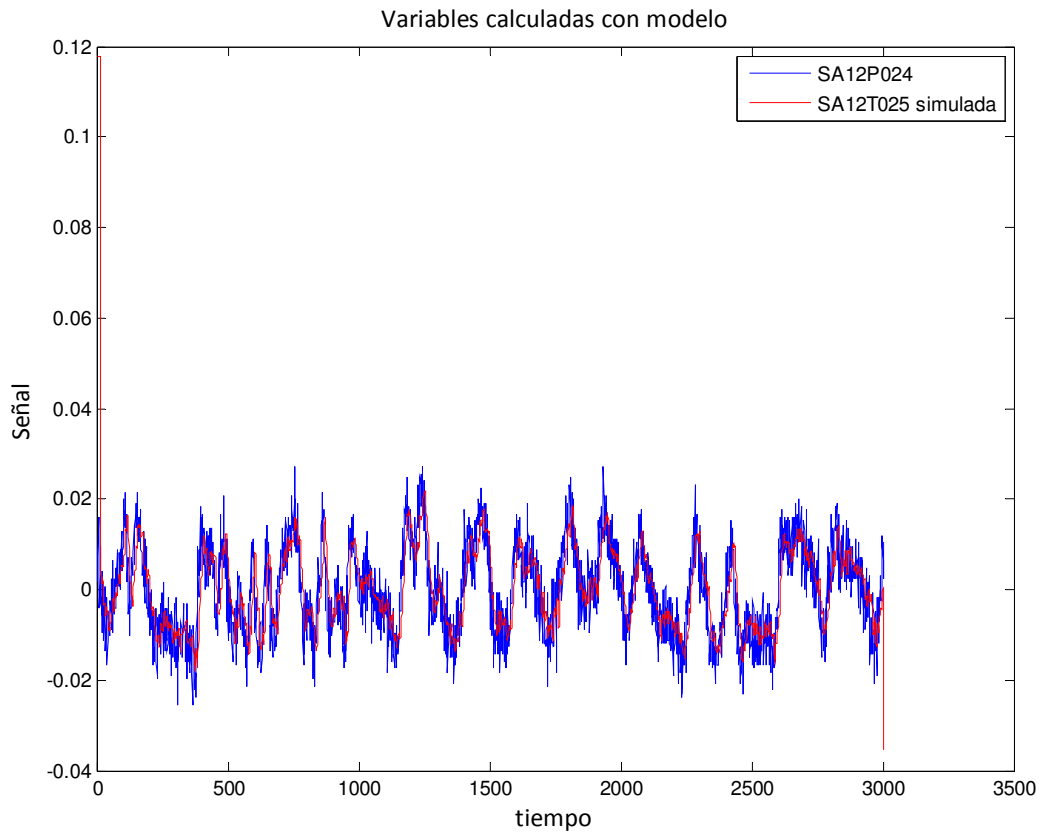


Figura 35 – Señales calculadas con modelo B

Al igual que en el punto anterior, se calcula la función de correlación para la señal calculada con el modelo.

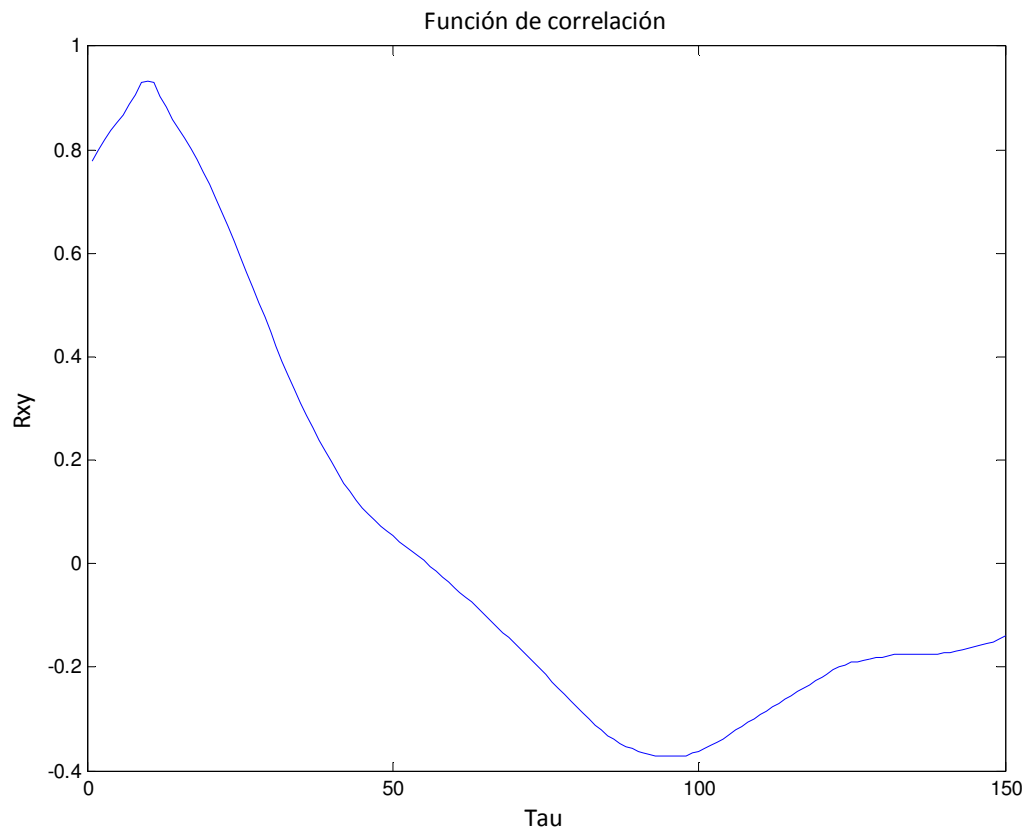


Figura 36 – Función de correlación entre SA12P024 y SA12T025 simulada

Y a continuación se superpone esta función, con la calculada para las variables reales.

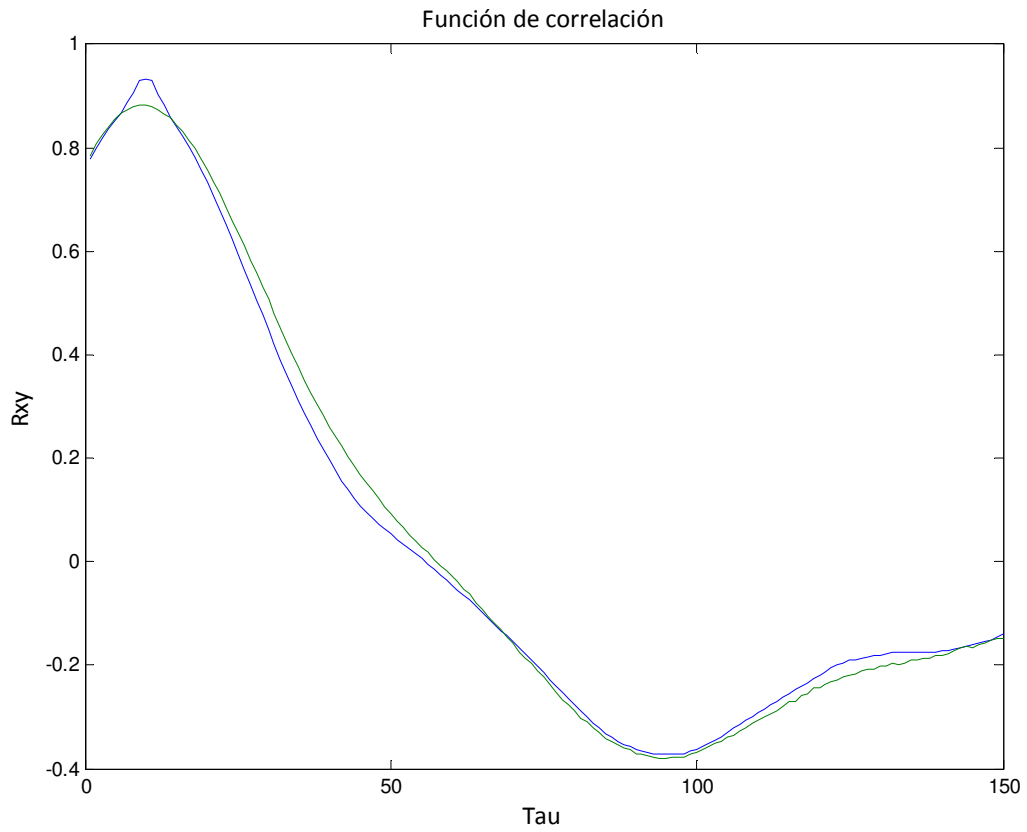


Figura 37 – Función de correlación entre SA12P024 y SA12T025

Si bien las funciones de correlación no se superponen, el modelo se acerca bastante al caso real.

#### 4. CONCLUSIONES

A partir del análisis de las funciones de correlación para diversos pares de señales se obtuvieron una serie de resultados.

Mediante el análisis de máximos y mínimos de estas funciones se consiguió hallar información de algunos procesos que ocurren en la CNA I. A continuación se presenta una tabla con tiempos característicos correspondientes a diferentes procesos.

Proceso	Tiempo característico (segundos)
Retardo de PT100 en flujo bifásico	30
Velocidad de transferencia de calor desde la vaina de combustible hacia el medio refrigerante y posterior transmisión a la termocupla	8
Capacidad de almacenamiento de energía del generador de vapor – cañerías - turbina	16

Además se verificó que existe una relación entre cadenas de señales, dado que el retardo total de una cadena se puede expresar como la suma aproximada de los retardos de los pares de señales que la componen. Este hecho le da sustento a la forma en la que fueron interpretados los resultados.

Mediante la implementación de modelos se verificó que el tiempo que se obtiene a partir de los gráficos es efectivamente el tiempo de retardo, dado que al modelar las señales con los tiempos leídos de las figuras, se reproduce el comportamiento real de la señal con un alto grado de fidelidad.

Queda pendiente para el corto plazo ajustar los mismos, para lograr mejores resultados.

Con todos los datos obtenidos se planea realizar la implementación en línea de algoritmos tales como aquellos que calculen la derivada de la función de correlación con el fin de verificar los tiempos de retardo y con eso realizar interpretaciones acerca de los procesos, o de la confiabilidad de la instrumentación.

Para este último punto, por ejemplo ya se puede contar con el tiempo característico de retardo de una PT100 en flujo bifásico, con el fin de detectar fallas en instrumentación que esté colocada en líneas similares a la analizada.

Al comparar la función de correlación cruzada entre dos señales de la misma índole, debería dar como resultado una función similar a la de autocorrelación, ésto si la instrumentación no presenta fallas.

La próxima implementación de una computadora con una frecuencia de muestreo de 1 Hz permitirá mejorar sustantivamente los resultados.

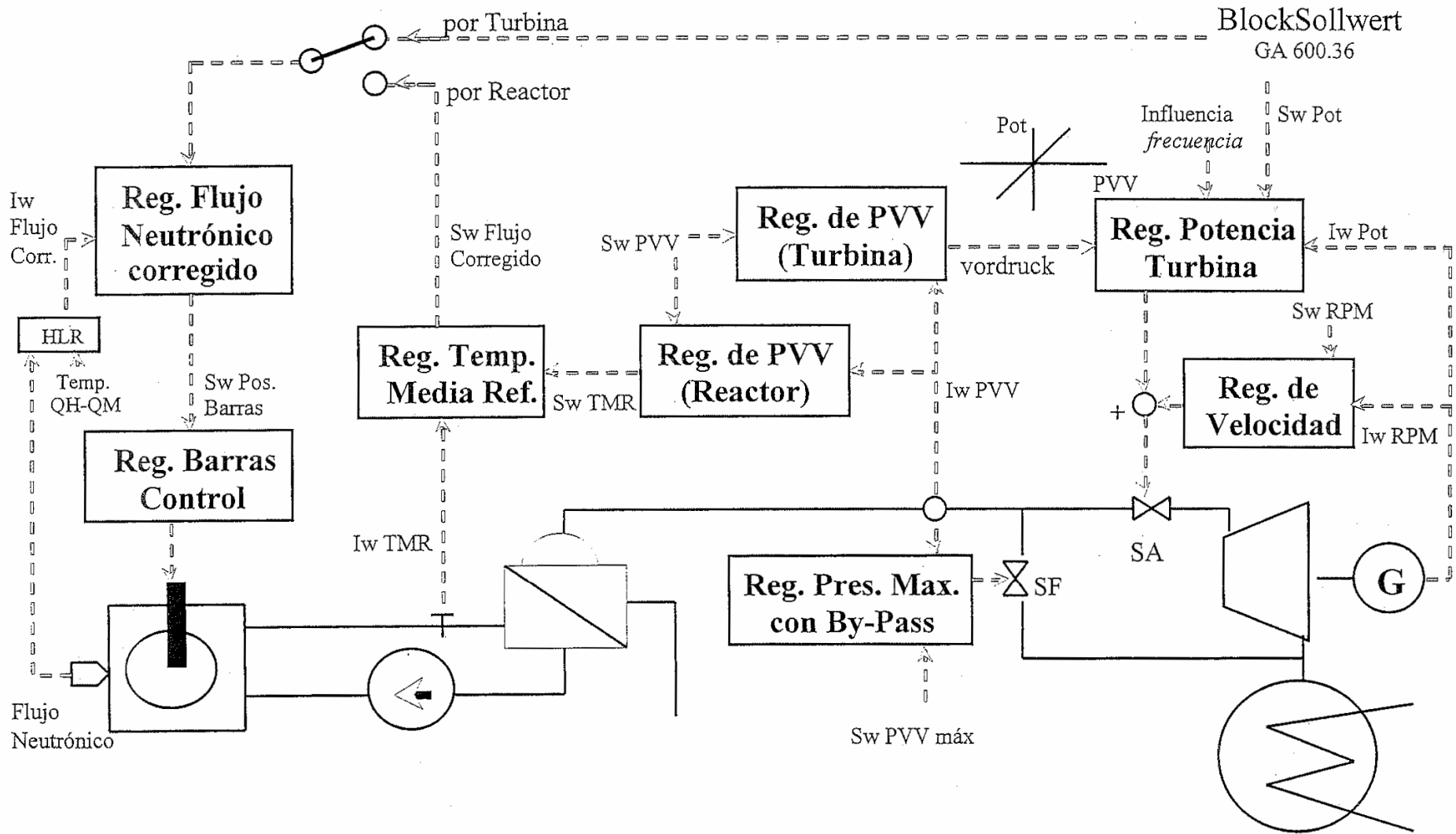
## 5. REFERENCIAS

- “Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis” Julius S. Bendat and Allan G. Piersol
- “Regulación de Potencia del Reactor y Turbina” – Ing. Sanda, A.
- Diagrama de flujo de sistemas QH-QM (M36-001)
- Diagrama de flujo Sistema SA (M43-055)

# ANEXOS

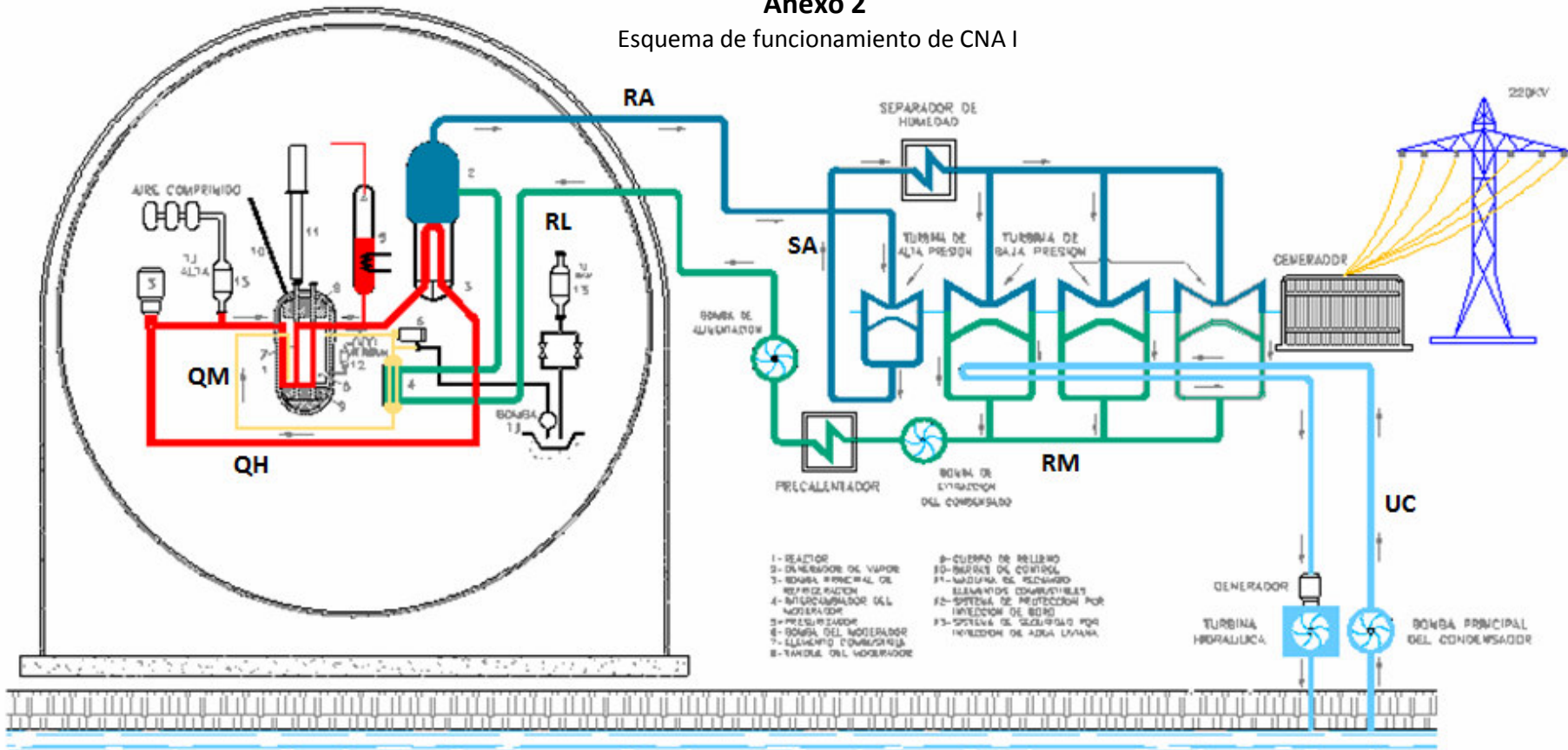
## Anexo 1

Regulación de potencia en CNA I – Seguimiento de Carga por Turbina



## Anexo 2

Esquema de funcionamiento de CNA I



QH – Sistema primario  
 QM – Sistema moderador  
 RL – Sistema de agua de alimentación  
 RA – Sistema de vapor vivo

SA – Vapor de ingreso a turbina  
 RM – Sistema de agua de condensado  
 UC – Sistema de agua de río

### Anexo 3

#### Gráficos temporales de señales de Visual Data (06/01/12)

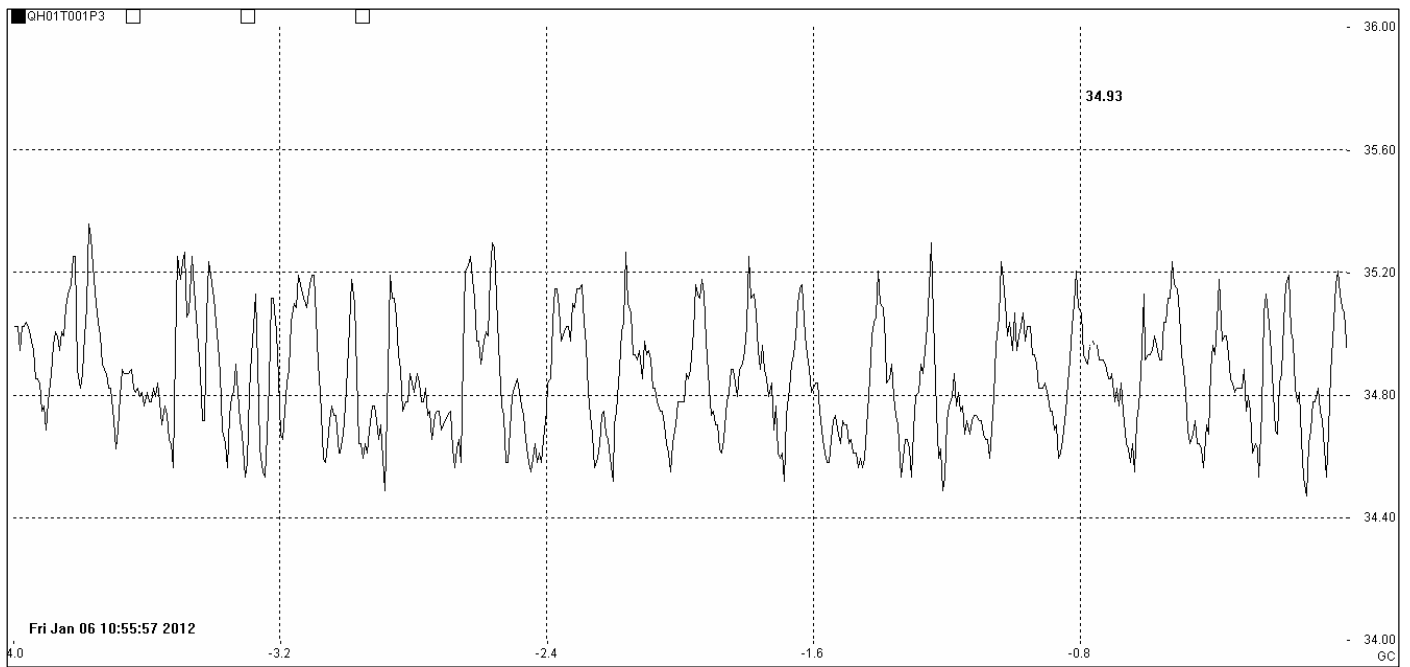


Figura 1- QH01T001P3

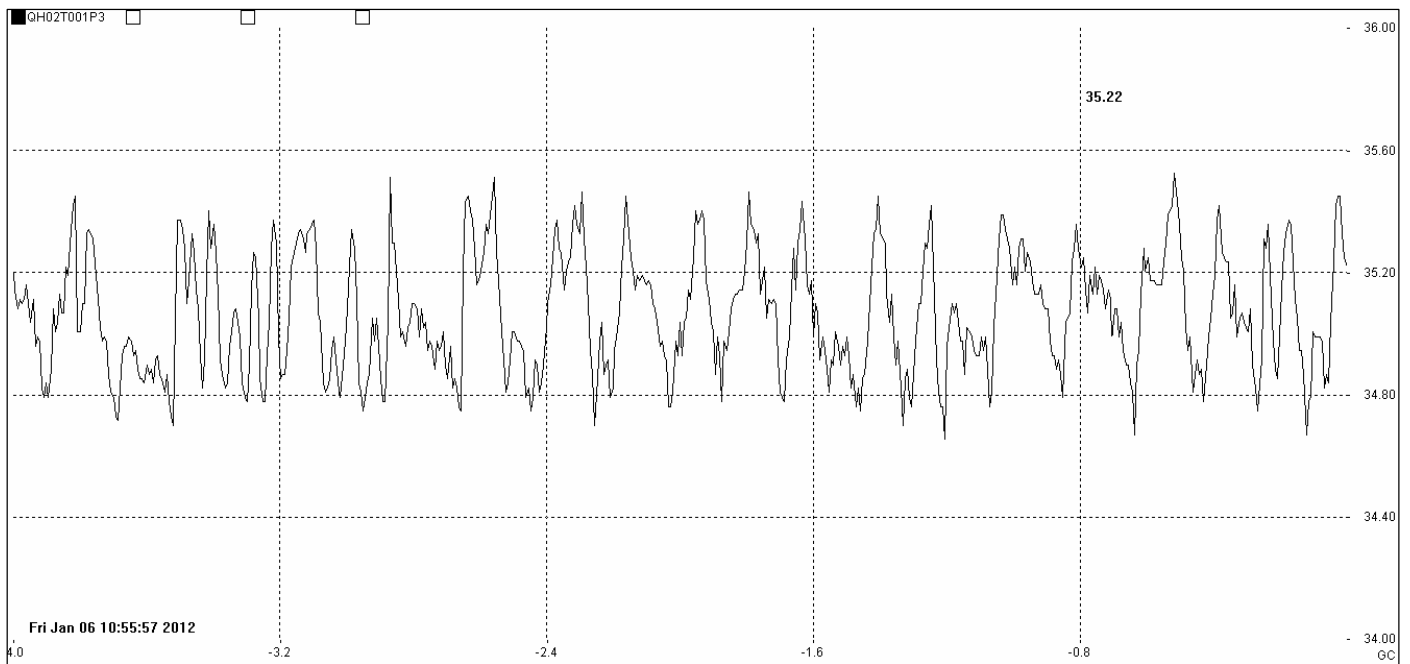


Figura 2- QH02T001P3

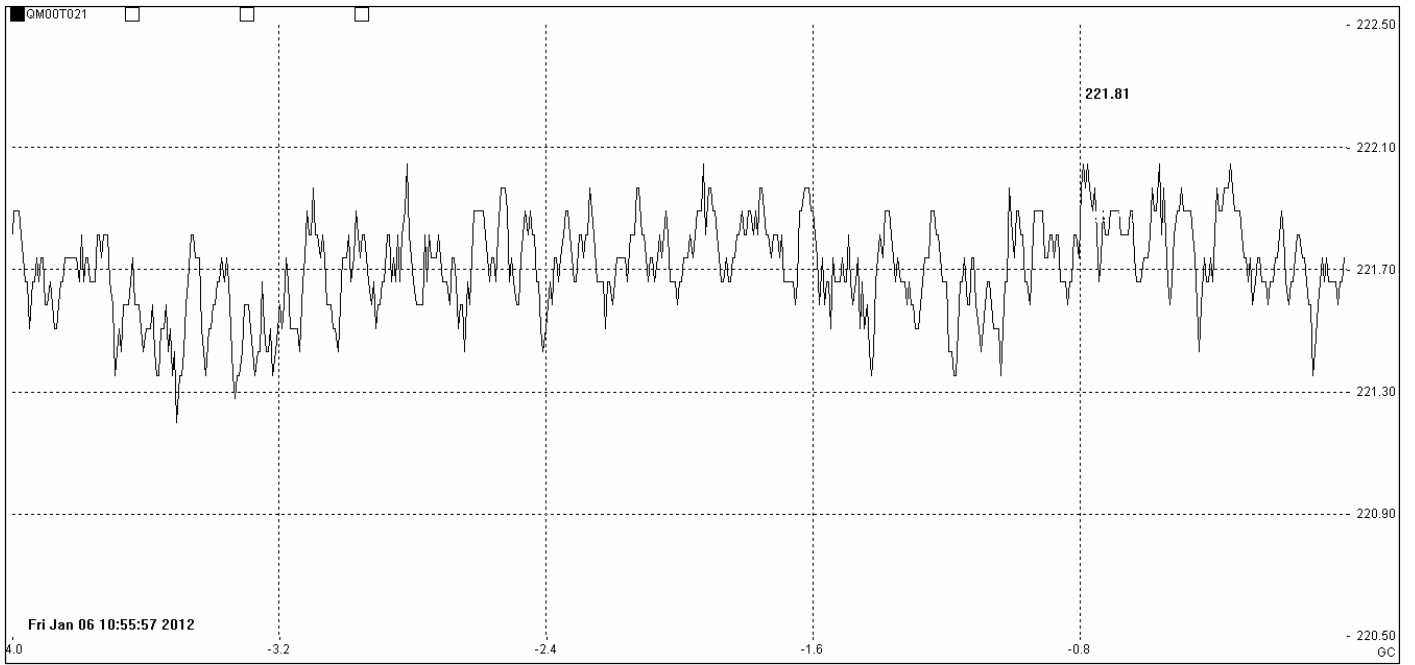


Figura 3 – QM00T021

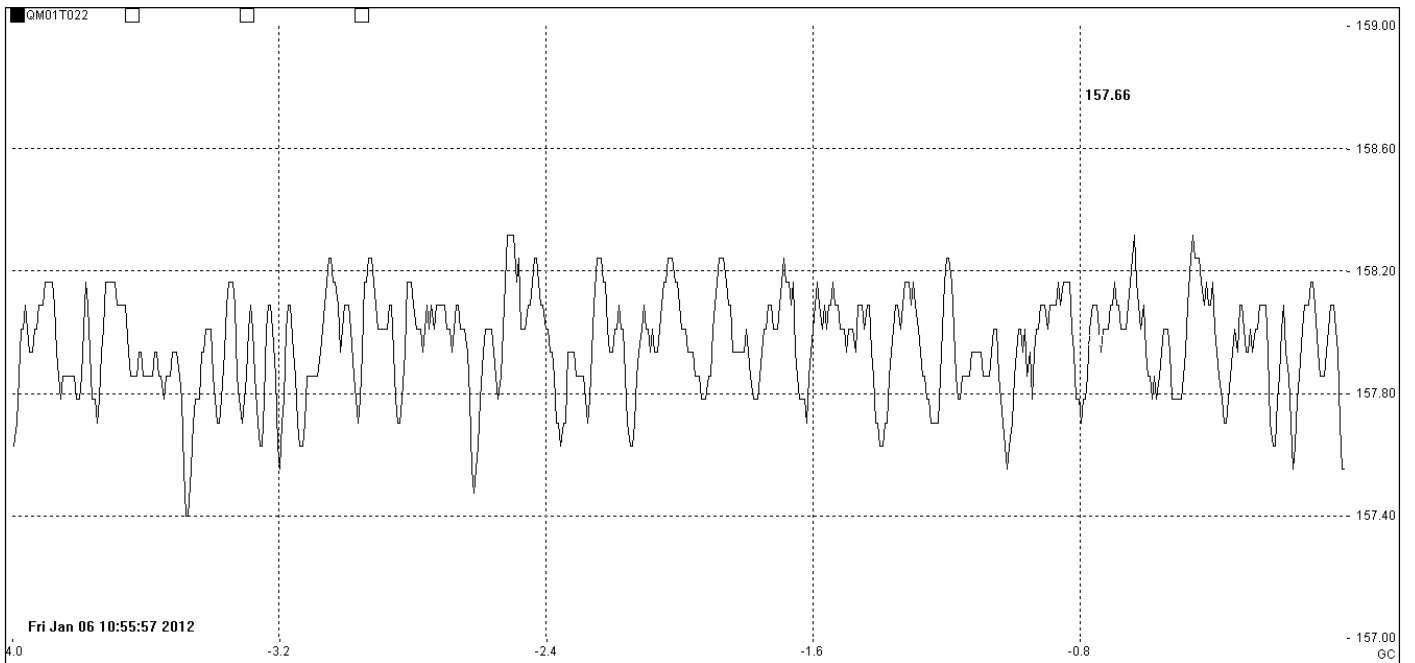


Figura 4 – QM01T022

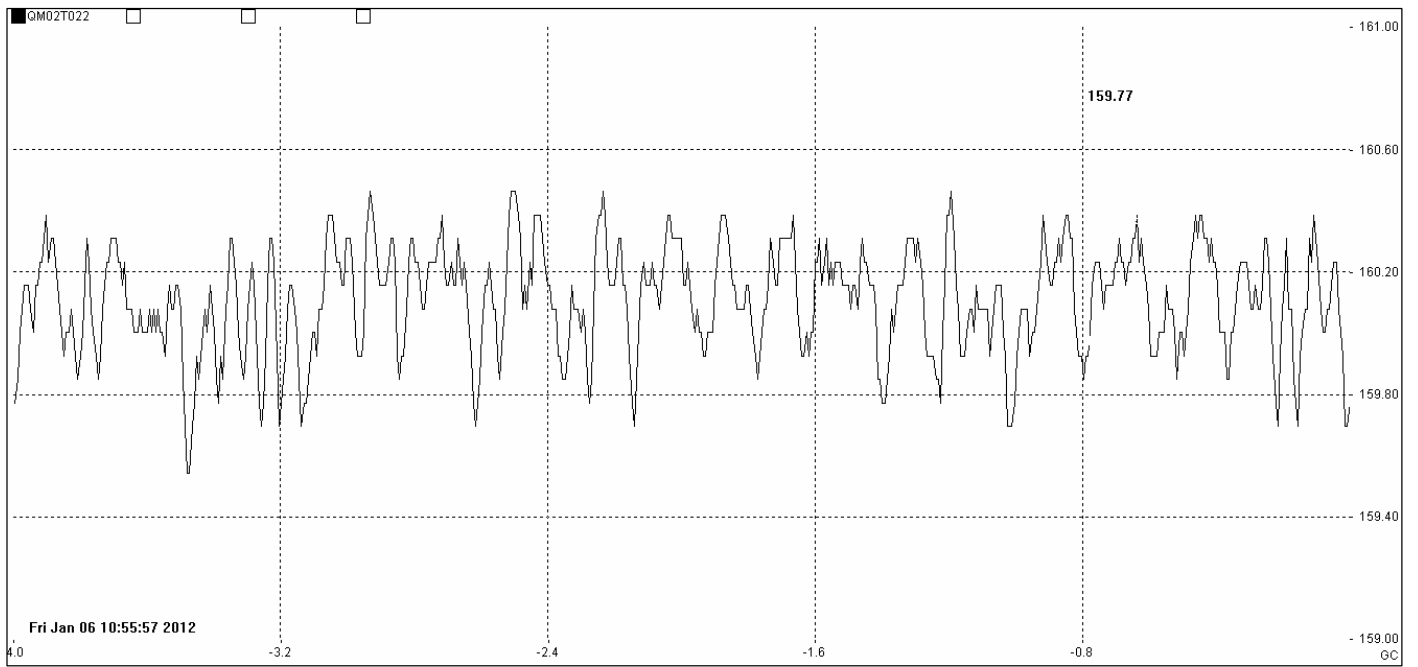


Figura 5 – QM02T022

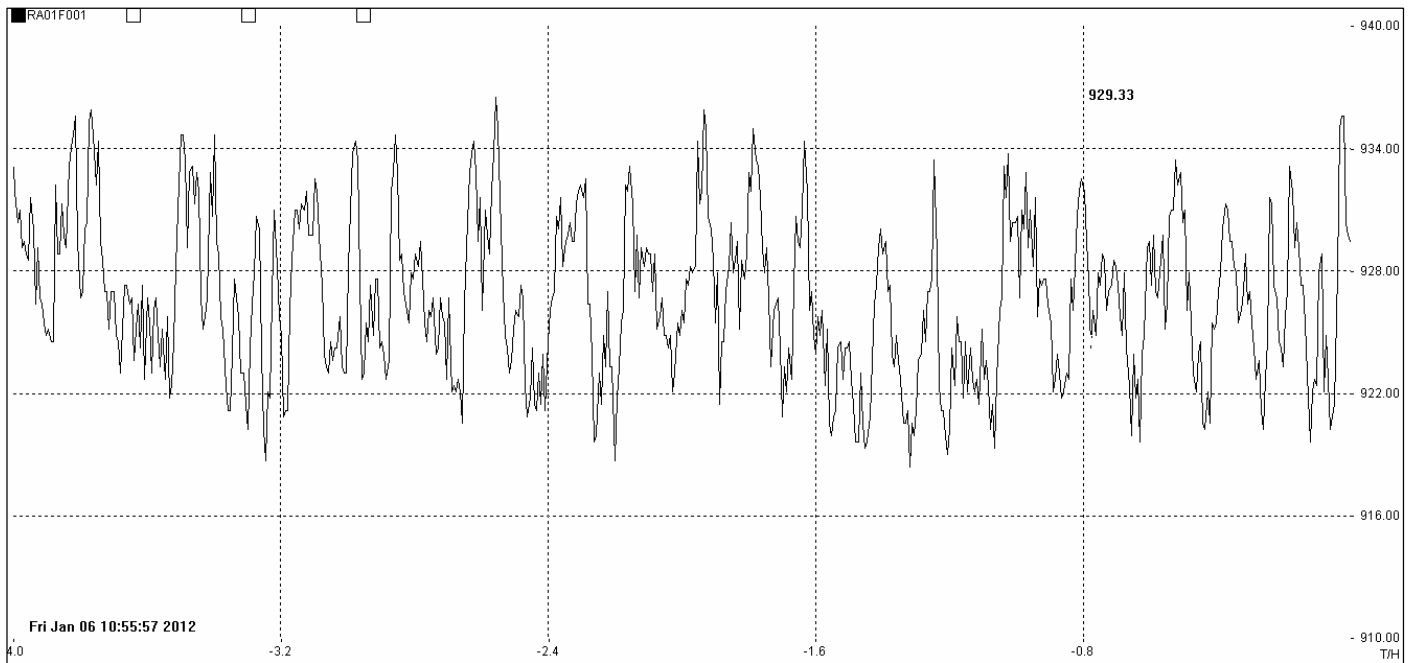


Figura 6 – RA01F001

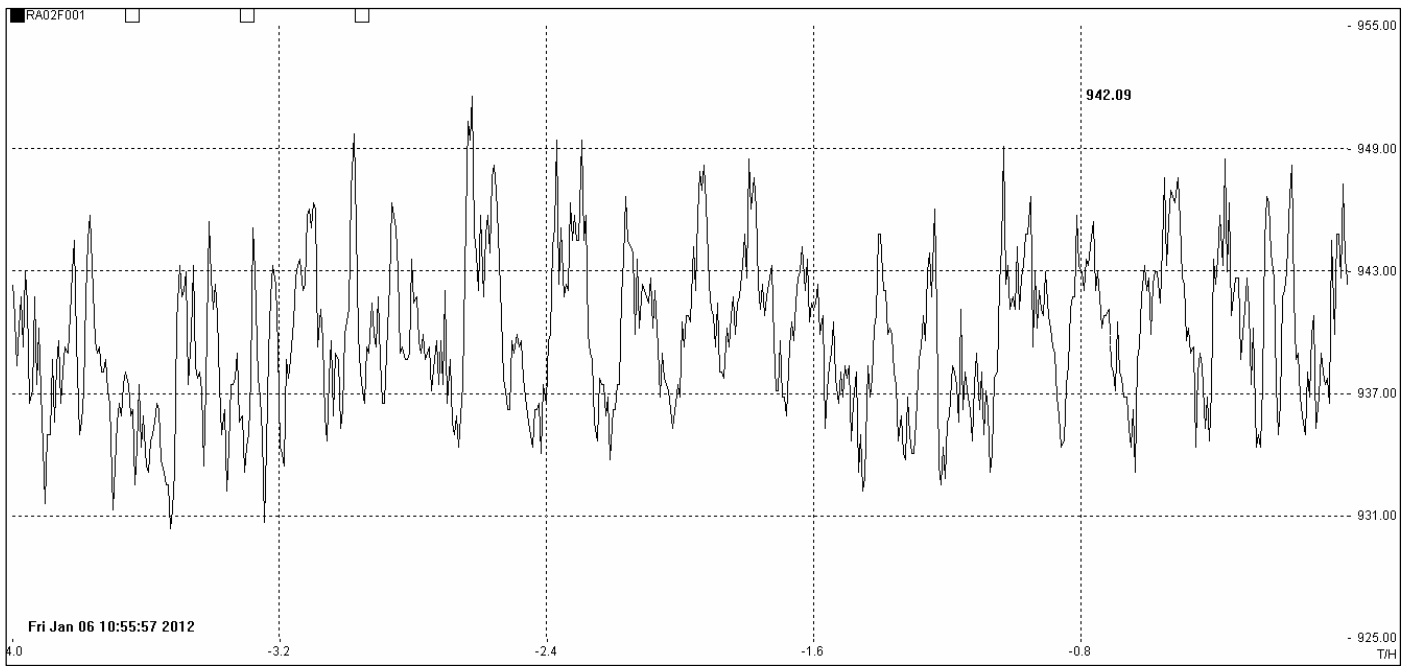


Figura 7 – RA02F001

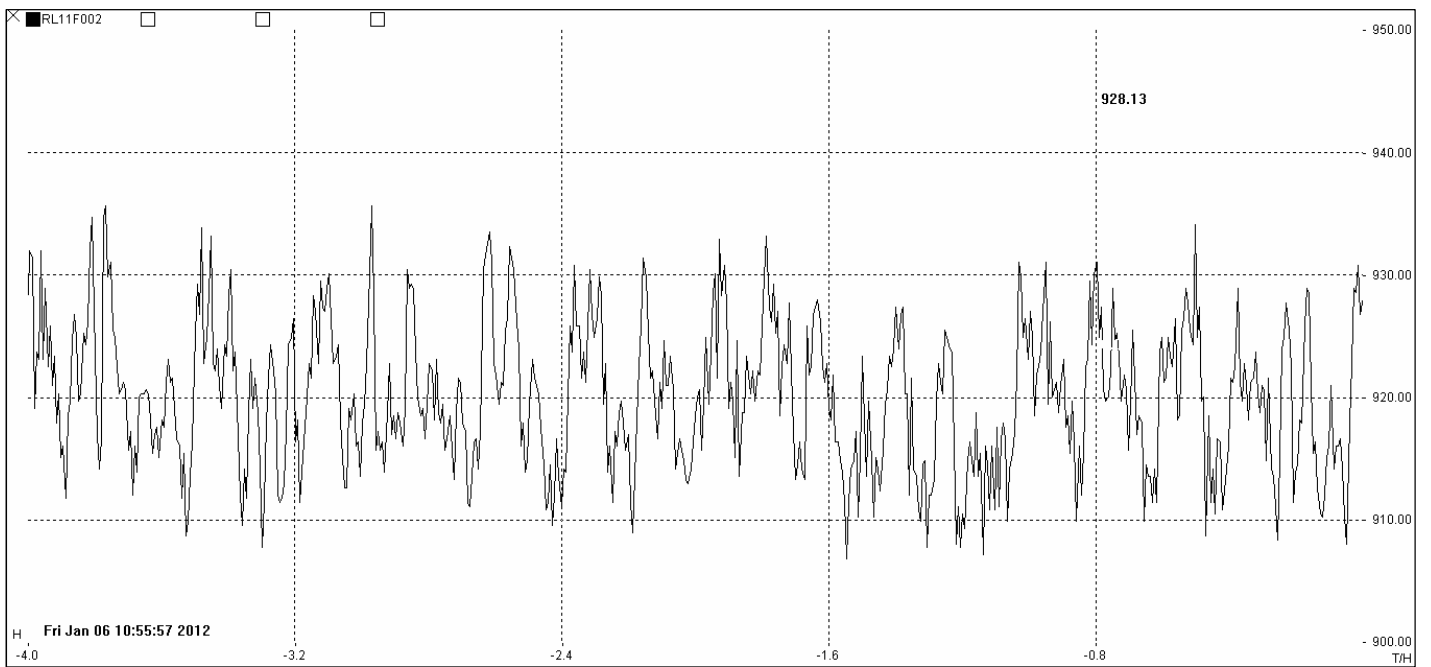


Figura 8 – RL11F002

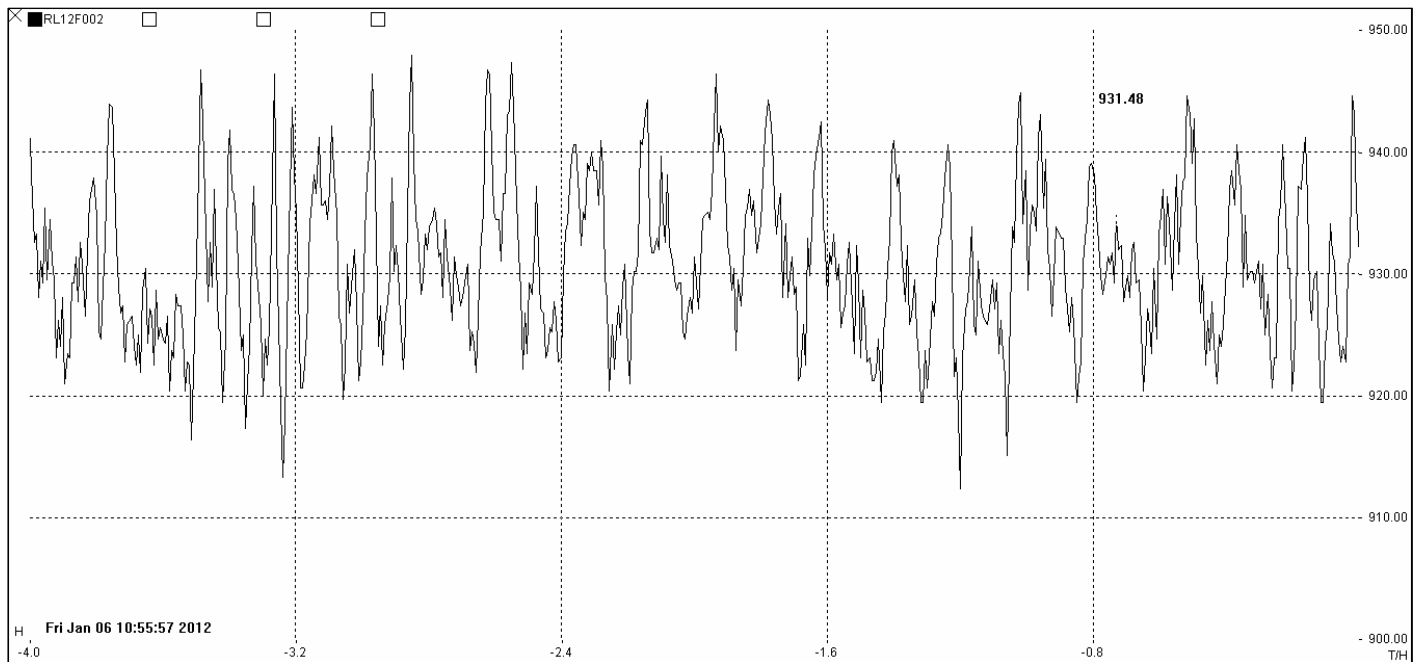


Figura 9 – RL12F002

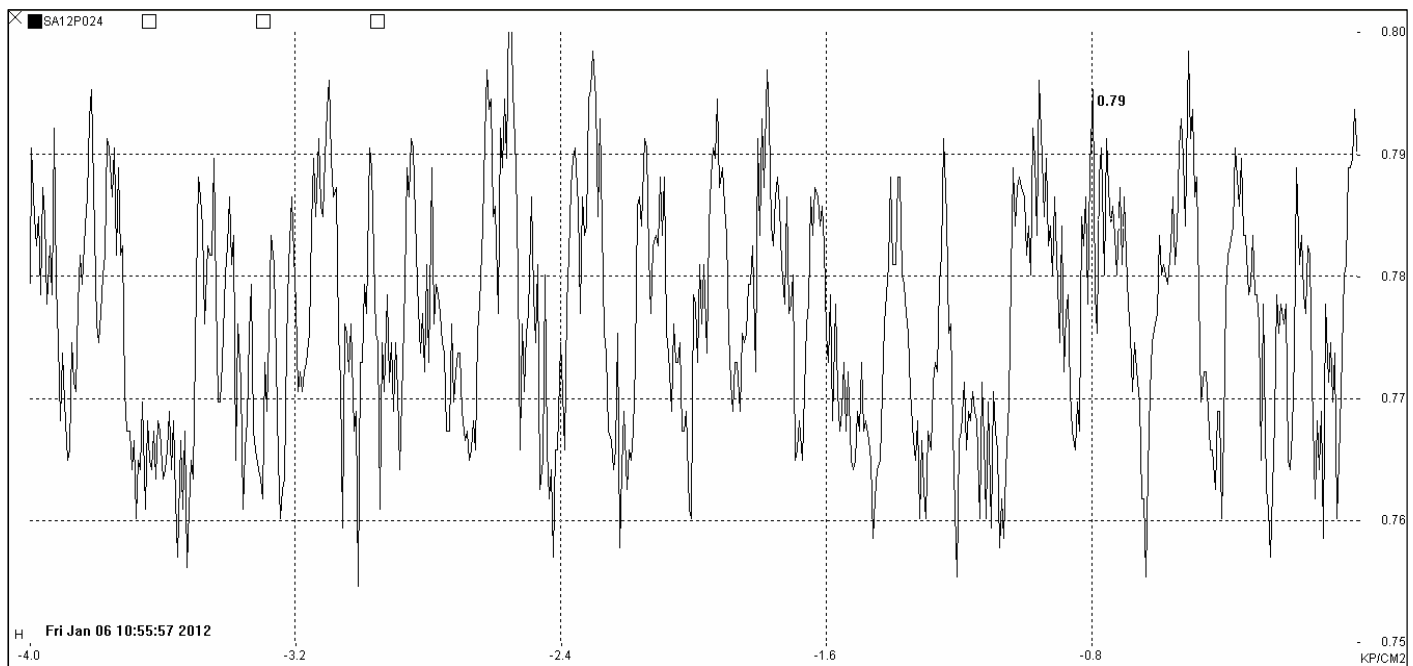


Figura 10 – SA12P024

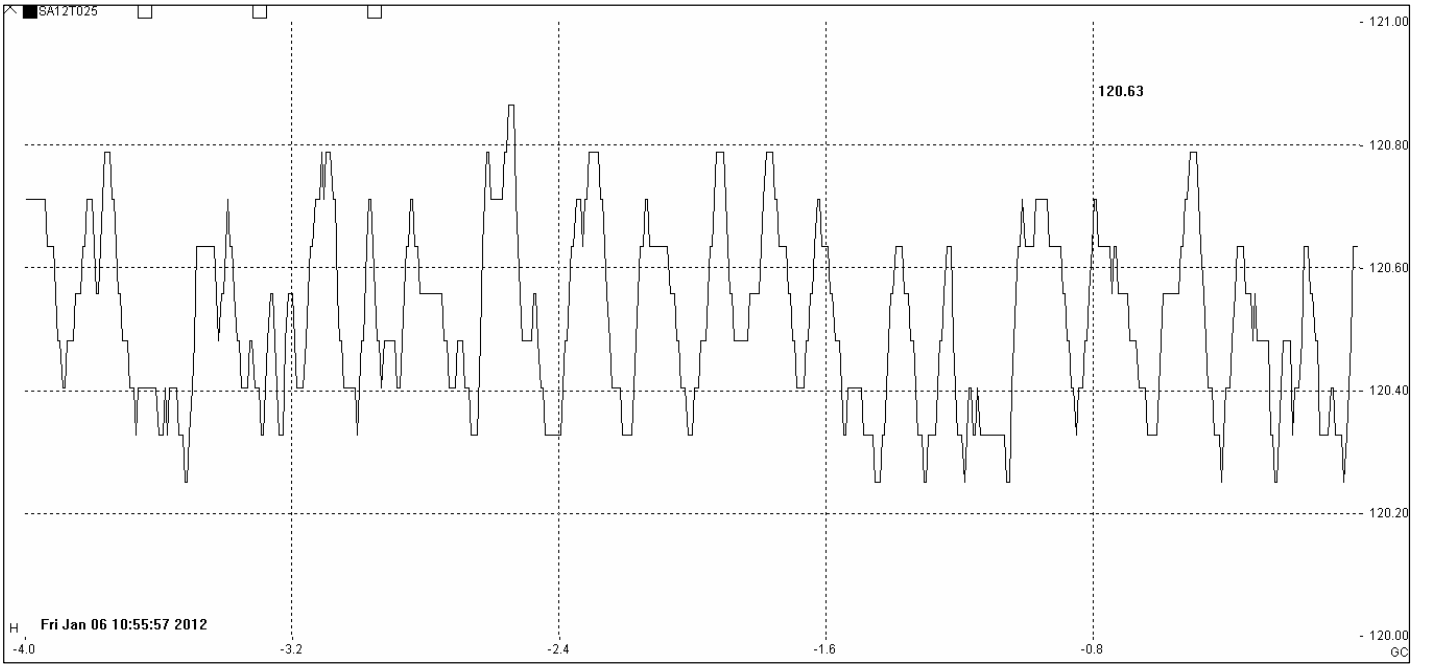


Figura 11 – SA12T025

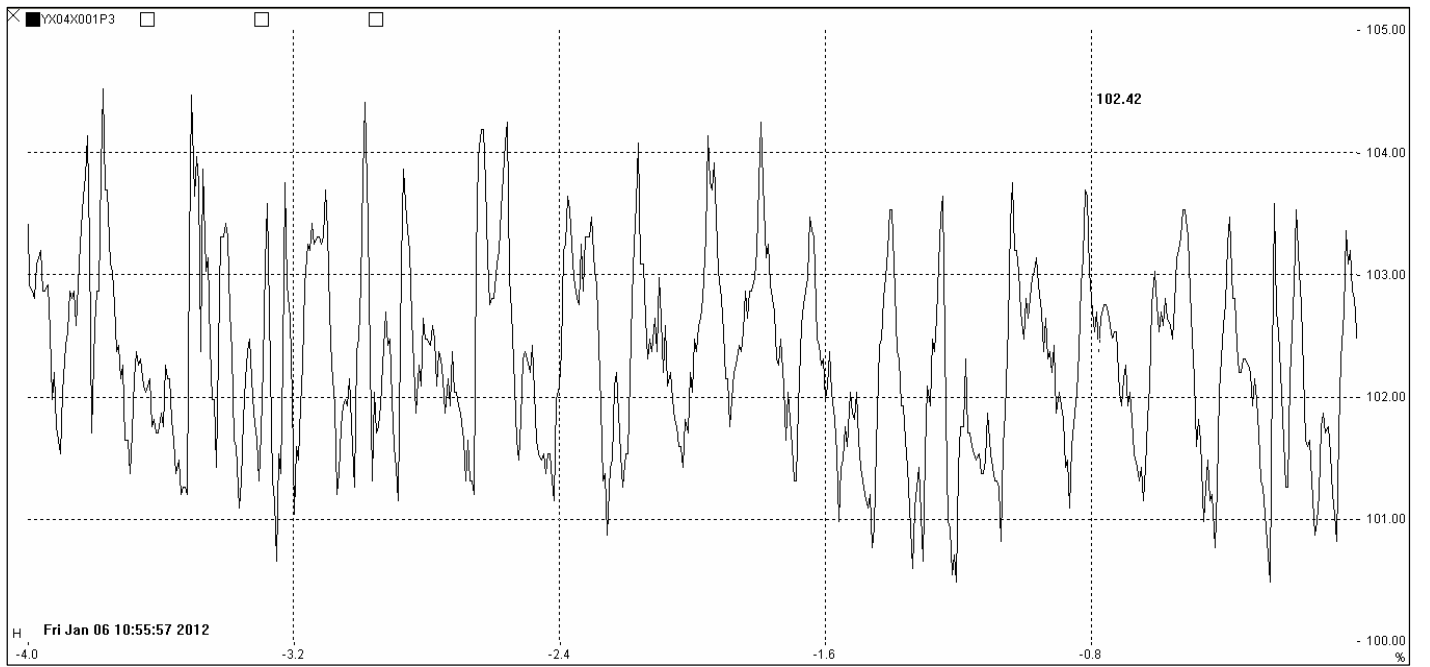


Figura 12 – YX04X001P3

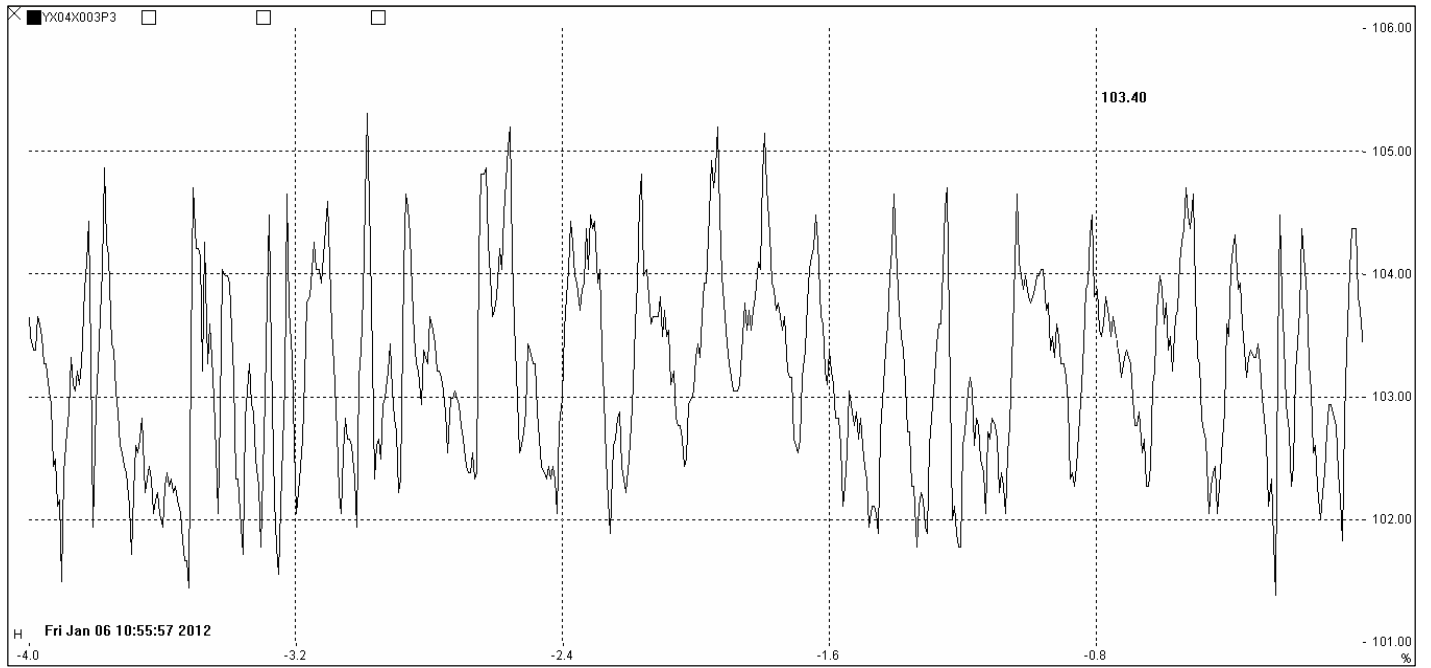


Figura 13 – YX04X003P3

# Gráficos temporales de señales de Visual Data (02/11/11)

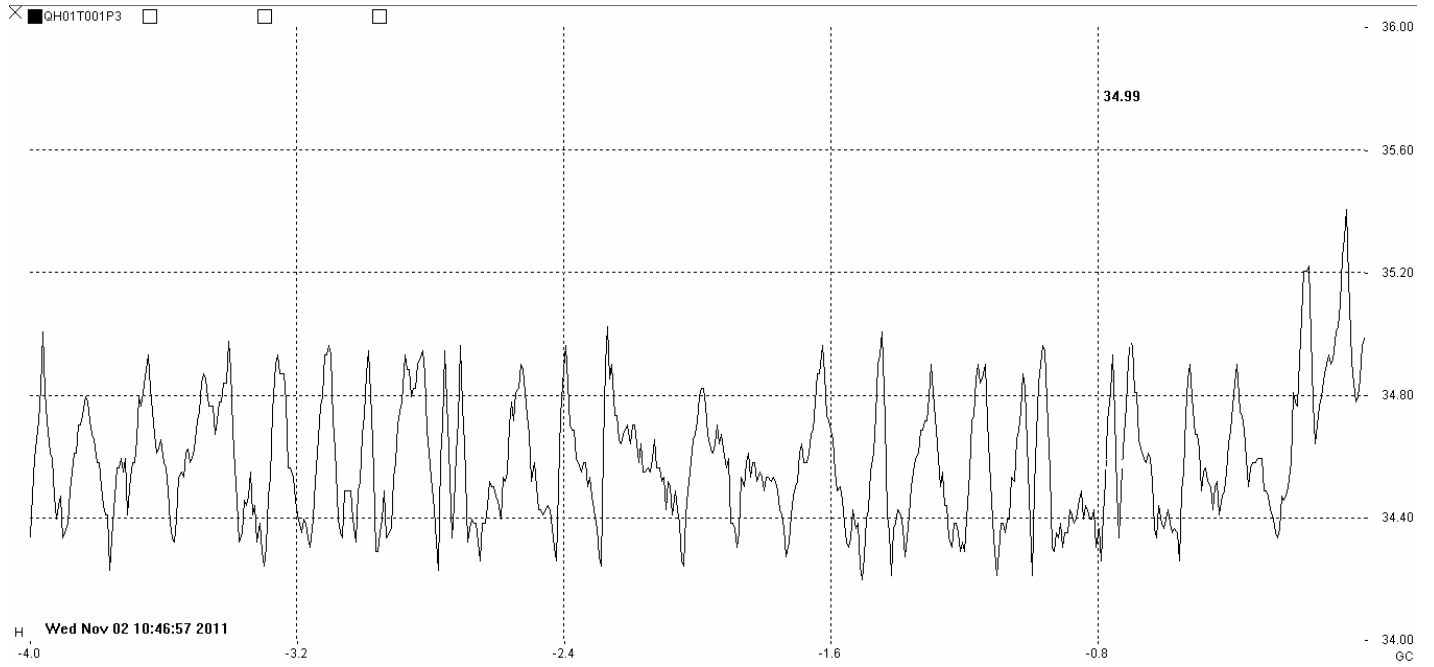


Figura 14 – QH01T001P3

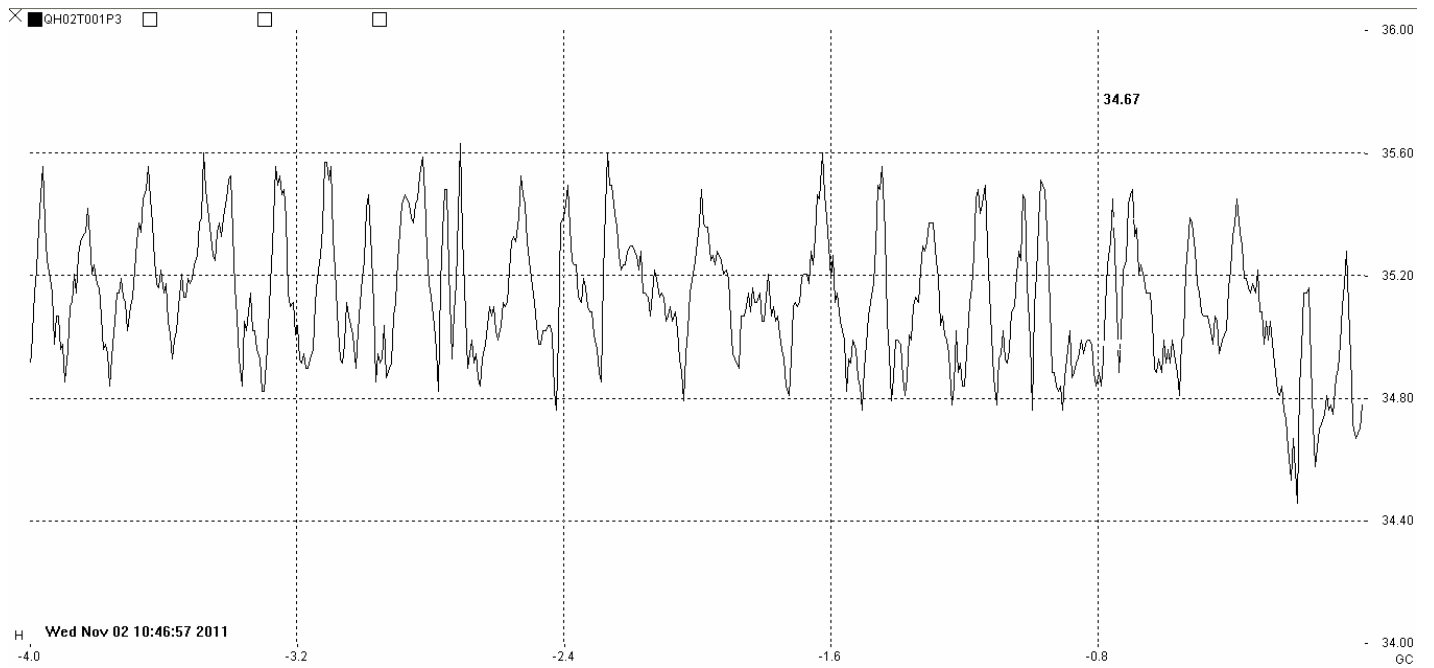


Figura 15 – QH02T001P3

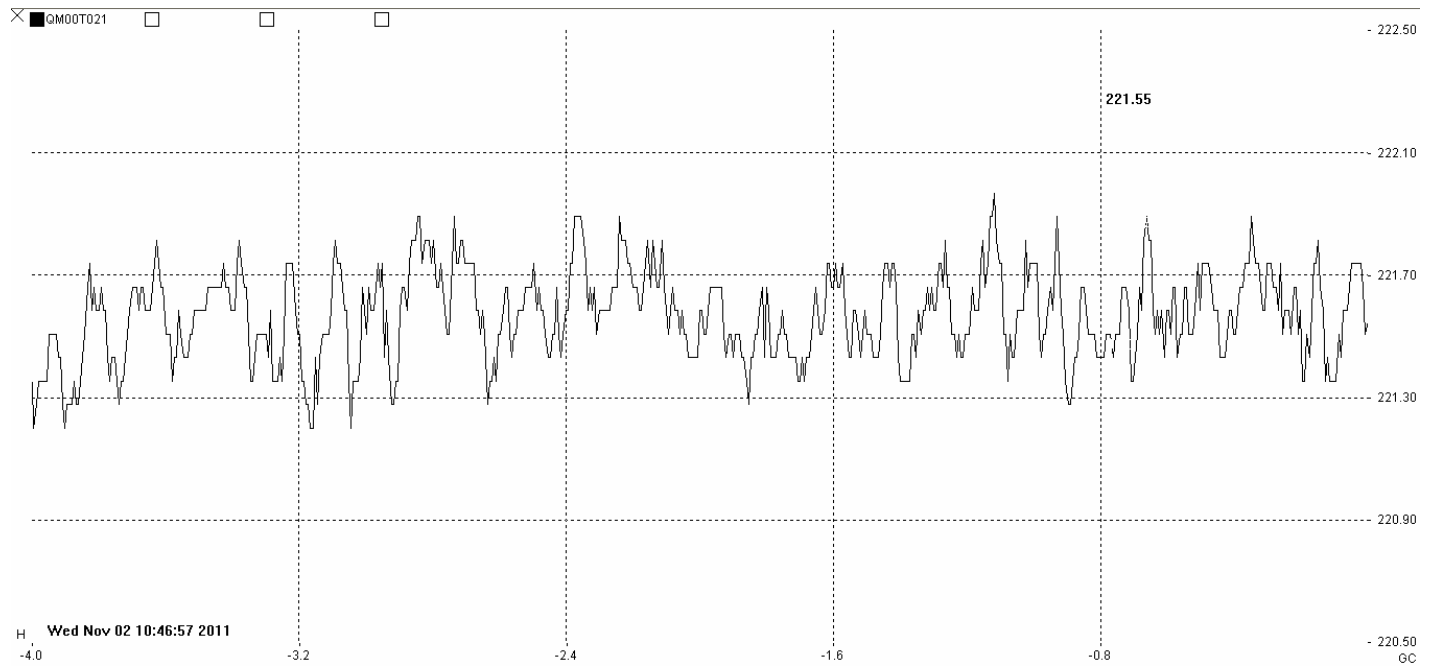


Figura 16 – QM00T021

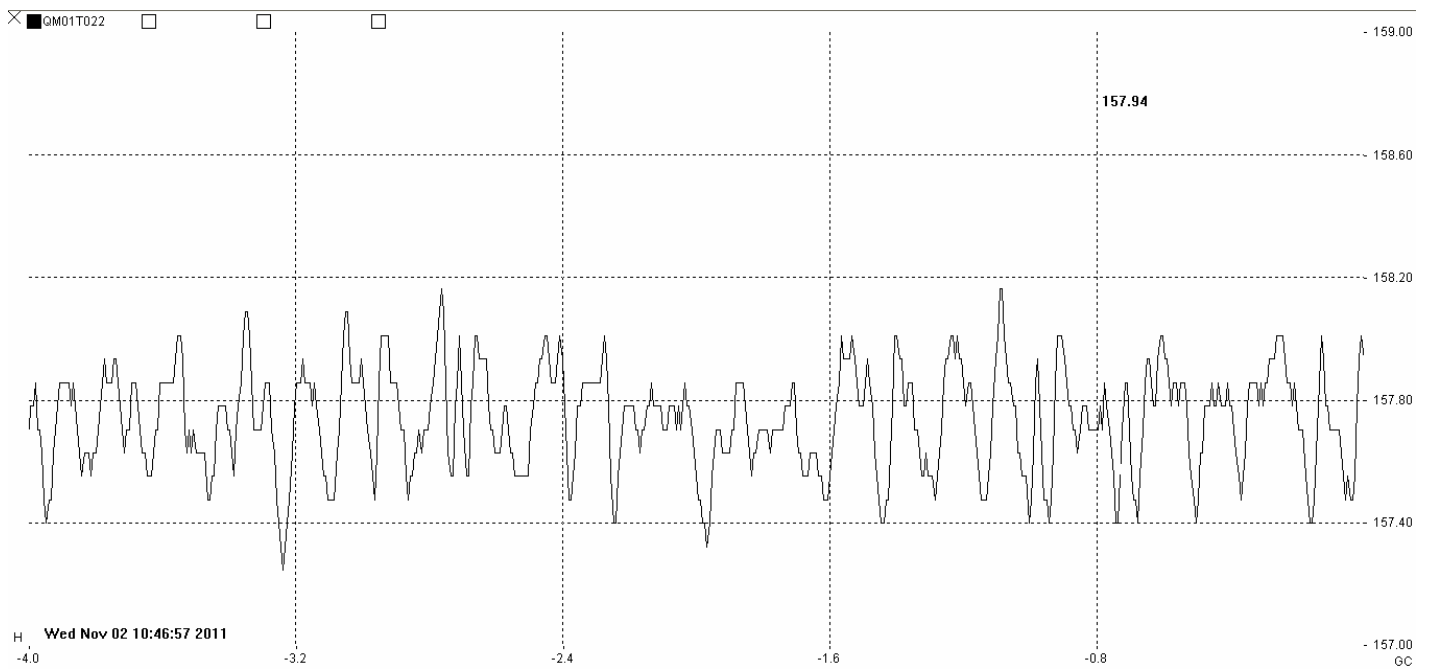


Figura 17 – QM01T022

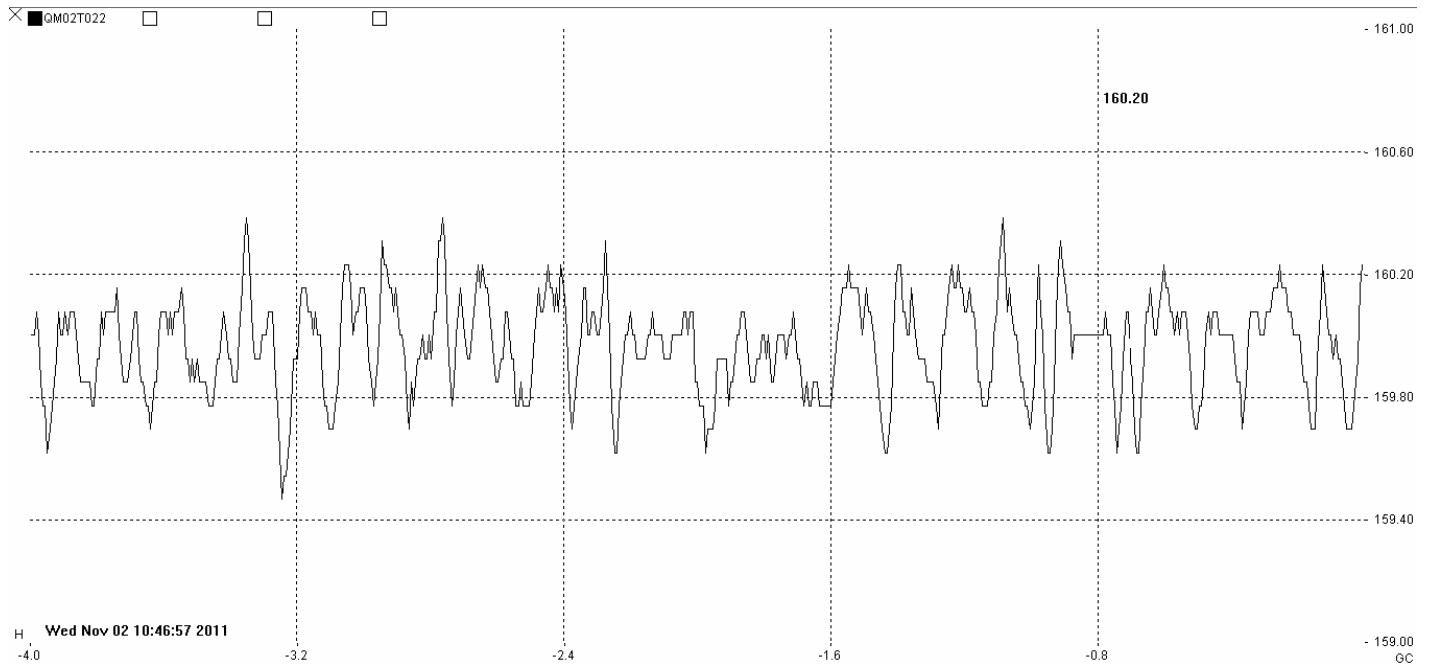


Figura 18 – QM02T022

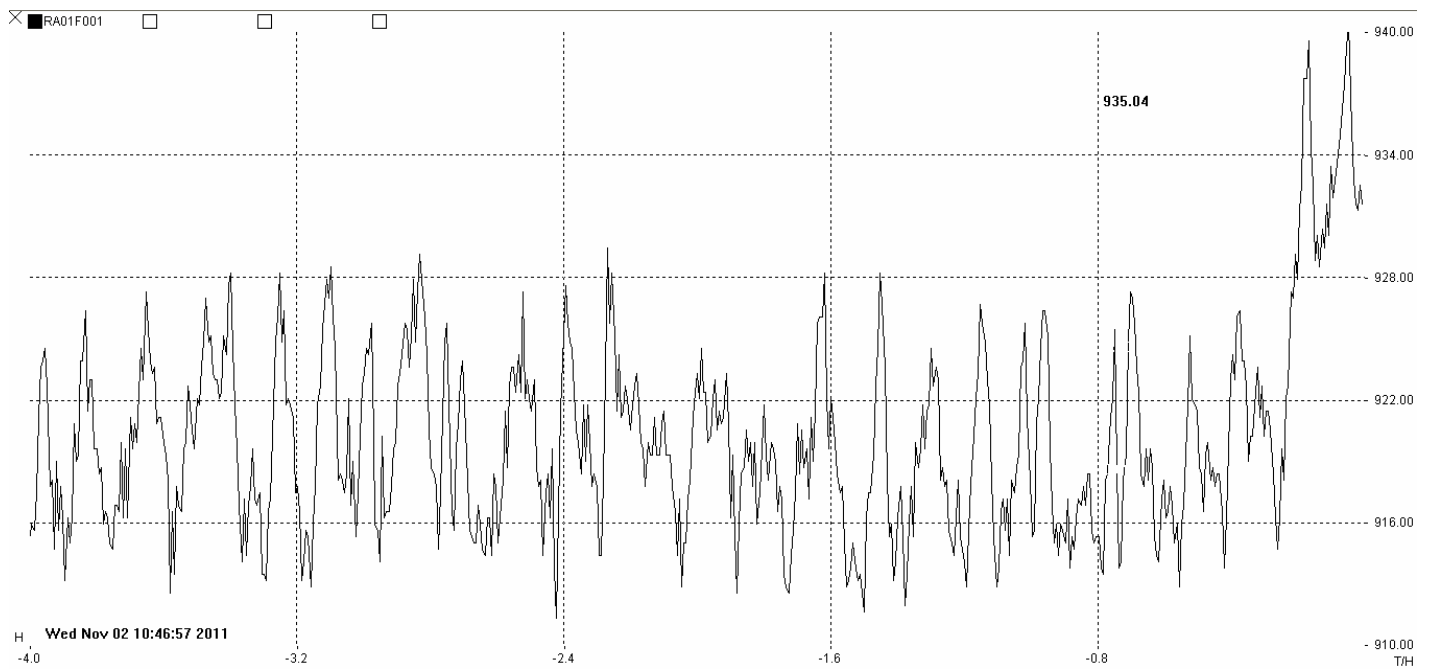


Figura 19 – RA01F001

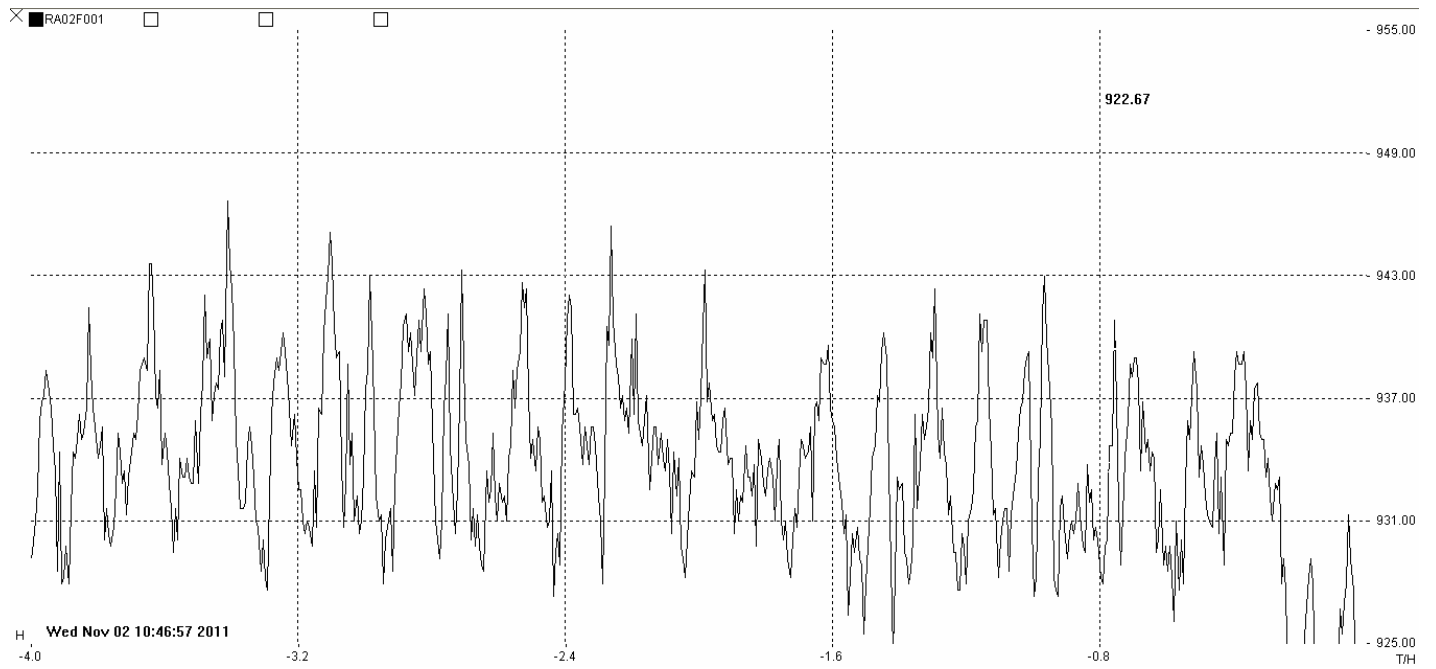


Figura 20 – RA02F001

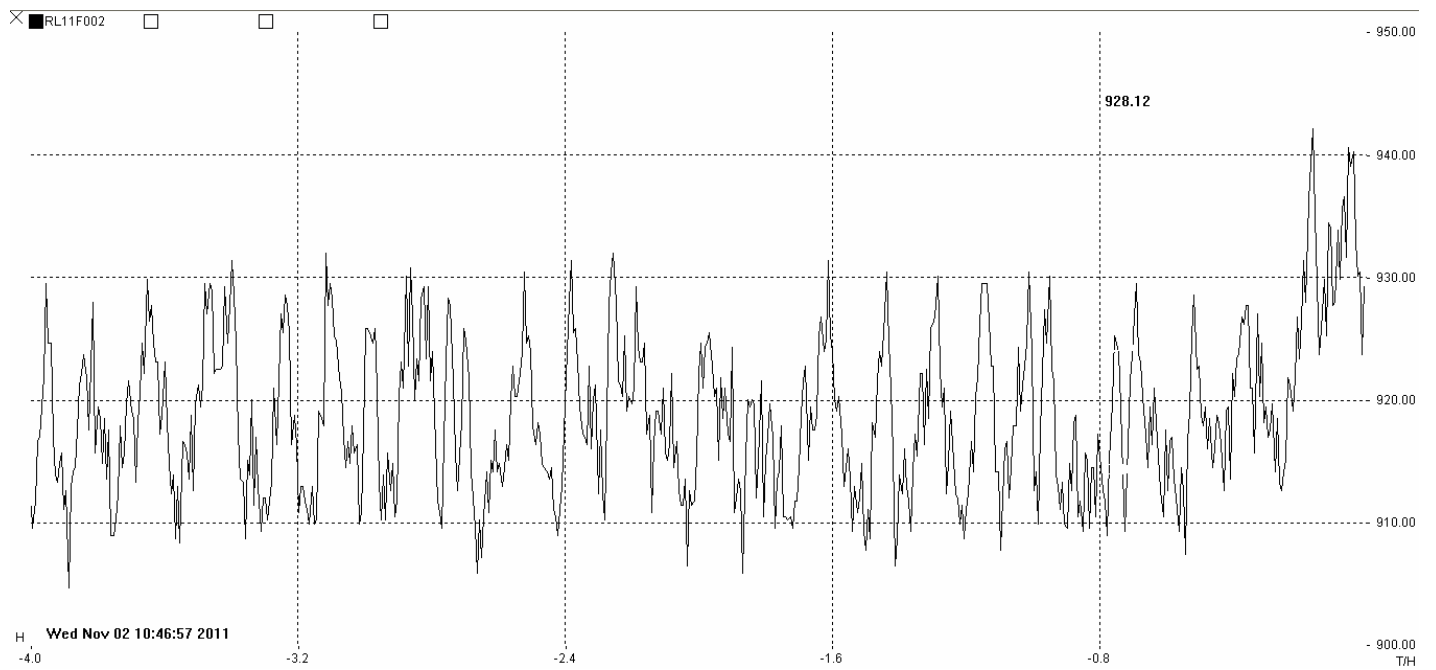


Figura 21 – RL11F002

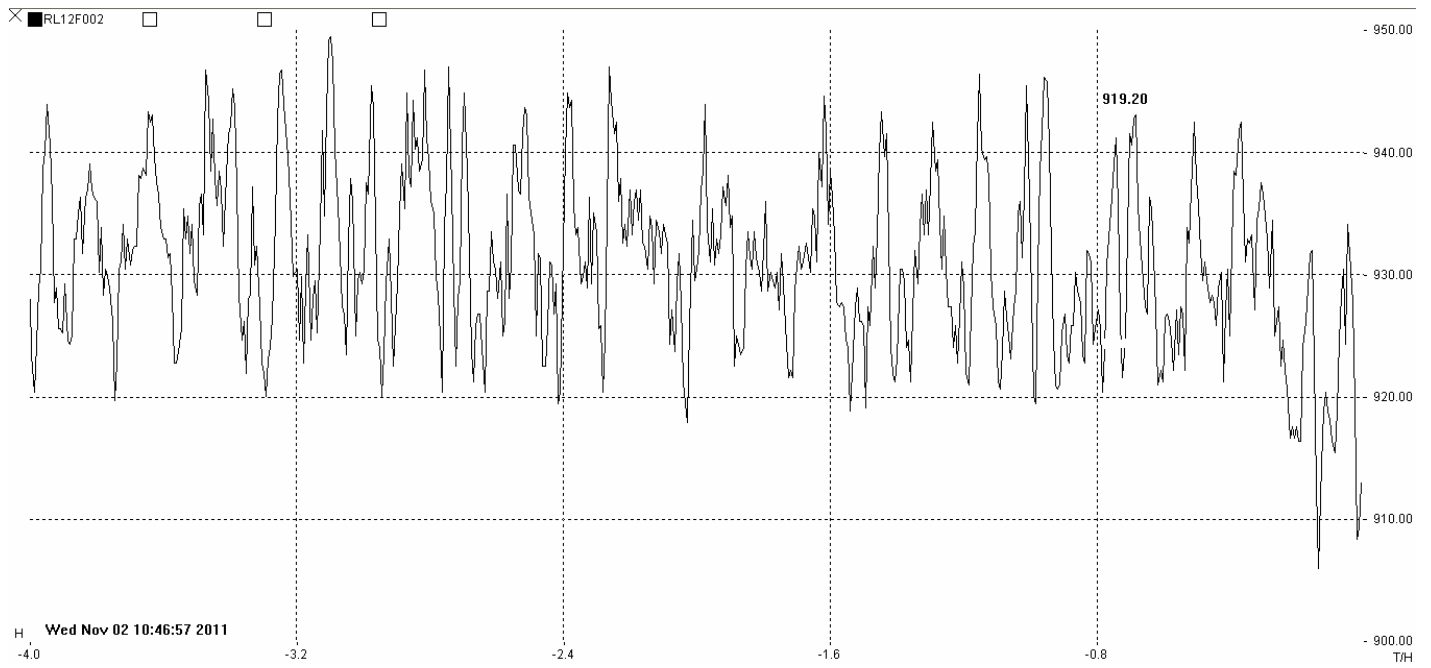


Figura 22 – RL12F002

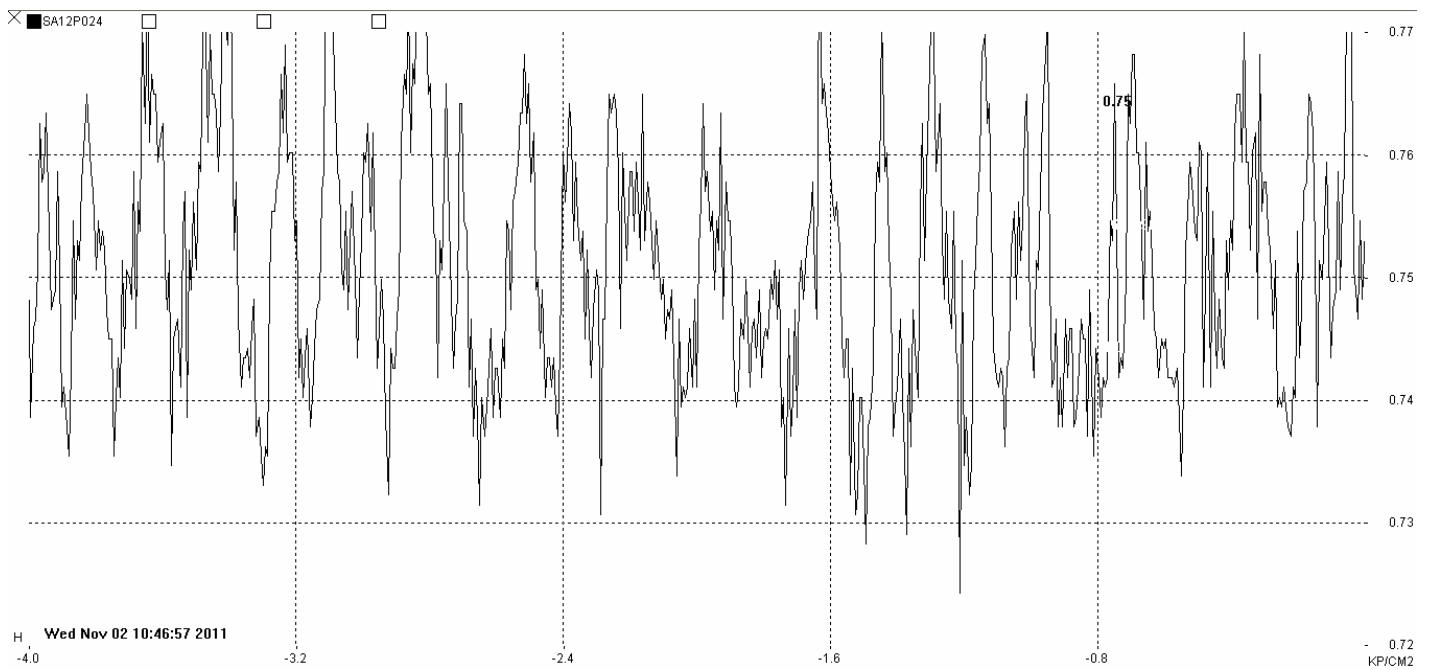


Figura 23 – SA12P024

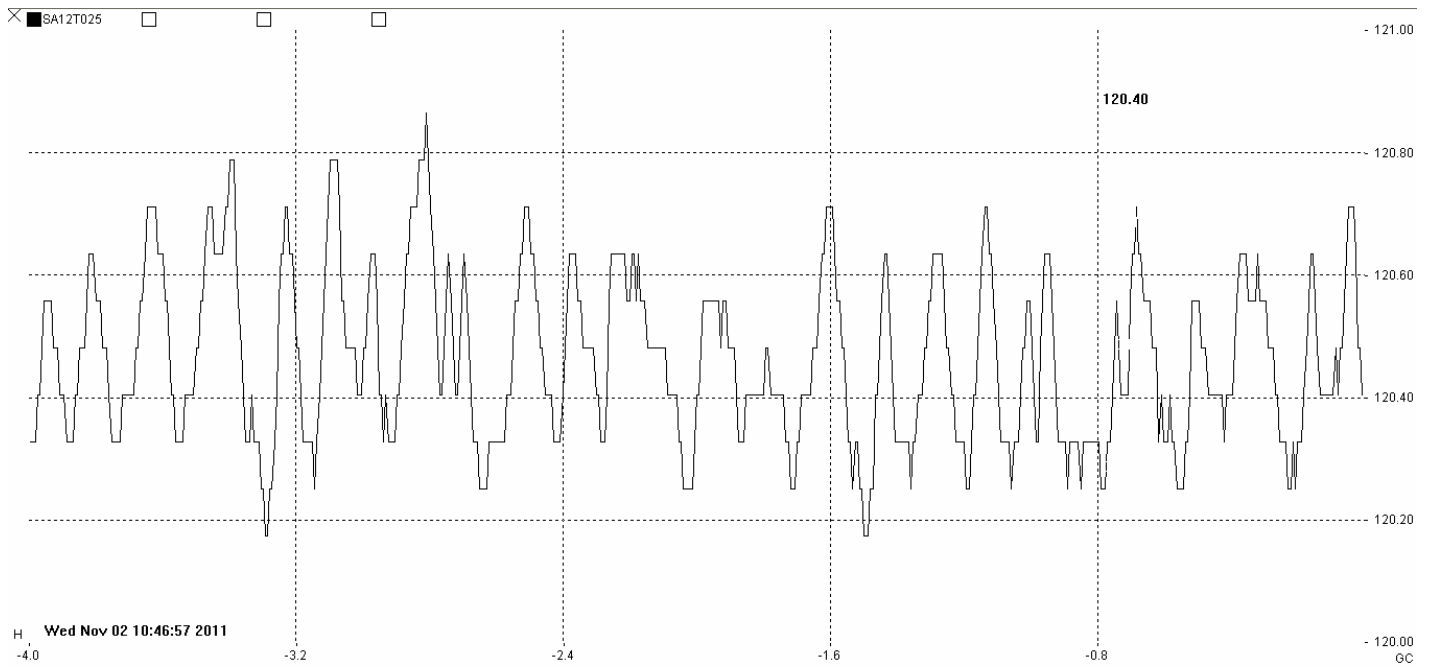


Figura 24 – SA12T025

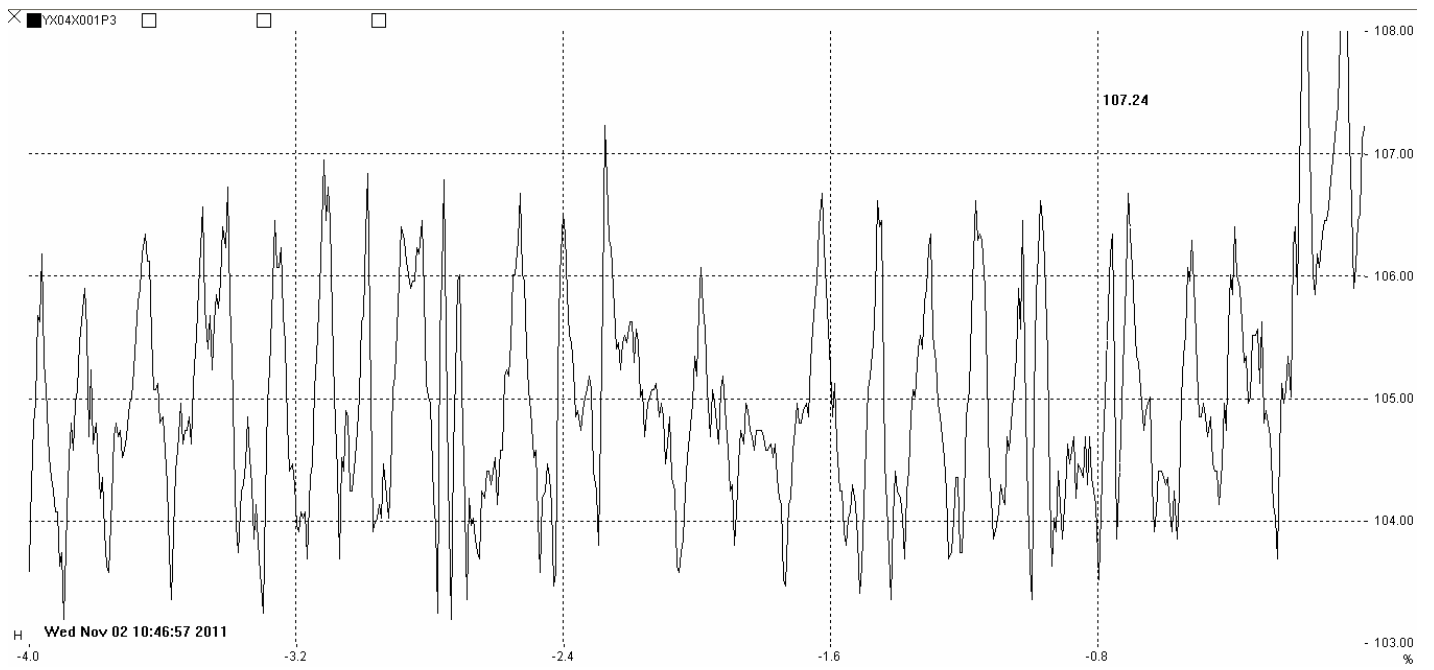


Figura 25 – YX04X001P3

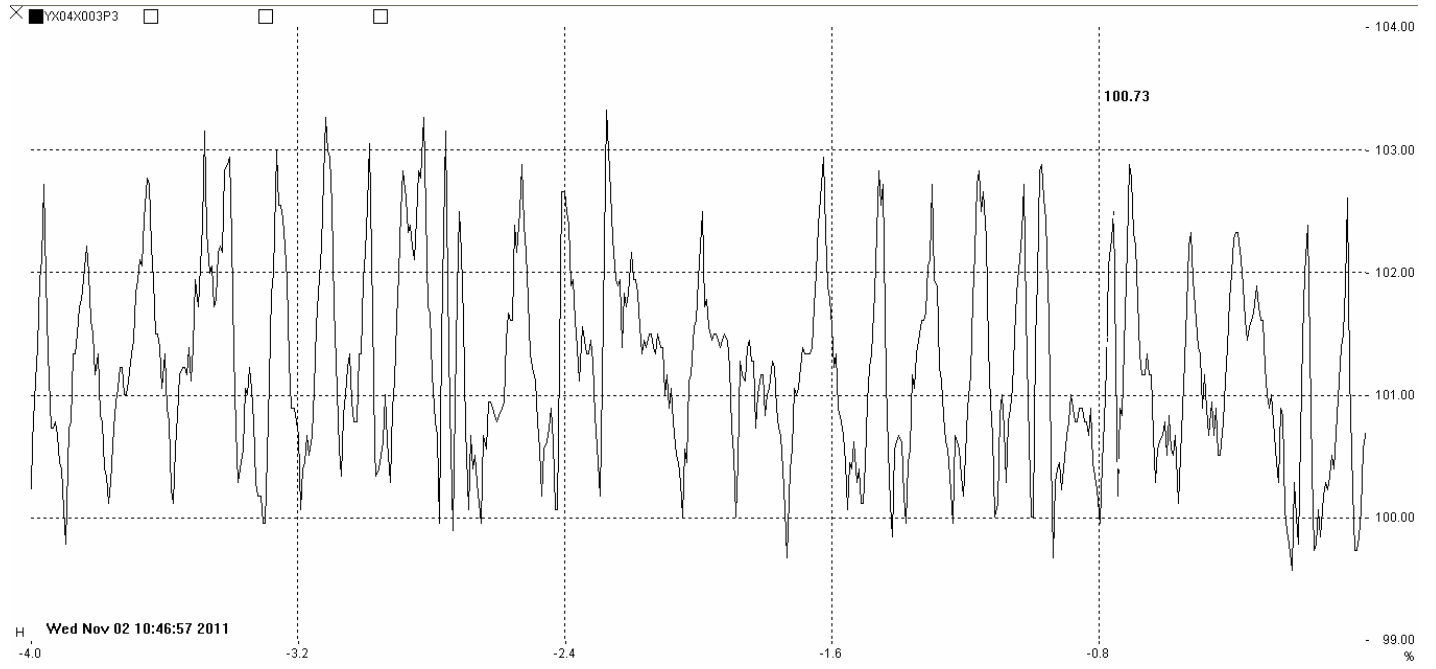


Figura 26 – YX04X003P3

## Anexo 4

### Código en Matlab de la función de correlación

```
%Definición de variables.
a=RL11F002;
b=RESTAQM1;

Afijo=a(:,1); %crea un vector
Bfijo=b(:,1);
Afijo=Afijo(1:3002); %recorta hasta valor 3002 para que Afijo y Bfijo
tengan la misma dimensión
Bfijo=Bfijo(1:3002);

for l=1:18
    N=1+150*(l-1); %N= n° de puntos reales. intervalos de 150 puntos.
    NN=N+300; %intervalos de 150 desplazados de N en 300
    A=Afijo(N:NN); %va completando A por intervalos, con los valores de
Afijo
    B=Bfijo(N:NN);
    Amedia=mean(A); %valor medio del intervalo
    Bmedia=mean(B);
    A=(A-Amedia);%resta punto a punto
    B=(B-Bmedia);
    sigmaA=std(A); %desvío estándar
    sigmaB=std(B);
    BB=B/sigmaB;
    AA=A/sigmaA;

    for k=1:150
        dd(k,l)=0;

        for i=1:150 %índice de puntos en 1 intervalo.
            dd(k,l)=dd(k,l)+AA(i)*BB((i+k-1))/(150); %va acumulando en una celda
            para un k y un l
        end
    end %con l=1 y k de 1 a 150 se forma la primer columna de la matriz
    dd (dim: 150x18) y así sucesivamente
end

ddm=mean(dd,2); %calcula el promedio por fila de la matriz dd -->
vector de 150 valores
ddst=std(dd,0,2); %calcula el desvío estándar por fila de la matriz dd
--> vector de 150 valores

plot (ddm)
```

## Anexo 5

### Código en Matlab del Modelo A

```
%este programa modela la variacion de la temperatura con el
%flujo neutronico

a=YX04X01P3;
b=QH01T001P3;

reala=a(:,1);
realb=b(:,1);
reala=reala(1:3002);
realb=realb(1:3002);
f=reala/103; %normalizacion de las variables
g=realb/35;

plot(f, 'b');
hold on
plot(g, 'r');
title('Variables reales normalizadas','FontName','Calibri','FontSize',
12);
xlabel('tiempo','FontName','Calibri','FontSize', 12)
YLABEL('Señal','FontName','Calibri','FontSize', 12)
legend('YX04X001P3','QH01T001P3')

Afijo=a(:,1);
Bfijo=b(:,1);
Afijo=Afijo(1:3002);
Bfijo=Bfijo(1:3002);

AL=Afijo;
BL=Bfijo;
BL=Bfijo-mean(Bfijo);
AL=Afijo-mean(Afijo);
for i=6:3000
    BL(i)=(BL((i-1))+0.01*(AL((i-1))+AL((i-2)))+(AL((i-3)))-.3*(BL(i-
1)))*0.5;
end
figure
plot(AL, 'b')
hold on
plot (BL, 'r')
title('Variables calculadas con
modelo','FontName','Calibri','FontSize', 12);
xlabel('tiempo','FontName','Calibri','FontSize', 12)
YLABEL('Señal','FontName','Calibri','FontSize', 12)
legend('YX04X001P3','QH01T001P3 simulada')
```

## Anexo 6

### Código en Matlab del Modelo B

```
a=SA12P024;
b=SA12T025;

reala=a(:,1);
realb=b(:,1);
reala=reala(1:3002);
realb=realb(1:3002);
f=reala/0.77; %normalizacion de las variables
g=realb/120.5;

plot(f, 'b');
hold on
plot(g, 'r');
title('Variables reales normalizadas', 'FontName', 'Calibri', 'FontSize',
12);
xlabel('tiempo', 'FontName', 'Calibri', 'FontSize', 12)
YLABEL('Señal', 'FontName', 'Calibri', 'FontSize', 12)
legend('SA12P024', 'SA12T025')

Afiijo=a(:,1);
Bfiijo=b(:,1);
Afiijo=Afiijo(1:3002);
Bfiijo=Bfiijo(1:3002);
AL=Afiijo;
BL=Bfiijo;
BL=Bfiijo-mean(Bfiijo);
AL=Afiijo-mean(Afiijo);
for i=14:3000
    BL(i)=0.001*AL(i-5)+0.05*AL(i-6)+0.1*AL(i-7)+0.2*AL(i-8)+0.2*AL(i-
9)+0.2*AL(i-10)+0.1*AL(i-11)+0.05*AL(i-12)+0.001*AL(i-13);
end
figure
plot(AL, 'b')
hold on
plot (BL, 'r')
title('Variables calculadas con
modelo', 'FontName', 'Calibri', 'FontSize', 12);
xlabel('tiempo', 'FontName', 'Calibri', 'FontSize', 12)
YLABEL('Señal', 'FontName', 'Calibri', 'FontSize', 12)
legend('SA12P024', 'SA12T025 simulada')
```