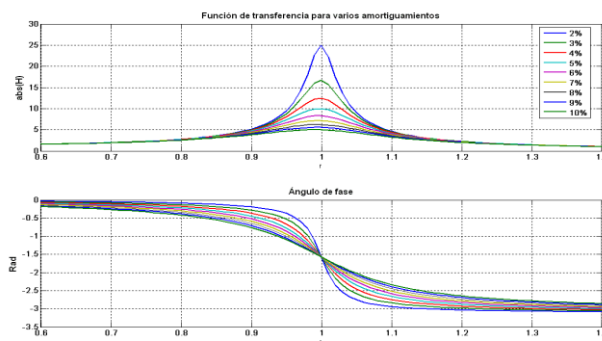


Capítulo 5

Medición y Evaluación de Propiedades Dinámicas



Reducción del Riesgo Sísmico en Edificaciones Escolares de Venezuela

Informe Técnico

Responsable: Oscar A. López (IMME-FI-UCV)

5.- MEDICIÓN Y EVALUACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS

Participantes: Jean G. Domínguez B. y Leonardo Colmenárez (FUNVISIS)

5.1.- Marco Teórico

5.1.1.- Objetivos y Alcance

Se presentan elementos metodológicos y resultados de la implementación del método de ruido ambiental para la determinación de las propiedades dinámicas en estructuras, aplicado a las edificaciones escolares que son objeto de estudio en este proyecto.

El presente estudio tiene como finalidad la determinación por vía experimental de los períodos y modos fundamentales de vibración, así como la razón de amortiguamiento crítico por modo de las estructuras correspondientes. El procedimiento consiste en la instalación de arreglos particulares de instrumentos velocímetros con sus respectivos sistemas de adquisición de datos en lugares seleccionados de la estructura. Luego esos datos obtenidos son sometidos a un post-proceso en el cual se extrae toda la información de interés.

En una primera etapa se determinaron las propiedades en las siguientes escuelas:

- Unidad Educativa “Domingo Faustino Sarmiento”
- Unidad Educativa “Padre Sojo”
- Unidad Educativa Nacional “Luis Alejandro Alvarado”
- Unidad Educativa Nacional “Experimental Venezuela”

Y en la segunda etapa las escuelas siguientes:

- Unidad Educativa Playa Grande
- Unidad Educativa Antonio Rodríguez Abreu
- Unidad Educativa Corazón de Jesús
- Unidad Educativa María Reina de López
- Unidad Educativa Nacional Experimental Venezuela (2da Parte)

Los resultados obtenidos de la aplicación de este método son un buen estimador de las propiedades dinámicas en estructuras (López et al., 1989), cuyo rango de amplitud de movimiento sea pequeño, es decir, que todos sus elementos estructurales y no estructurales se mantengan dentro del rango lineal elástico de deformación, esto implica que ambos tipos de elementos contribuyen en el comportamiento dinámico global de la estructura.

Un análisis modal de un modelo matemático simplificado de la estructura medida (incluyendo elementos no estructurales), muestra igualmente las propiedades dinámicas en un rango lineal de deformación de materiales, para las características particulares del modelo, por lo que pueden ser directamente comparadas con aquellas provenientes de éste estudio y evaluar la idoneidad y pertinencia de las hipótesis hechas en los modelos. Sin embargo, bajo la acción de movimientos sísmicos de moderada o alta intensidad, se esperan amplitudes de vibración más elevadas en las cuales los elementos estructurales y no

estructurales pueden sufrir algún tipo de degradación, modificando sustancialmente y de manera permanente todos los parámetros dinámicos determinados en este estudio.

5.1.2.- Equipos Utilizados

En la primera etapa de los ensayos se utilizó el sensor modelo CMT-40T de GURALP [GURALP Systems], se trata de un sensor triaxial de fuerza balanceada cuya respuesta es proporcional a la velocidad del lugar sobre el cual se coloca. Estos sensores resultan especialmente convenientes dada su respuesta plana sobre un rango importante de frecuencias dentro de las cuales se pueden encontrar la mayoría de las edificaciones de baja a mediana altura (Fig. 5.1). En una segunda etapa fueron utilizados los sensores sismómetros de 1 Hz de un grado de libertad. Se trata del modelo Ranger SS-1 de Kinemetrics [KINEMATRICS, INC.] (Fig. 5.1 y 5.2). Para este estudio se utilizó con su amortiguamiento interno, el cual está estimado en 7% del amortiguamiento crítico.

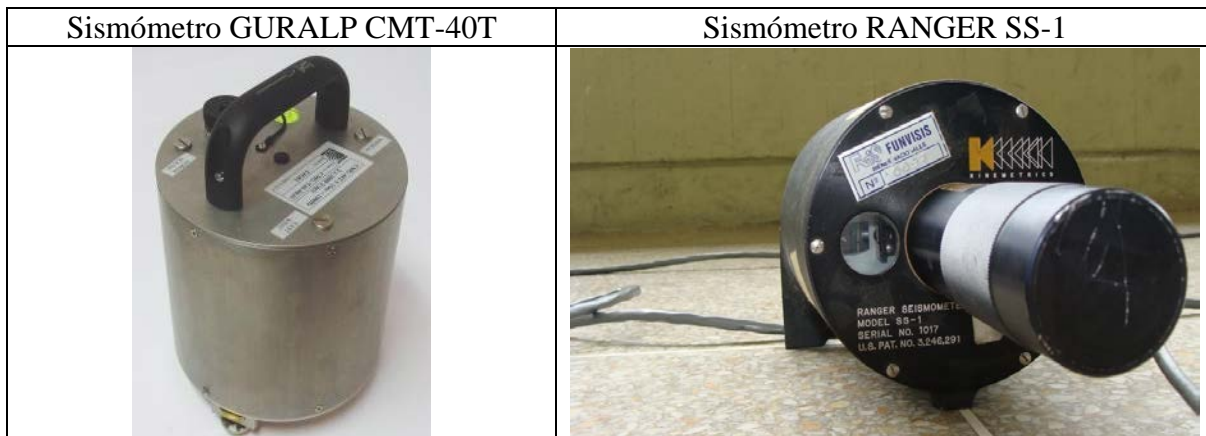


Figura 5.1.- Sismómetros

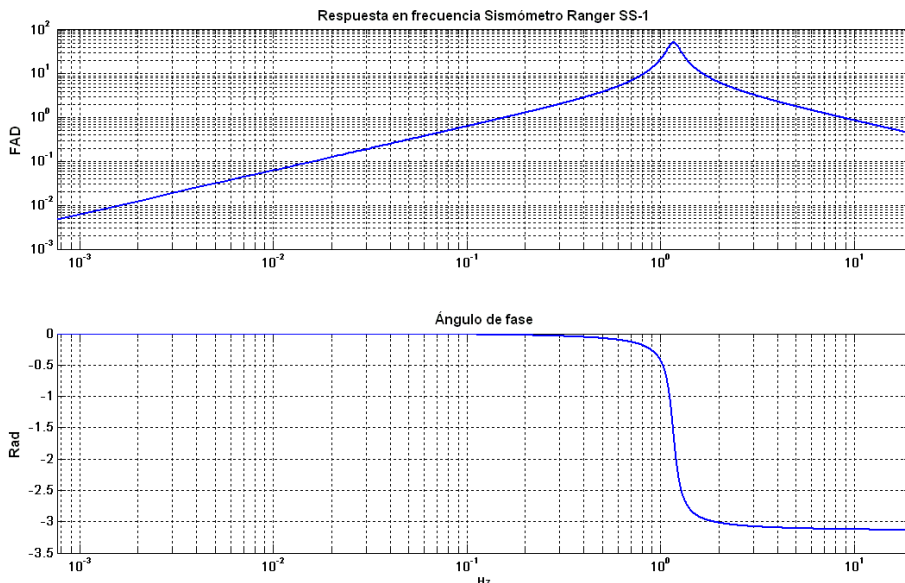


Figura 5.2.- Función de transferencia del sismómetro RANGER SS-1 para $\zeta=0.07$

Se utilizó un sistema integral de adquisición de datos modelo VSS-3000 de Kinometrics (contiene sistema Bookmark 216 de IOTech) con un rango dinámico de 16 bits [IOTECH, INC.]



Figura 5.3.- Sistema de adquisición VSS-3000

5.1.3.- Adquisición y Procesamiento de Datos

Los sensores instalados emiten una respuesta en voltios de manera continua, proporcional a la velocidad del lugar sobre el cual se colocan, esta señal se adquiere de manera discreta por los convertidores A/D a una tasa de muestreo definida. Para las mediciones hechas en este estudio la tasa de muestreo se fijó en 200 Hz para un caso y 500 Hz para los restantes, como se especifica posteriormente.

Todos los cálculos y procesamiento de datos se realizaron en unidades de voltios debido a que su valor es proporcional a un valor físico de respuesta, lo cual es aceptable toda vez que la amplitud física de movimiento no es de interés en este estudio, sino más bien un estimado de las amplitudes relativas entre varios puntos de registro. Por esa razón, además de aquella derivada de haber utilizado un sólo tipo de sensor, tampoco fue necesario hacer correcciones instrumentales a las señales obtenidas.

El procesamiento de datos se clasifica dentro de los métodos no paramétricos de identificación de sistemas dinámicos y consta de varias etapas:

- Ordenamiento de datos, ajuste e igualación de tiempos de comienzo
- Transformación del registro al dominio de frecuencias a través de la función densidad espectral de potencia
- Identificación preliminar de frecuencias modales por máximos espectrales o “Peak picking”
- Cálculo de la densidad espectral cruzada y ángulo de fase entre registros de sensores seleccionados.
- Determinación de formas modales
- Registro rotacional como verificación para diafragmas rígidos
- Determinación del amortiguamiento modal por el método de la potencia media.

a) Ordenamiento de Datos

Consiste en manipular los datos de cada registro según sus tiempos de inicio de manera de que cada uno tenga su primer dato en el mismo instante de tiempo.

b) Transformación Del Registro al Dominio de Frecuencias a Través de la Densidad Espectral de Potencia

A cada registro se le calcula el espectro de potencia por el método de Welch (1967), este método consiste en la división del registro principal en N subregistros (con posibilidad de solape), para luego calcular en cada subregistro su espectro de potencia y luego promediar los N espectros, para de esta manera “filtrar” las frecuencias de aparición aleatoria en cada ventana y permitir que prevalezcan las frecuencias siempre presentes, que pueden ser modos de vibración operacionales, modos estructurales o ruido proveniente de procesos estacionarios (señales electrónicas, motores a/c, etc.).

Cada uno de los espectros de potencia de cada subregistro se pondera con una curva de Hamming para reducir la reintroducción de frecuencias por efectos de condiciones iniciales (Ecuación 5.1.1 y 5.1.2). En general se definió un solape de 60% entre los subregistros.

$$S(e^{i\omega}) = \frac{\frac{1}{n} \left| \sum_{l=1}^n w_l x_l e^{-i\omega l} \right|^2}{\frac{1}{n} \sum_{l=1}^n |w_l|^2} \quad (5.1.1)$$

$$w[k + 1] = 0.54 - 0.46 \cos\left(2\pi \frac{k}{n-1}\right) \quad k=0,1,\dots,n-1 \quad (5.1.2)$$

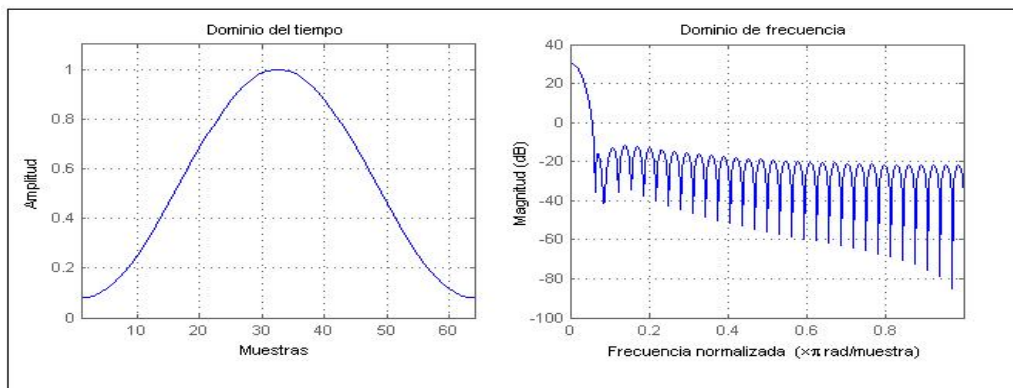


Figura 5.4.- Detalles de la curva de Hamming en los dominios de tiempo y frecuencia

c) *Identificación Preliminar de Frecuencias Modales por Máximos Espectrales o “Peak Picking”*

Una vez calculados los espectros de potencia se identifican en ellos los picos máximos y la frecuencia para la que ocurren. Teóricamente, la señal registrada en el dominio del tiempo debe ser una suma de tantas componentes armónicas como picos hayan sido encontrados, cada una de esas componentes con una frecuencia igual a la correspondiente a cada pico y con una media cuadrática igual al área del espectro de potencia bajo el pico.

Se muestra como ejemplo la curva de densidad espectral y su integral de la ecuación:

$$Y=10*\sin(2*\pi*5*t)+8*\sin(2*\pi*10*t)+4*\sin(2*\pi*20*t) \quad (5.1.3)$$

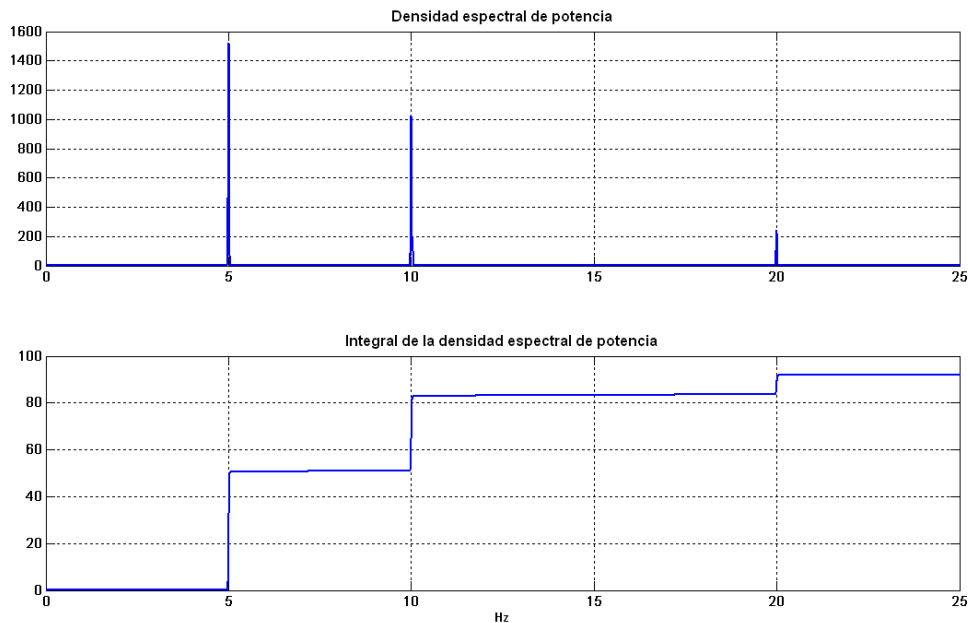


Figura 5.5.- Detalle del cálculo de media cuadrática desde un espectro de potencia

La expresión en cuestión consta de tres armónicos con frecuencias de 5, 10 y 20 Hz con amplitudes de 10, 8 y 4 unidades respectivamente. La curva de densidad espectral muestra tres picos principales asociados a las frecuencias 5, 10 y 20 Hz, indicando las frecuencias presentes. Luego la integral del espectro nos muestra el área acumulada debajo de cada pico del espectro como diferencia de alturas en la curva integral. En este caso, la altura de los escalones correspondientes son: 50, 32 y 8, que corresponden a las medias cuadráticas de armónicos de amplitud 10, 8 y 4 respectivamente, de tal forma que la amplitud puede ser detectada también. Sin embargo, cuando interesan valores proporcionales a las amplitudes mas no las amplitudes mismas, se puede normalizar a la unidad la máxima respuesta, quedando: $(10; 8; 4)/10 = (1; 0.8; 0.4)$.

d) *Cálculo de la Densidad Espectral Cruzada*

Una vez determinadas las frecuencias que posiblemente pueden estar asociadas a los modos de vibración, se procede a corroborar esta información mediante la aplicación de un análisis de correlación entre los registros simultáneos, para determinar frecuencias comunes en dos registros y el ángulo de fase que presentan entre ellos.

La descomposición modal de una vibración, consiste en representar el movimiento oscilatorio de varios grados de libertad como una suma ortogonal en serie de vibraciones de un grado de libertad, cada una de las cuales tiene su propia frecuencia de vibración. Esto implica que todo el movimiento registrado dentro de una frecuencia modal se puede expresar como un vector de forma contenido de los valores correspondientes a la amplitud estimada en cada punto de medición y un factor dinámico. El movimiento oscilatorio del modo de vibración en cuestión, viene dado al multiplicar el vector de forma por un factor que es función del tiempo o, coordenada modal, la cual corresponde a funciones armónicas cuya frecuencia de oscilación es obviamente la frecuencia modal.

Quedando definido entonces el movimiento dentro de un modo como el vector de forma multiplicado por la coordenada modal, es evidente que si la forma se mantiene, los elementos que están a un mismo lado de la posición de equilibrio de la vibración cuando la coordenada modal es positiva, estarán del lado contrario cuando la coordenada modal sea negativa. Asimismo, aquellos elementos que estén en lados opuestos de la posición de equilibrio cambiarán simultáneamente de lado cuando la coordenada modal cambie de signo, de manera que, dentro de un modo de vibración, dos puntos de una estructura tienen dos posibilidades: o alcanzar sus máximas respuestas simultáneamente (en fase), o alcanzar uno de ellos el máximo mientras el otro alcanza su mínimo (fuera de fase).

Mediante la aplicación de la densidad espectral cruzada entre dos registros, es posible determinar frecuencias comunes y ángulos de fase. Si una frecuencia aparece en dos registros de medición independientes, entonces estamos probablemente en presencia de una frecuencia modal, luego, si el ángulo de fase entre ambos registros es cero (0) o π radianes (3.1416), la frecuencia detectada es, sin duda (salvo casos de ruido electrónico, motores a/c etc.), un modo estructural, en el cual se ha detectado además, en qué posición relativa a la de equilibrio se encuentra cada punto en el cual se ha obtenido cada registro.

La correlación cruzada y el espectro de densidad espectral de potencia cruzada entre dos funciones están definidos por:

$$R_{xy}(\tau) = E[x(t)y(t + \tau)] \quad (5.1.4)$$

$$S_{xy}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau)e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (5.1.5)$$

e) *Determinación de las Formas Modales*

Tal como se mencionó anteriormente, de la densidad espectral de potencia se estimarán las amplitudes de respuesta en cada punto de medición, como el área del espectro bajo cada pico para cada frecuencia, para lo que se presentan curvas de área acumulada. El siguiente paso, es verificar mediante los espectros de potencia cruzados, la fase entre los registros para poder determinar la posición relativa entre ellos. Para ese fin se deja un sensor como pivote y se calculan las fases de los registros en otros sensores con respecto al pivote, de manera que si se observan valores iguales a cero para la fase entre dos registros, ambos crecen positiva o negativamente mientras que si la fase arroja el valor de π radianes, un registro aumenta hacia el lado positivo y el otro hacia el lado negativo.

La forma modal entonces consistirá en un vector, donde cada uno de sus elementos será un grado de libertad medido en la estructura, cuyo valor de amplitud indicará la respuesta máxima y cuyo signo indicará si la respuesta es hacia el lado positivo o negativo del sensor que la registró.

Para éste estudio se presentarán, cuando sea posible, los tres primeros modos de vibración en planta, por ejemplo, para el caso de un edificio con modos desacoplados, se presentarán los primeros modos traslacionales en cada dirección y el modo torsional. Cada punto de medición se considerará como un grado de libertad de la planta (pueden haber redundancias) y se normalizarán los vectores de forma modal con amplitudes máximas iguales a la unidad. Si existen varios arreglos, el valor 1 será el máximo obtenido entre todos los registros de todos arreglos para una misma frecuencia.

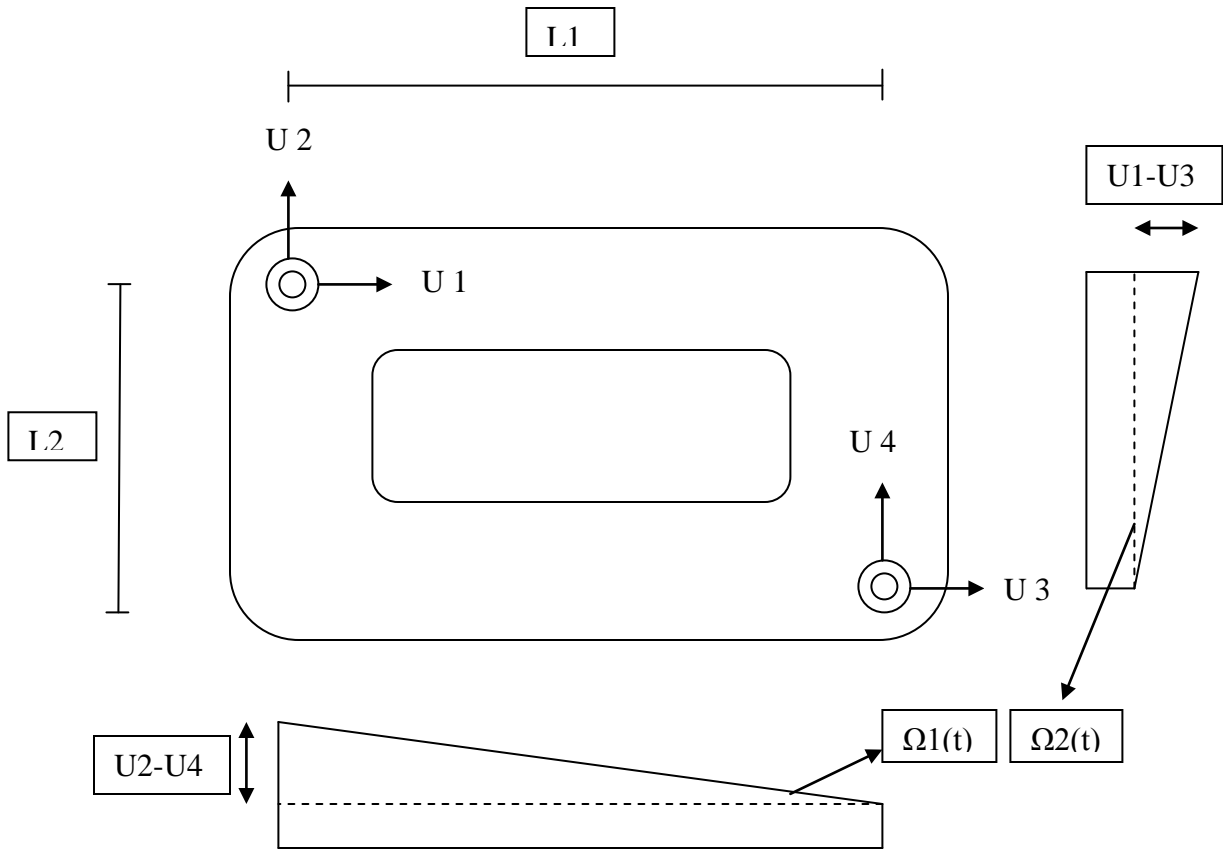
El criterio para la determinación de la forma modal es básicamente como sigue: La existencia de correlación positiva o negativa entre registros perpendiculares es indicativo de movimiento torsional, salvo que el punto de medición coincida con los centros de masa y rigidez. Correlaciones positivas entre registros paralelos no concurrentes evidencian movimiento principalmente traslacional siempre que sus magnitudes de respuesta (Aceleración, velocidad o desplazamiento) sean comparables. De la misma manera y bajo las mismas condiciones, la correlación negativa entre estos indica movimiento principalmente torsional.

La presencia de correlación positiva en registros paralelos concurrentes corrobora la hipótesis de diafragma rígido en esa línea de acción, para la frecuencia en cuestión, siempre que las magnitudes de respuesta sean comparables. En ocasiones se pueden apreciar registros paralelos concurrentes con correlación negativa dentro de un diafragma rígido, lo cual puede ser indicio de la presencia de una junta estructural que interactúa con las estructuras que une (si la frecuencia es comparable a las estructurales conseguidas) o puede indicar algún modo superior de vibración propio del diafragma mas no de la estructura en conjunto (si la frecuencia es muy alta en comparación de las encontradas para la estructura). El no encontrar correlación entre registros paralelos concurrentes puede ser indicativo de la presencia de una junta estructural sin interacción, en donde las estructuras a ambos lados de la junta pueden vibrar independientemente.

f) Registro Rotacional Como Verificación Para Diafragmas Rígidos

Como criterio novedoso en la metodología, se añadió una verificación de diafragma rígido a través de los registros temporales de rotación. El registro de rotación mide para cada instante de tiempo, un valor proporcional al ángulo de giro (Radianes) del diafragma, por lo tanto, el análisis espectral de éste registro sólo muestra las frecuencias modales torsionales.

Para la construcción del registro de rotación, se utilizan dos registros de grados de libertad paralelos no concurrentes.



$$\Omega_1(t) = \frac{U_2(t) - U_4(t)}{L_1} \quad \Omega_2(t) = \frac{U_1(t) - U_3(t)}{L_2}$$

Tal como muestra el esquema, si existe rotación como cuerpo rígido se deben cumplir dos condiciones: los valores de $\Omega_1(t)$ son iguales a los de $\Omega_2(t)$ y la fase entre ambos registros debe ser cero. Para el estado actual del desarrollo de la metodología, sólo utilizamos la segunda condición, por lo que las distancias L_1 y L_2 quedan con importancia secundaria y se utilizaron solamente los valores de los registros $U_1(t)$, $U_2(t)$, $U_3(t)$ y $U_4(t)$, de manera que los son de amplitud semejante pero efectivamente deben mantener fase igual a cero si el diafragma es rígido.

Algunos modos de vibración de losas con aberturas se muestran a continuación (Figs. 5.6 y 5.7):

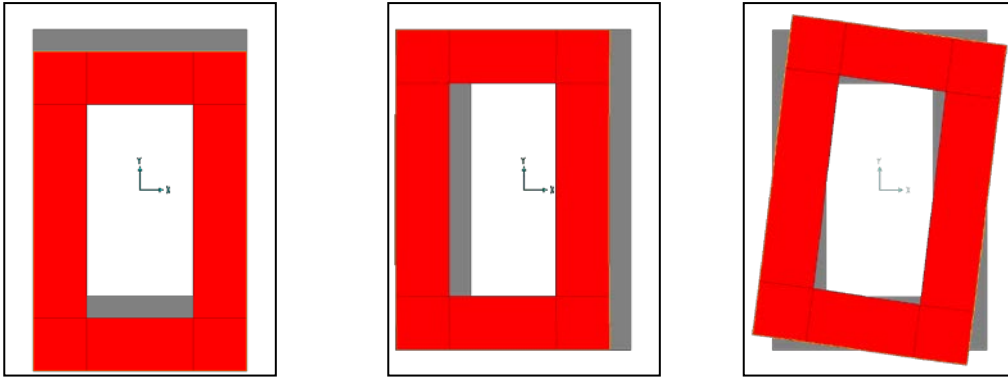


Figura 5.6.- Modos de vibración en planta con una losa como diafragma rígido

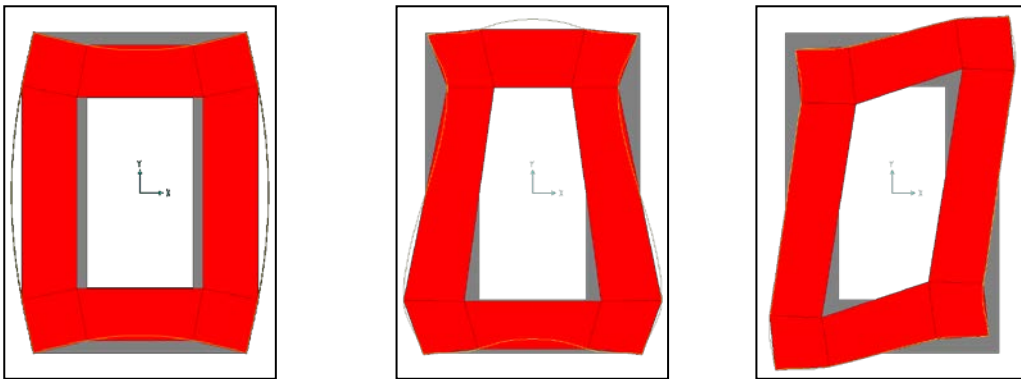


Figura 5.7.- Modos de vibración en planta con una losa como diafragma flexible

Según las características estructurales, podrían aparecer los primeros modos de vibración como diafragma rígido, como diafragma flexible o ambos. El objetivo del análisis de los registros de rotación es el de añadir una verificación adicional para corroborar la hipótesis de diafragma rígido, y de no ser así, poder verificar cuál modo como diafragma flexible está presente.

g) *Determinación del Amortiguamiento Modal por el Método de Potencia Media.*

Para un sistema de un grado de libertad dinámico, la función de respuesta en frecuencia para desplazamiento es como sigue (Craig, 1981) (Chopra, 2001):

$$\bar{H} = \frac{1}{(1 - r^2) + i(2\zeta r)} \quad (5.1.6)$$

$$r = \frac{\Omega}{\omega_n}$$

ζ = Razón de amortiguamiento crítico

Ω = Frecuencia de la excitación

ω_n = Frecuencia natural del sistema

El valor absoluto de esta expresión representa ampliaciones de respuesta con respecto a la excitación y su máximo valor se consigue cuando $r = 1$. Si se calculan las raíces de esta expresión para un valor absoluto igual a $\sqrt{2}/2 * \max(|H|)$ obtendremos dos valores r_1 y r_2 . Se puede demostrar que el amortiguamiento de el sistema es:

$$\zeta = \frac{r_2 - r_1}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Omega_2 - \Omega_1}{\omega_n} \right) \quad (5.1.7)$$

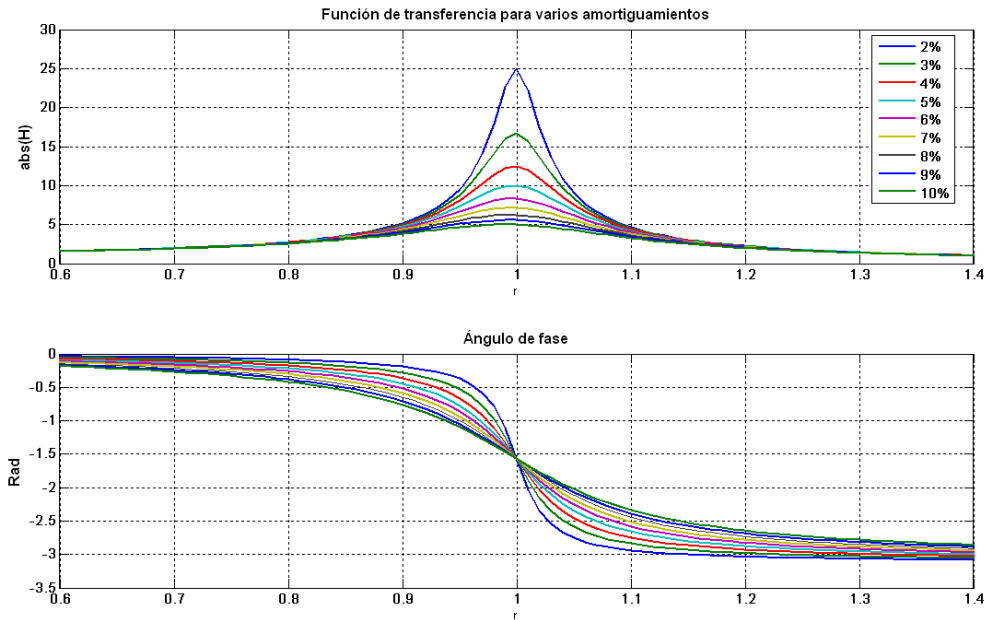


Figura 5.8.- Curvas de amplificación y fase para varios amortiguamientos

Haciendo un acercamiento a la primera gráfica y aplicando el método antes descrito podemos determinar el amortiguamiento (Fig. 5.9):

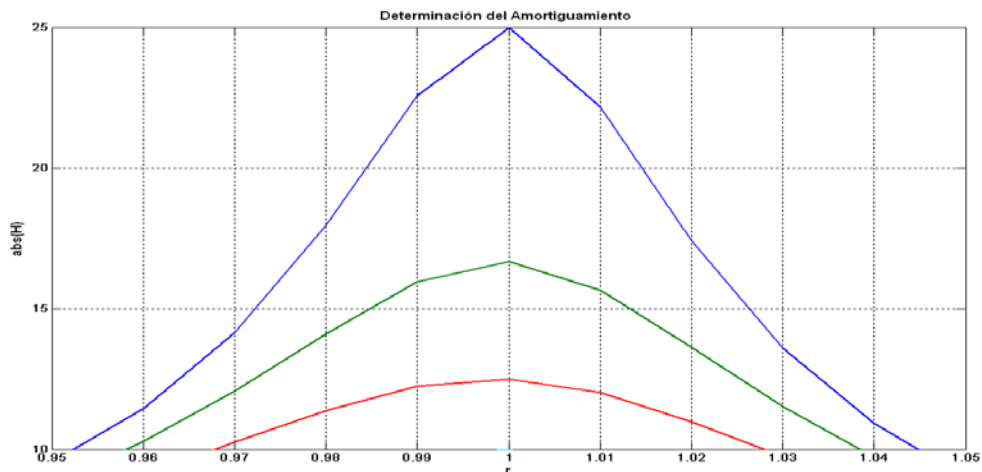


Figura 5.9.- Ampliación de la figura 5.8

El máximo valor de amplificación, para $r=1$ de la curva superior es 25. Se debe buscar entonces los valores de r correspondientes a $25 \cdot \sqrt{2/2} = 17.67$. Estos valores son aproximadamente $r_1=0.98$ y $r_2=1.02$, aplicando la fórmula descrita anteriormente se obtienen un amortiguamiento de 0.02 ó 2% que es el exacto para esa curva. Este método, como se dijo anteriormente, es válido para amortiguamientos pequeños, para amortiguamientos muy elevados se requiere hacer una expansión binomial debido a que las potencias de ζ no son despreciables.

5.2.- Marco Experimental

5.2.1.- Unidad Educativa Domingo Faustino Sarmiento

a) Instrumentación

En esta edificación se realizó un arreglo con tres sismómetros GURALP, el arreglo consistió en la instalación de los equipos en el tercer nivel de la edificación como se indica (Figura 5.2.1) con el fin de identificar los 3 modos fundamentales derivados de la suposición de comportamiento de dicho nivel como diafragma rígido en su plano, con 3 grados de libertad dinámicos. Los datos de este arreglo fueron adquiridos de manera simultánea con tres equipos independientes sincronizados a través de GPS.

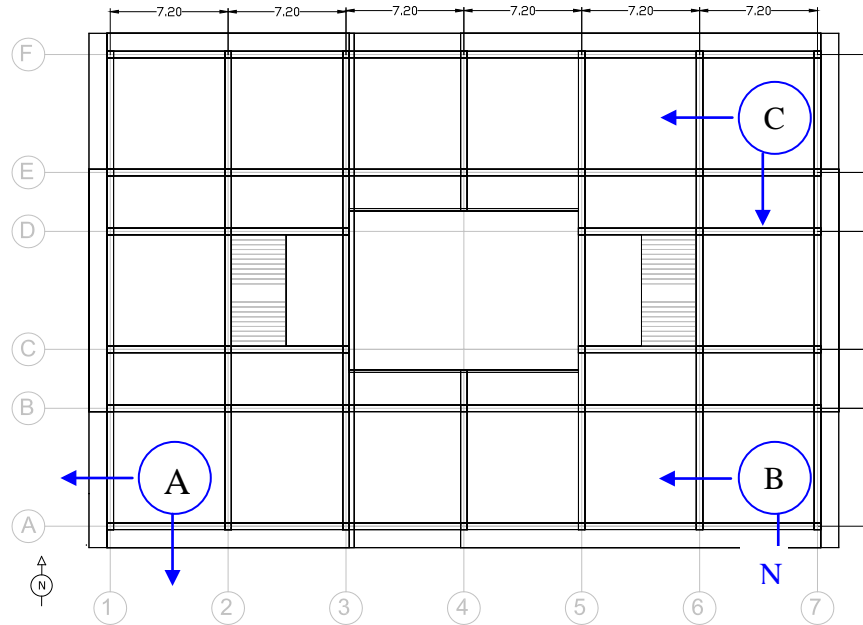


Figura 5.2.1.- Esquema de instrumentación de la U.E. Domingo Faustino Sarmiento. El norte instrumental necesariamente no debe coincidir con el geográfico sino más bien con ejes estructurales principales.

Es obvio que derivado de la hipótesis de diafragma rígido, el sensor B ofrece grados de libertad redundantes pues en el diafragma ellos ya están contenidos en los sensores A y B, es decir, no debe existir diferencia de comportamiento entre los canales C-norte y B-norte así como tampoco entre los canales A-este y B-este. Sin embargo, la redundancia de información es necesaria para poder corroborar dicha hipótesis, así como para poder establecer patrones de movimiento si esta resultara incorrecta.

b) Registro y procesamiento de datos

Los datos fueron adquiridos a una tasa de 200 muestras por segundo durante 30 minutos y almacenados para su posterior procesamiento mediante el empleo del programa de computación MatLab [THE MATHWORKS]

Una vez determinados los espectros de potencia suavizados, se identificaron los picos máximos que indican las componentes frecuenciales predominantes en el registro.

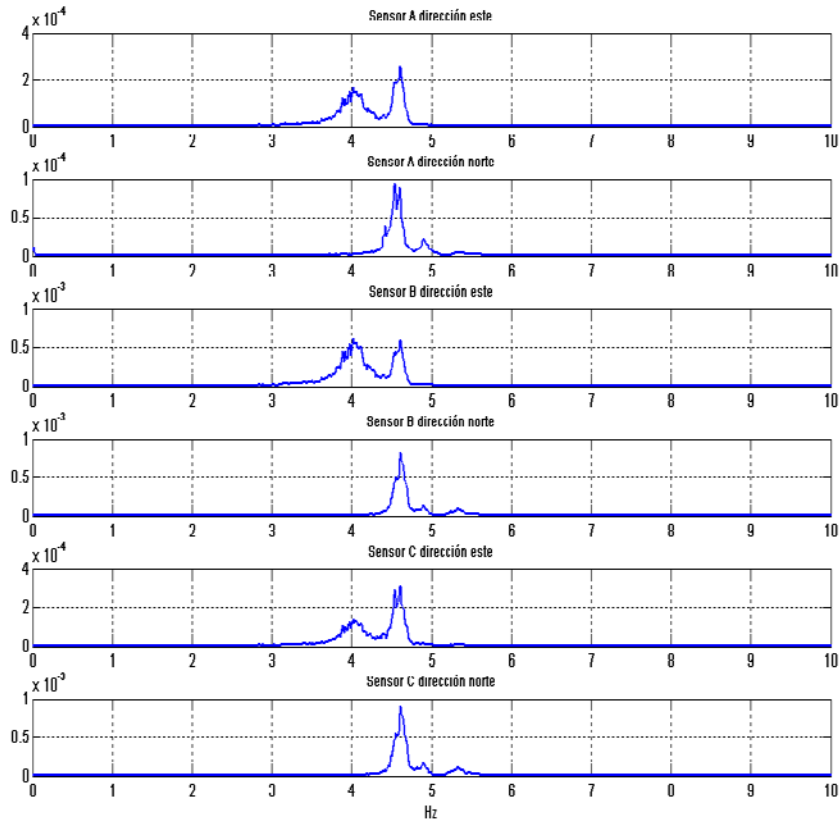


Figura 5.2. 2.- Espectros de potencia del arreglo único de la U.E. Domingo Faustino Sarmiento

Luego de identificadas las posibles frecuencias modales, se calculó la densidad espectral cruzada entre varios registros seleccionados, de manera de poder determinar

frecuencias comunes y ángulo de fase entre ellos. El criterio de selección consiste en buscar en los espectros cruzados aquellas frecuencias vistas en los espectros directos y que a su vez presenten ángulos de fase iguales a 0 (cero) o a π radianes (180°), lo cual es indicativo de frecuencia de vibración modal.

Se presentan a continuación una colección de gráficas de densidad espectral cruzada para varios registros.

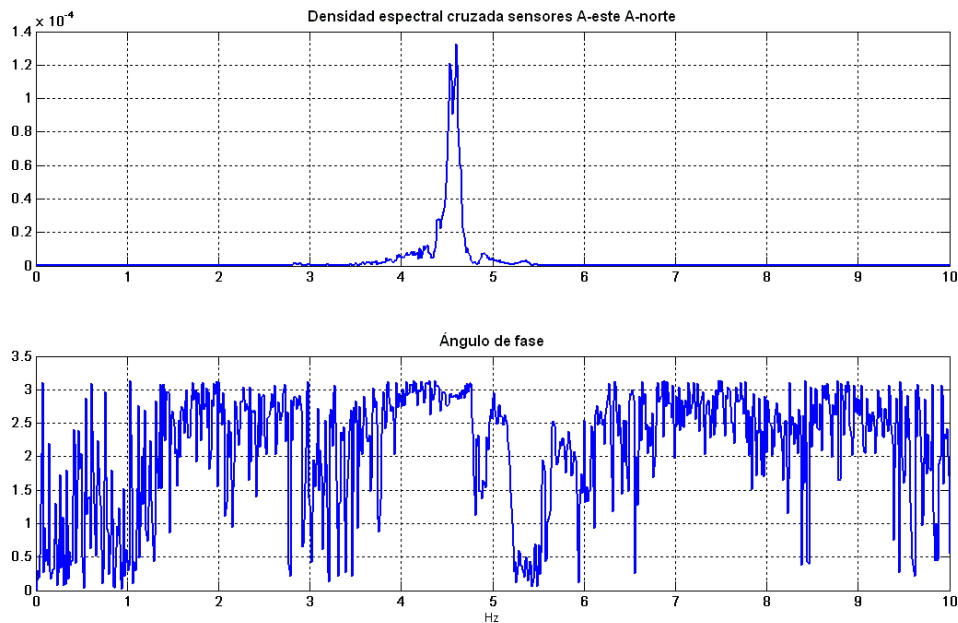


Figura 5.2. 3.- Densidad espectral cruzada A-este A-norte

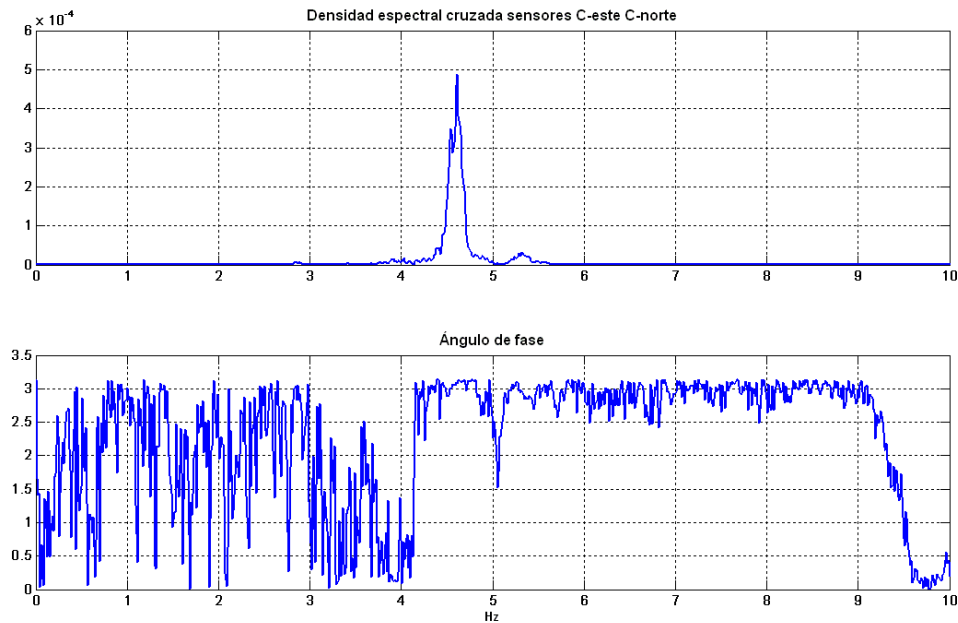


Figura 5.2. 4.- Densidad espectral cruzada C-este C-norte

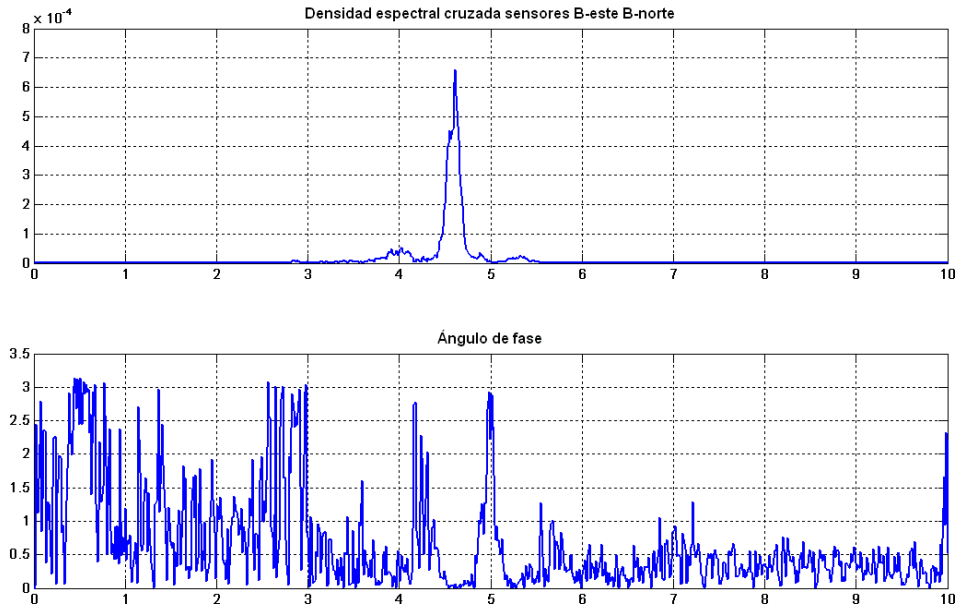


Figura 5.2. 5.- Densidad espectral cruzada B-este B-norte

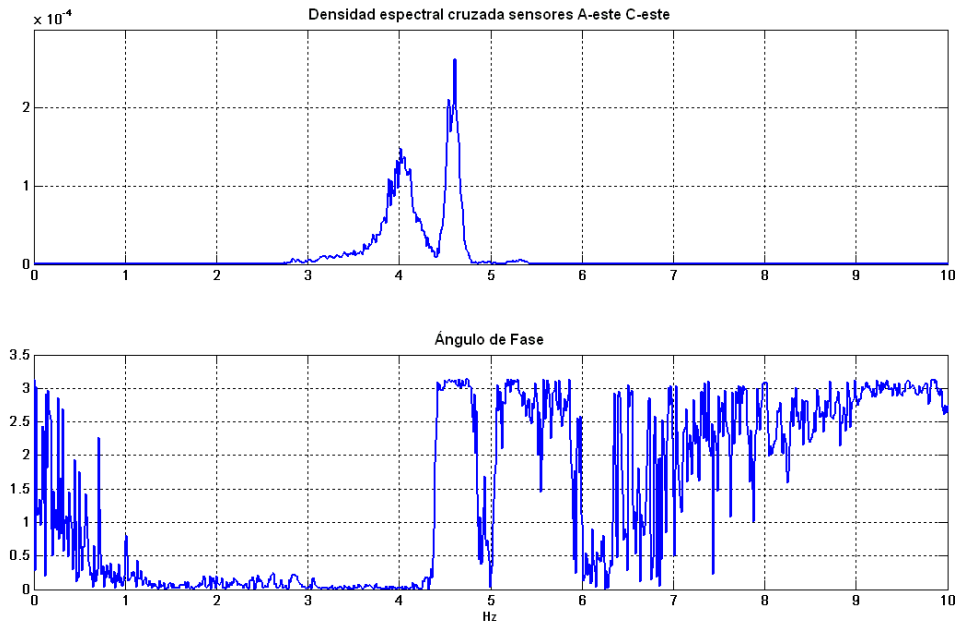


Figura 5.2. 6.- Densidad espectral cruzada A-este C-este

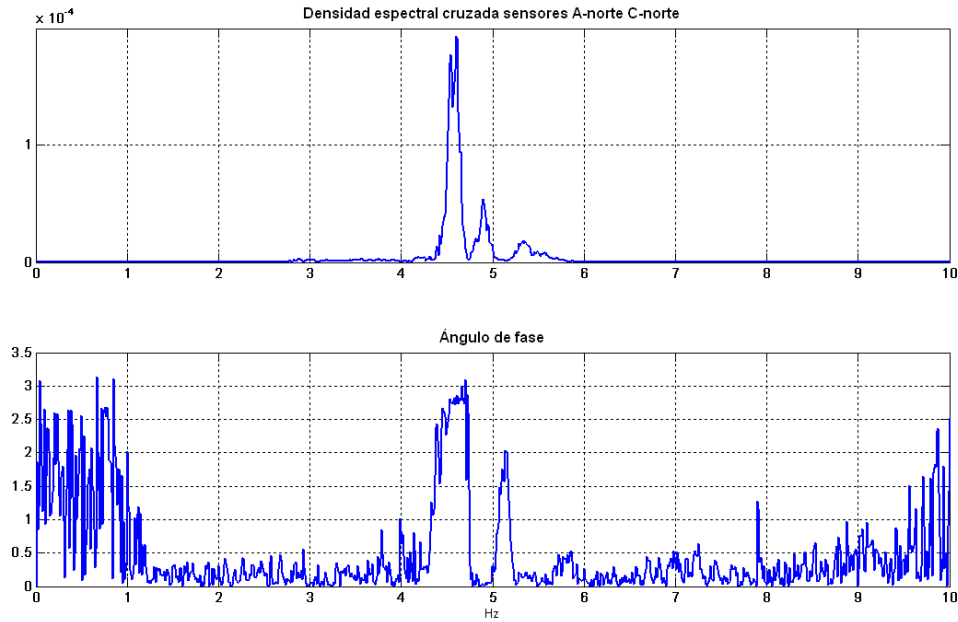


Figura 5.2. 7.- Densidad espectral cruzada A-norte C-norte

c) *Análisis de Resultados*

A continuación se presentan dos tablas con los resultados obtenidos. La tabla 5.2.1 muestra el análisis de correlación cruzada entre algunos registros seleccionados.

Tabla 5.2. 1.- Correlación cruzada de registros

Análisis de correlación cruzada de registros					
Arreglo	Sensor / registro	Sensor / registro	Frecuencias detectadas		
			4.02	4.62	4.89
1	A-este	C-este	+	-	n/a
	A-este	A-norte	-	n/a	n/a
	B-este	B-norte	n/a	+	n/a
	C-este	C-norte	n/a	-	n/a
	A-norte	C-norte	n/a	-	+

En la tabla 5.2.2 se muestra, para cada frecuencia modal encontrada, las amplitudes medidas con los instrumentos. Se muestran los máximos espectrales y luego sus raíces cuadradas, las cuales, como se dijo anteriormente, son proporcionales a la amplitud de respuesta.

Tabla 5. 2.- Amplitud de la densidad espectral

Amplitud de la densidad espectral				
	Sensor / registro	Frecuencias detectadas		
		4.02	4.62	4.89
MÁXIMOS ESPECTRALES	A-este	1.80E-04	2.00E-04	0
	A-norte	0	1.00E-04	2.50E-05
	B-este	5.00E-04	5.00E-04	0
	B-norte	0	7.50E-04	2.00E-04
	C-este	1.80E-04	3.00E-04	0
	C-norte	0	9.00E-04	1.50E-04
RAICES CUADRADAS NORMALIZADAS	A-este	0.6000	0.4714	0.0000
	A-norte	0.0000	0.3333	0.3536
	B-este	1.0000	0.7454	0.0000
	B-norte	0.0000	0.9129	1.0000
	C-este	0.6000	0.5774	0.0000
	C-norte	0.0000	1.0000	0.8660

d) Conclusiones

Del análisis de los resultados obtenidos, a partir del procesamiento de los datos adquiridos en la medición de propiedades dinámicas de la U.E. Domingo Faustino Sarmiento se concluye:

- Los tres primeros modos tienen frecuencias de 4.02, 4.62 y 4.89 Hz respectivamente con una tolerancia de cálculo de +/- 0.0061 Hz puesto que la tasa de muestreo fue de 200 Hz y el número de puntos por ventana igual a 16384 muestras.
- Los modos identificados en orden creciente de frecuencias son: Traslacional este, torsional y traslacional norte. Del análisis se deriva que estos tres primeros modos están prácticamente desacoplados a pesar de que puede apreciarse algún acoplamiento menor en algunas gráficas, este bien puede ser atribuido a la desviación entre la dirección del sensor y la principal de los ejes estructurales, sin embargo, en el caso de que fuese un acoplamiento estructural real, este es, para fines prácticos, despreciable.
- El amortiguamiento calculado para el primer modo es 3.66%, para el segundo 1.51% y para el tercero 1.17% del amortiguamiento crítico. Estos amortiguamientos son representativos de vibraciones a baja amplitud y no deben tomarse para análisis estructurales de edificaciones que no vayan a estar sujetas a esta condición.

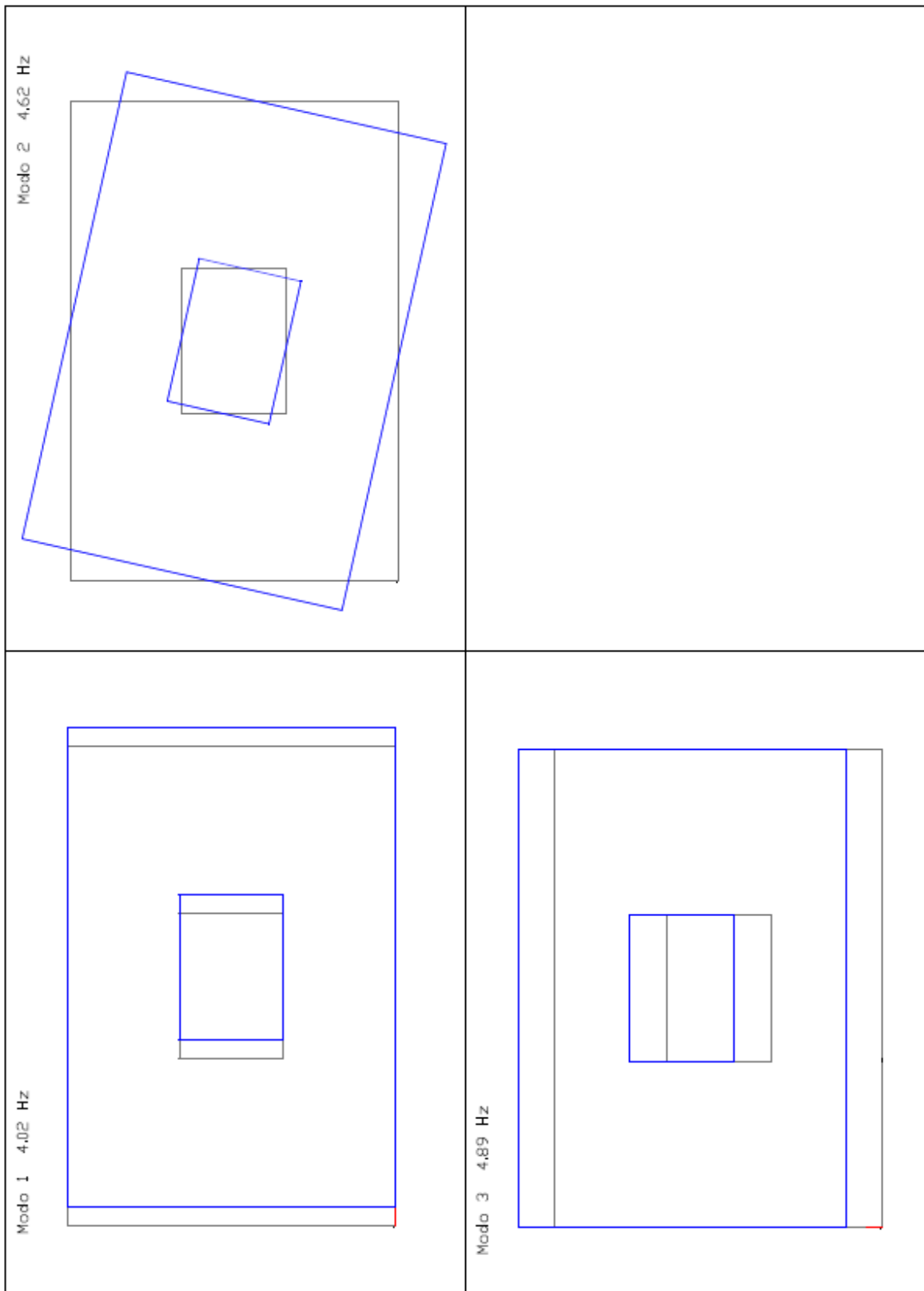


Figura 5.2. 8.- Detalle de las formas modales determinadas

5.2.2.- Unidad Educativa Padre Sojo

a) Instrumentación

Para el día de la instrumentación de esta edificación, se contaba con 2 equipos sismómetros GURALP únicamente, por lo que se requirió de tres arreglos independientes para poder determinar los modos de vibración estructurales. Estos arreglos se dispusieron uno en cada módulo principal de la edificación y el restante consistió de un sismómetro en cada uno de los módulos para verificar el tipo de interacción entre ellos a través de la junta estructural.

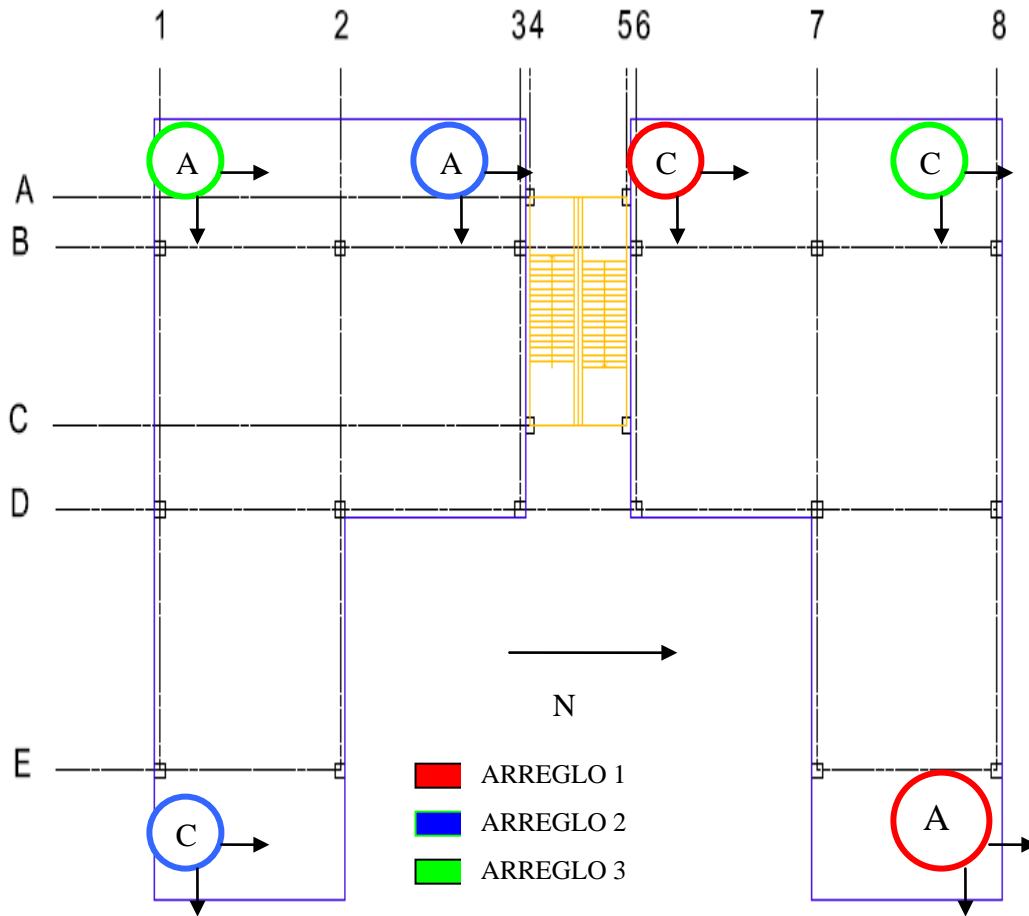


Figura 5.2. 9.- Esquema de instrumentación de la U.E. Padre Sojo

Para esta edificación se supuso comportamiento como diafragma rígido de cada uno de los módulos por separado (2 módulos principales y otro de escaleras) y el tipo de interacción de la junta estructural fue determinada del análisis de los registros.

b) Registro y procesamiento de datos

Los datos fueron adquiridos a una tasa de 200 muestras por segundo durante 30 minutos para cada arreglo y almacenados para su posterior procesamiento mediante el empleo el programa de computación MatLab.

Una vez determinados los espectros de potencia suavizados, se identificaron los picos máximos que indican las componentes frecuenciales predominantes en el registro.

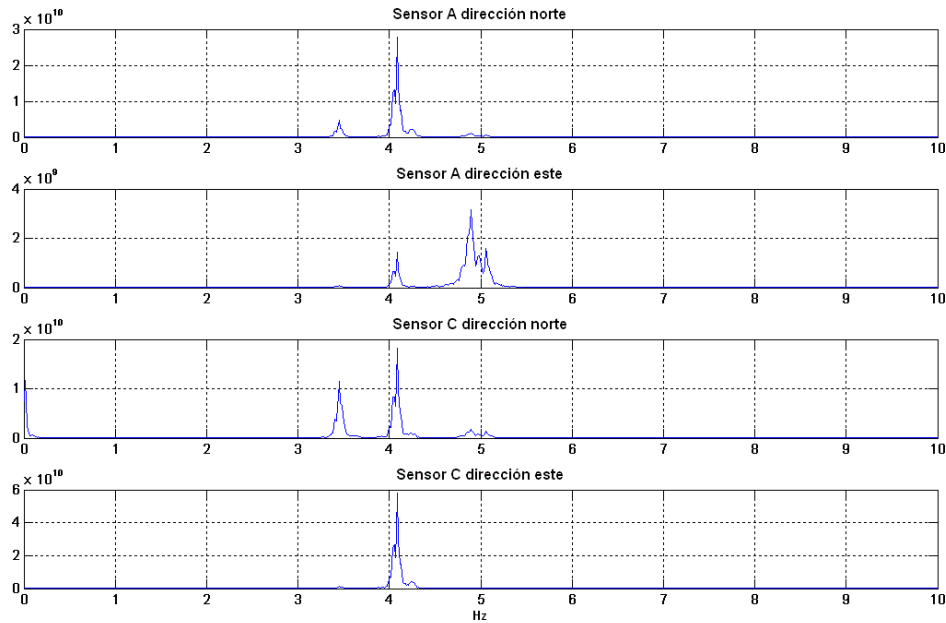


Figura 5.2. 10.- Espectros de potencia Arreglo 1

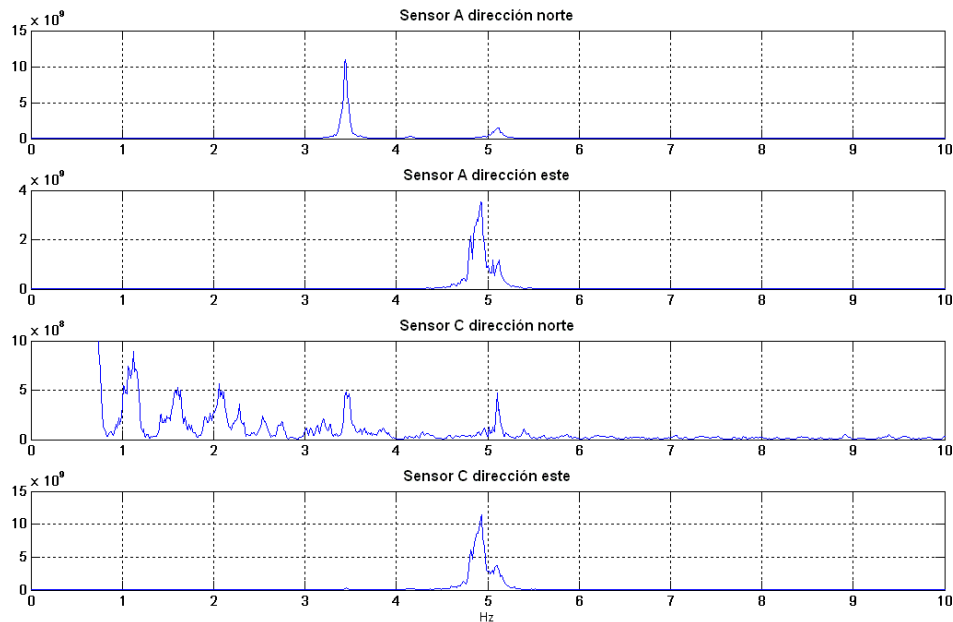


Figura 5.2. 11.- Espectros de potencia Arreglo 2

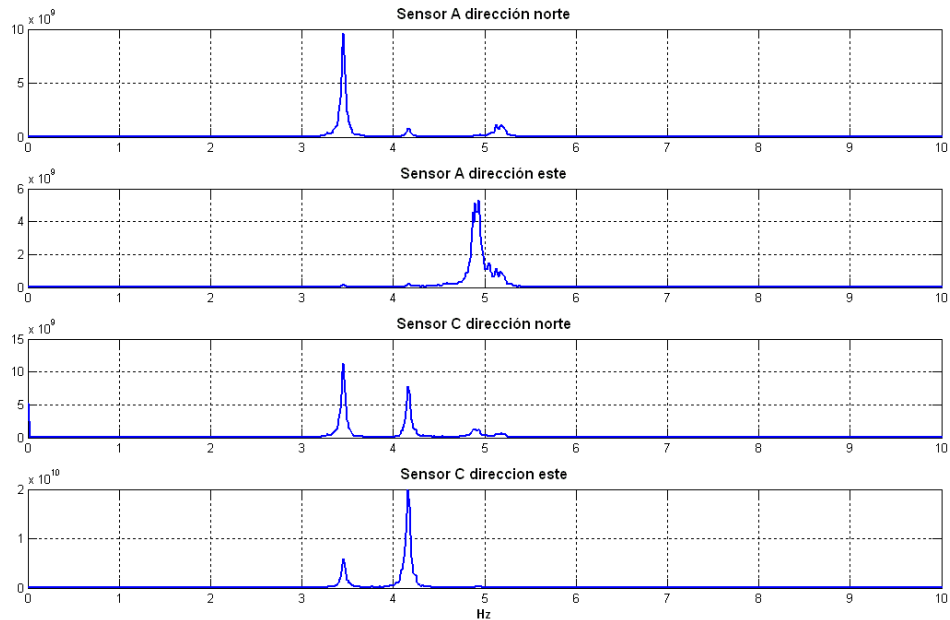


Figura 5.2. 12.- Espectros de potencia Arreglo 3

Luego de identificadas las posibles frecuencias modales, se calculó la densidad espectral cruzada entre varios registros seleccionados, de manera de poder determinar frecuencias comunes y ángulo de fase entre ellos.

El criterio de selección consiste en buscar en los espectros cruzados aquellas frecuencias vistas en los espectros directos y que a su vez presenten ángulos de fase iguales a 0(cero) o a π radianes (180°), lo cual es indicativo de frecuencia de vibración modal.

Se presentan a continuación una colección de gráficas de densidad espectral cruzada para varios registros correspondientes al arreglo 1.

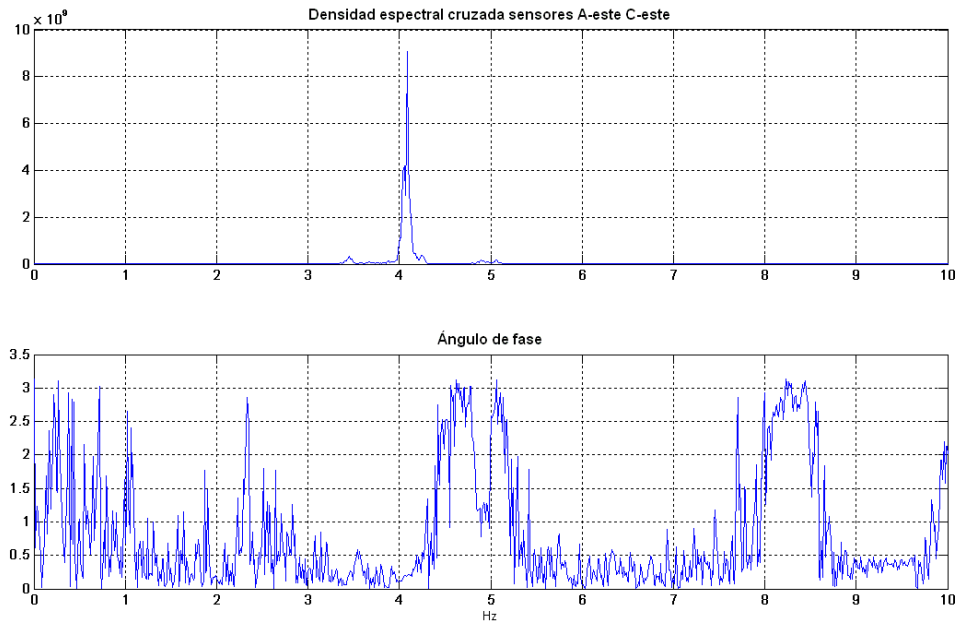


Figura 5.2. 13.- Densidad espectral cruzada sensores A-este C-este

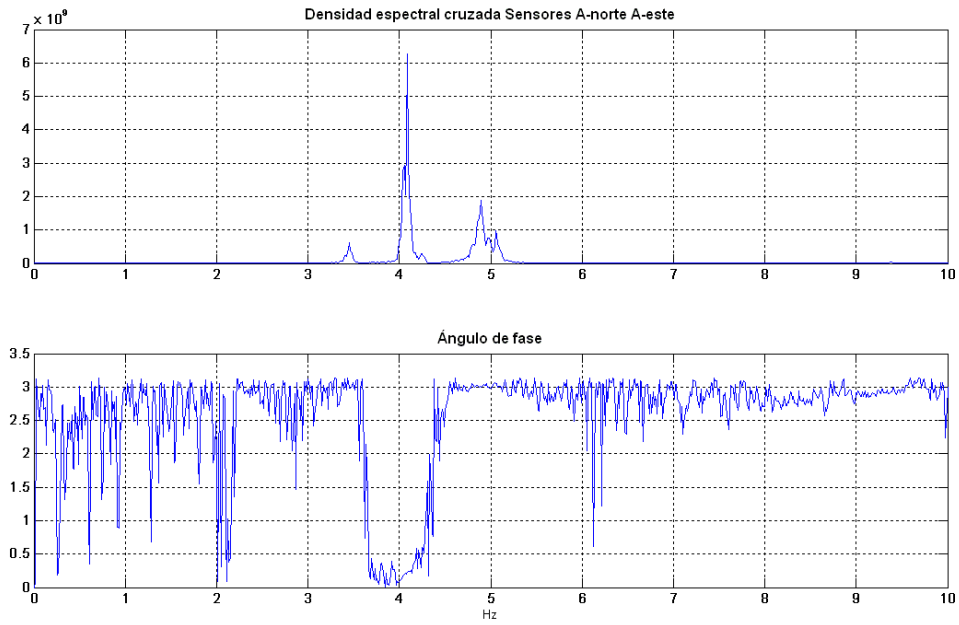


Figura 5.2. 14.- Densidad espectral cruzada sensores A-norte A-este

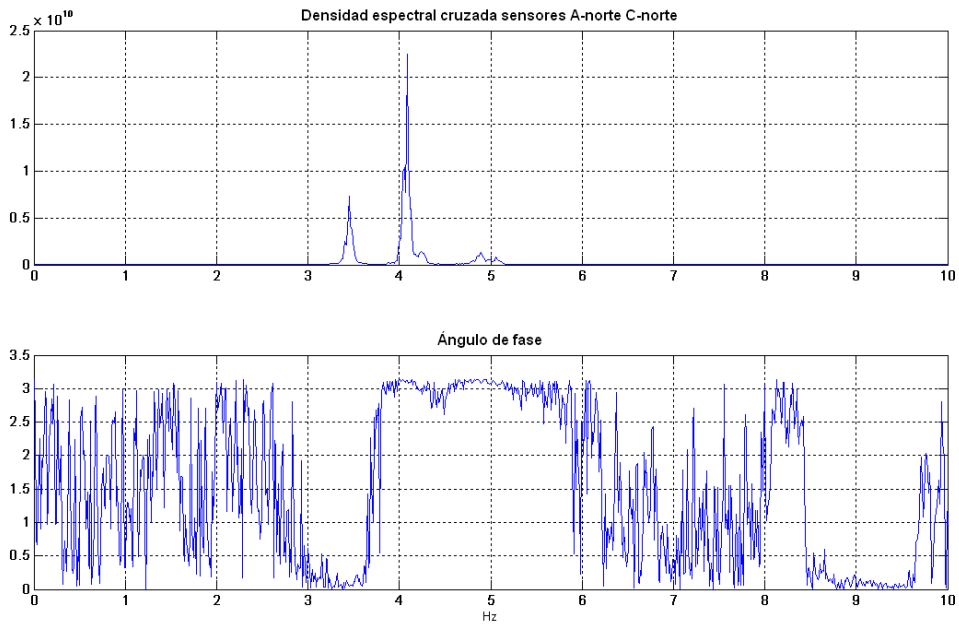


Figura 5.2. 15.- Densidad espectral cruzada sensores A-norte C-norte

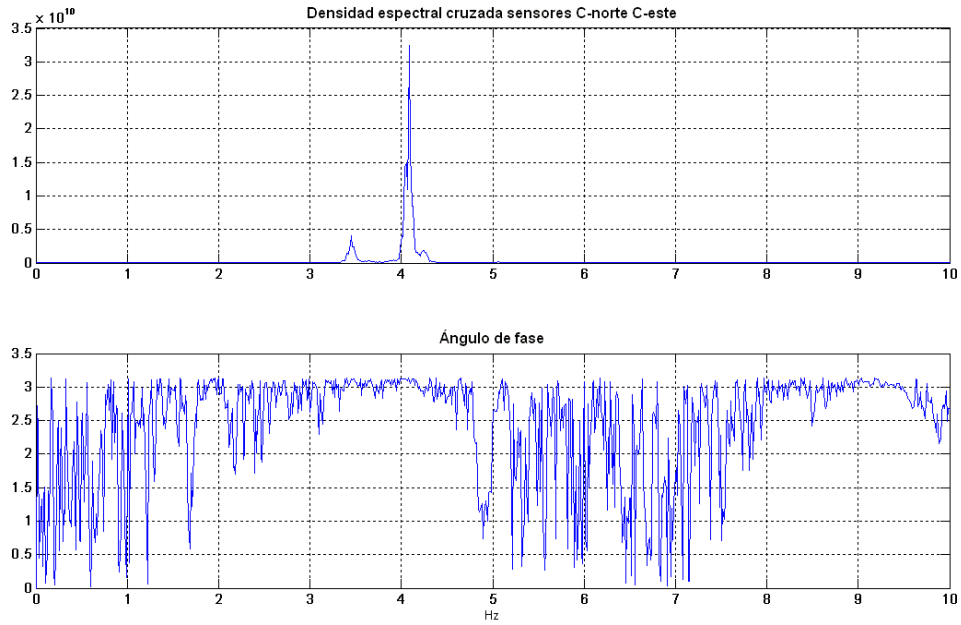


Figura 5.2. 16.- Densidad espectral cruzada sensores C-norte C-este

Gráficas correspondientes al arreglo 2

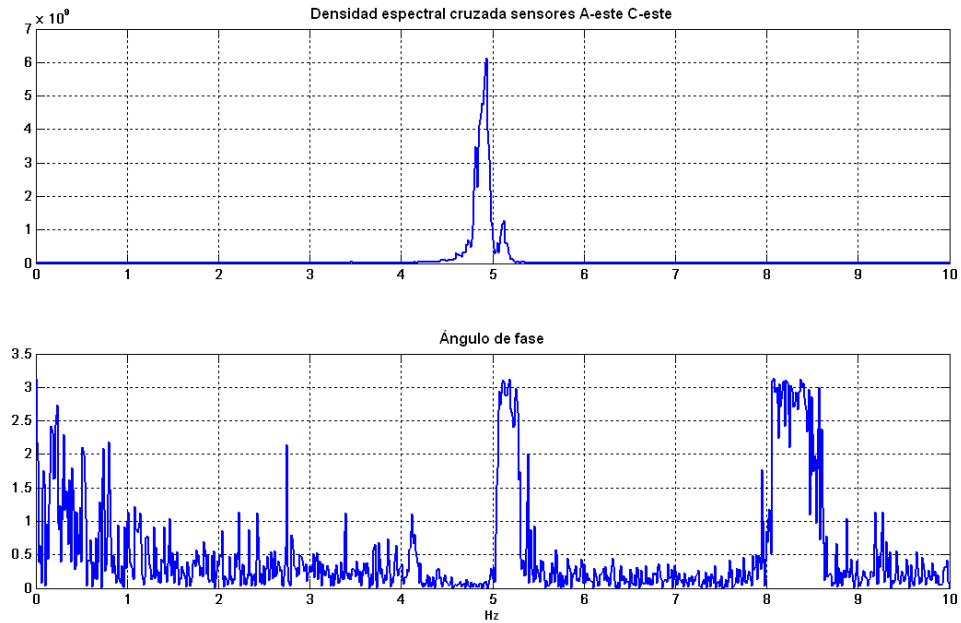


Figura 5.2. 17.- Densidad espectral cruzada sensores A-este C-este

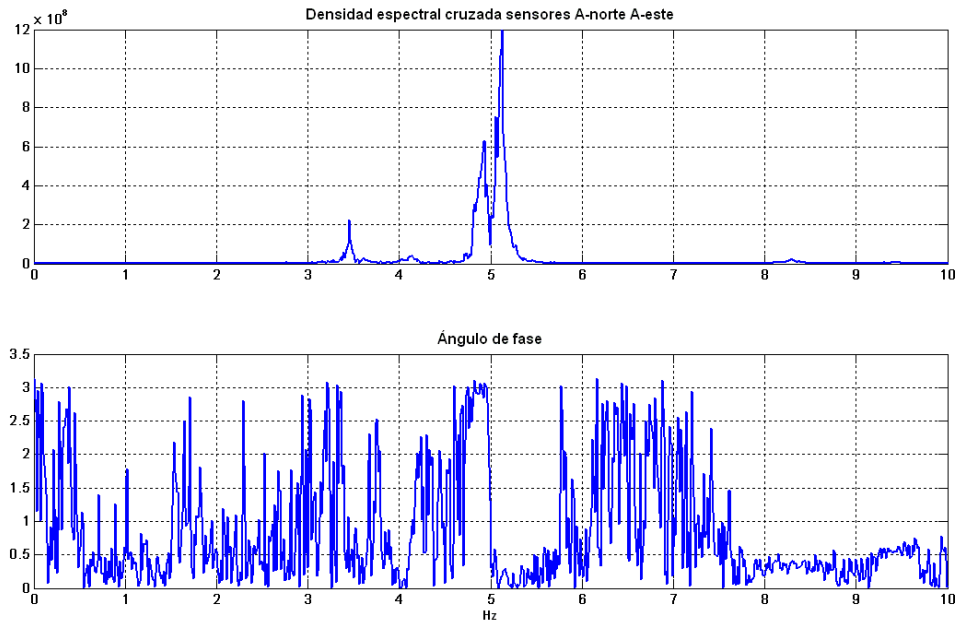


Figura 5.2. 18.- Densidad espectral cruzada sensores A-norte A-este

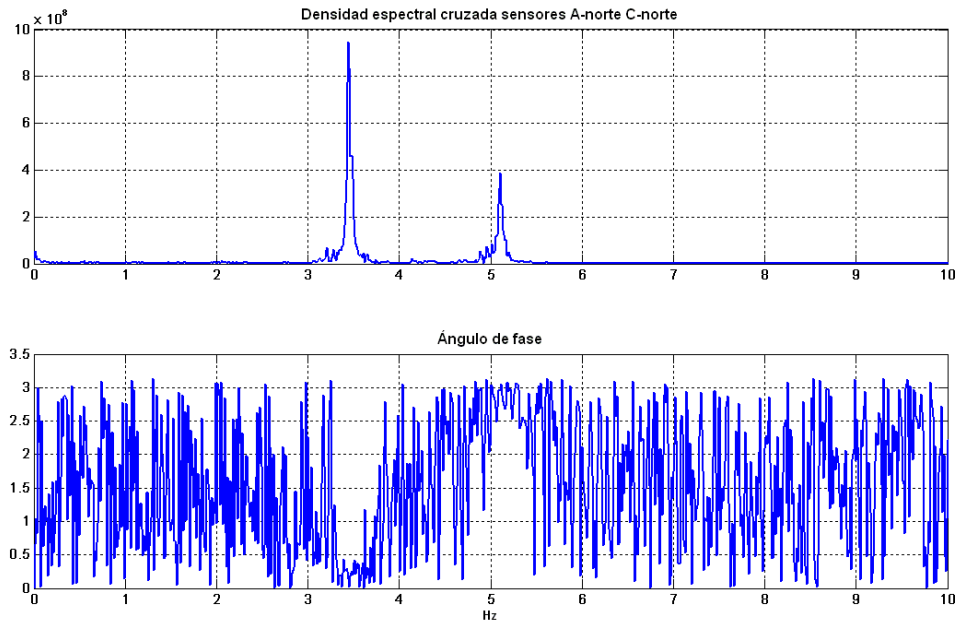


Figura 5.2. 19.- Densidad espectral cruzada sensores A-norte C-norte

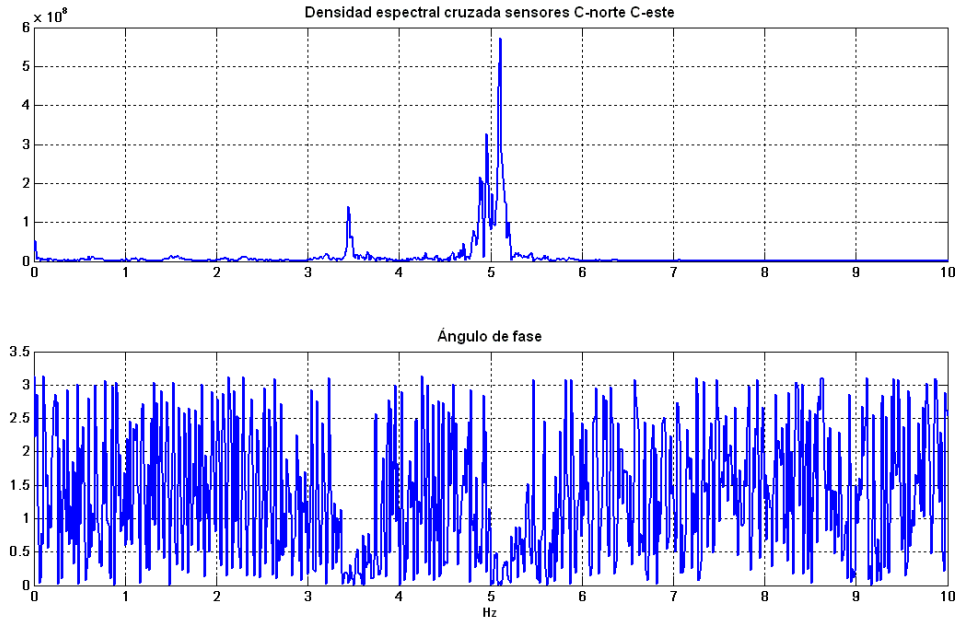


Figura 5.2. 20.- Densidad espectral cruzada sensores C-norte C-este

Gráficas correspondientes al Arreglo 3

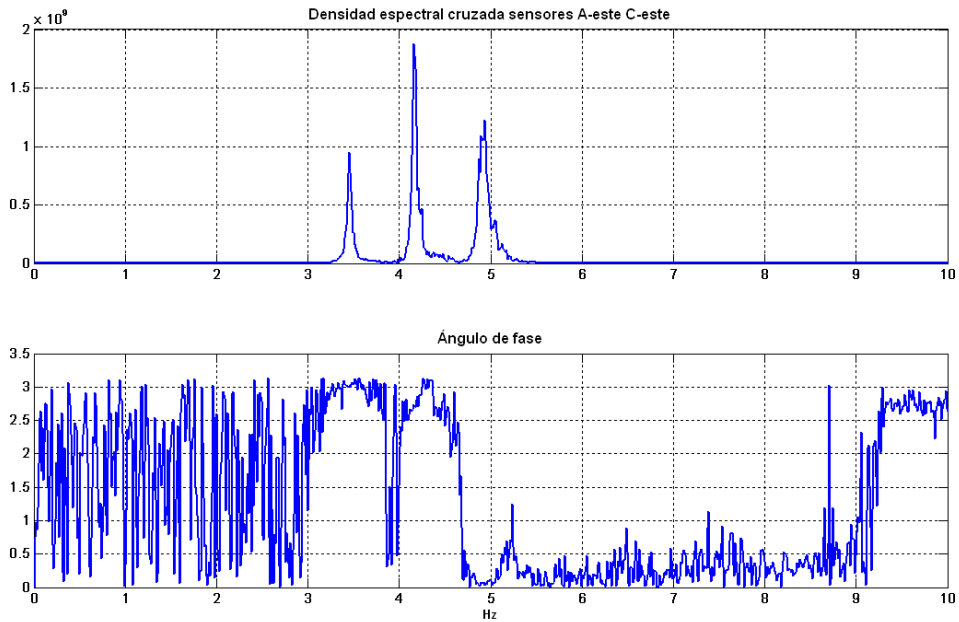


Figura 5.2. 21.- Densidad espectral cruzada sensores A-este C-este

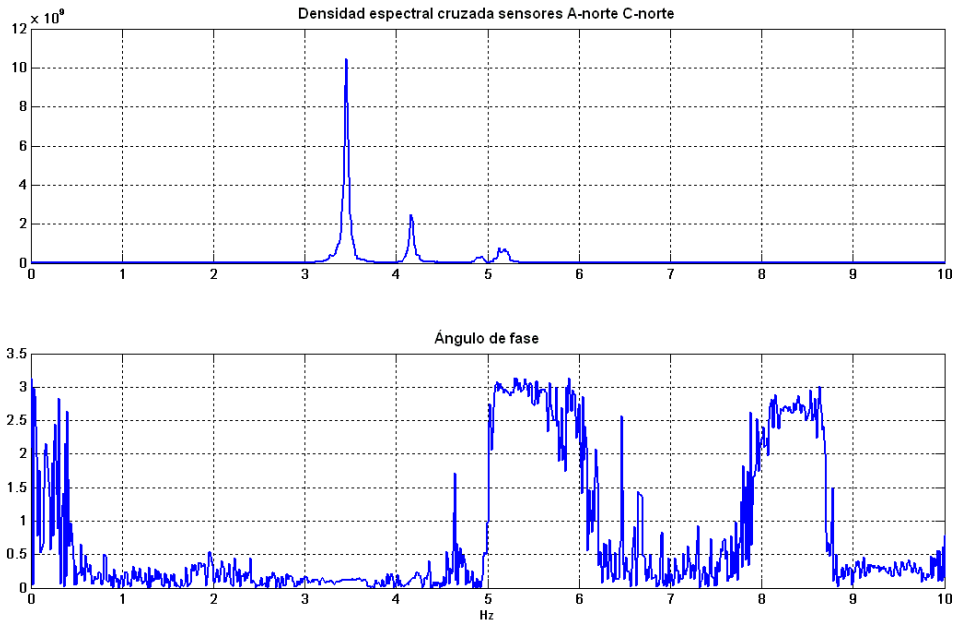


Figura 5.2. 22.- Densidad espectral cruzada sensores A-norte C-norte

c) *Análisis de Resultados*

Se presentan a continuación las tablas con los resultados provenientes de los espectros de potencia y con el análisis de correlación cruzada, resumido este último como fases, las cuales pueden ser positivas o negativas..

Tabla 5.2. 3.- Amplitud de la densidad espectral. Registros del arreglo 1

Amplitud de la densidad espectral					
Arreglo 1	Sensor / registro	Frecuencias detectadas			
		3.45	4.09	4.89	5.05
MÁXIMOS ESPECTRALES	A-este	0	1.60E+09	3.20E+09	1.00E+09
	A-norte	5.00E+09	2.80E+10	1.00E+09	1.00E+09
	C-este	0.00E+00	6.00E+10	0	0.00E+00
	C-norte	1.10E+10	1.80E+10	2.00E+09	1.50E+09
RAICES CUADRADAS NORMALIZADAS	A-este	0.0000	0.1633	0.5657	0.5000
	A-norte	0.6742	0.6831	0.3162	0.5000
	C-este	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
	C-norte	1.0000	0.5477	0.4472	0.6124

Tabla 5.2. 4.- Amplitud de la densidad espectral. Registros del arreglo 2

Amplitud de la densidad espectral					
Arreglo 2	Sensor / registro	Frecuencias detectadas			
		3.45	4.09	4.89	5.05
MÁXIMOS ESPECTRALES	A-este	0	0	3.80E+09	1.20E+09
	A-norte	1.00E+10	5.00E+08	0	2.30E+09
	C-este	0.00E+00	0	1.00E+10	4.00E+09
	C-norte	5.00E+08	0	0.00E+00	4.00E+08
RAICES CUADRADAS NORMALIZADAS	A-este	0.0000	0.0000	0.6164	0.5477
	A-norte	0.9535	0.0913	0.0000	0.7583
	C-este	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000
	C-norte	0.2132	0.0000	0.0000	0.3162

Tabla 5.2. 5.- Amplitud de la densidad espectral. Registros del arreglo 3

Amplitud de la densidad espectral					
Arreglo 3	Sensor / registro	Frecuencias detectadas			
		3.45	4.09	4.89	5.05
MÁXIMOS ESPECTRALES	A-este	0	0	5.00E+09	1.60E+09
	A-norte	1.00E+10	1.00E+09	0	2.00E+09
	C-este	6.00E+09	2.00E+10	0	0
	C-norte	1.10E+10	7.50E+09	2.00E+09	1.00E+09
RAICES CUADRADAS NORMALIZADAS	A-este	0.0000	0.0000	0.7071	0.6325
	A-norte	0.9535	0.1291	0.0000	0.7071
	C-este	0.7385	0.5774	0.0000	0.0000
	C-norte	1.0000	0.3536	0.4472	0.5000

Tabla 5.2. 6.- Análisis de correlación cruzada de registros

Análisis de correlación cruzada de registros						
Arreglo	Sensor / registro	Sensor / registro	Frecuencias detectadas (Hz)			
			3.45	4.09	4.89	5.05
1	A-este	C-este	+	+	n/a	n/a
	A-norte	A-este	-	+	-	-
	A-norte	C-norte	+	-	-	-
	C-norte	C-este	-	-	n/a	n/a
2	A-este	C-este	n/a	n/a	+	-
	A-norte	A-este	+	+	-	+
	A-norte	C-norte	+	n/a	n/a	-
	C-norte	C-este	+	n/a	n/a	+
3	A-este	C-este	-	-	+	n/a
	A-norte	C-norte	+	+	+	-

d) *Conclusiones*

Del análisis de los resultados obtenidos a partir del procesamiento de los datos adquiridos en la medición de propiedades dinámicas de la U.E. Padre Sojo se concluye:

- Los cuatro primeros modos tienen frecuencias de 3.45, 4.09, 4.89 y 5.05 Hz respectivamente con una tolerancia de cálculo de ± 0.0061 Hz puesto que la tasa de muestreo fue de 200 Hz y el número de puntos por ventana igual a 16384 muestras.
- Los modos identificados no tienen un movimiento preferencial sobre algún grado de libertad, más bien son acoplados de torsión con al menos una traslación. Del análisis se deduce que las juntas estructurales están funcionando como medios elásticos de baja rigidez lo cual induce al acoplamiento de los dos módulos principales. Esto se evidencia en el cuarto modo, donde se observan dos registros paralelos concurrentes a ambos lados de la junta estructural presentando un desfase de 180° , lo cual indica que en vez vibrar cada módulo de manera independiente, se muestra el conjunto como un modo estructural de 6 grados de libertad por nivel, 3 en cada módulo.
- El amortiguamiento calculado para el primer modo es 0.7%, para el segundo 0.6%, para el tercero 1.2% y para el cuarto 1.1% del amortiguamiento crítico. Estos amortiguamientos son representativos de vibraciones a baja amplitud y no deben tomarse para análisis estructurales de edificaciones que no vayan a estar sujetas a esta condición.

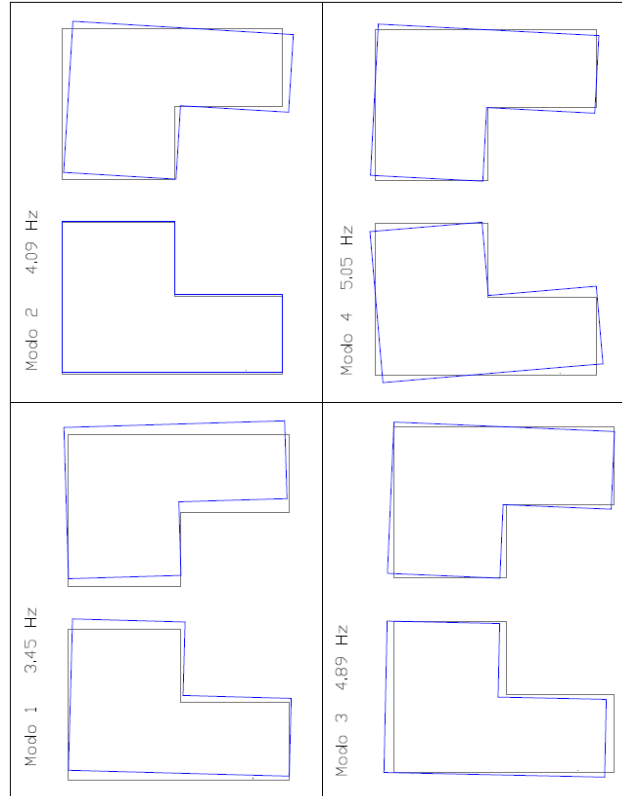


Figura 5.2. 23.- Modos de vibración determinados para la U.E. Padre Sojo.

5.2.3.- Unidad Educativa Luís Alejandro Alvarado.

a) Instrumentación

Esta edificación fue instrumentada con seis sismómetros modelo Ranger SS-1. Se realizaron 3 arreglos, en los cuales, dos de ellos tuvieron la configuración típica de puntos biaxiales de registro (Norte-Este) y el arreglo restante, por el tipo de configuración de planta, consistió en seis puntos uniaxiales paralelos entre sí distribuidos a lo largo de la edificación, de manera de ganar en resolución en el momento de extraer la forma modal.

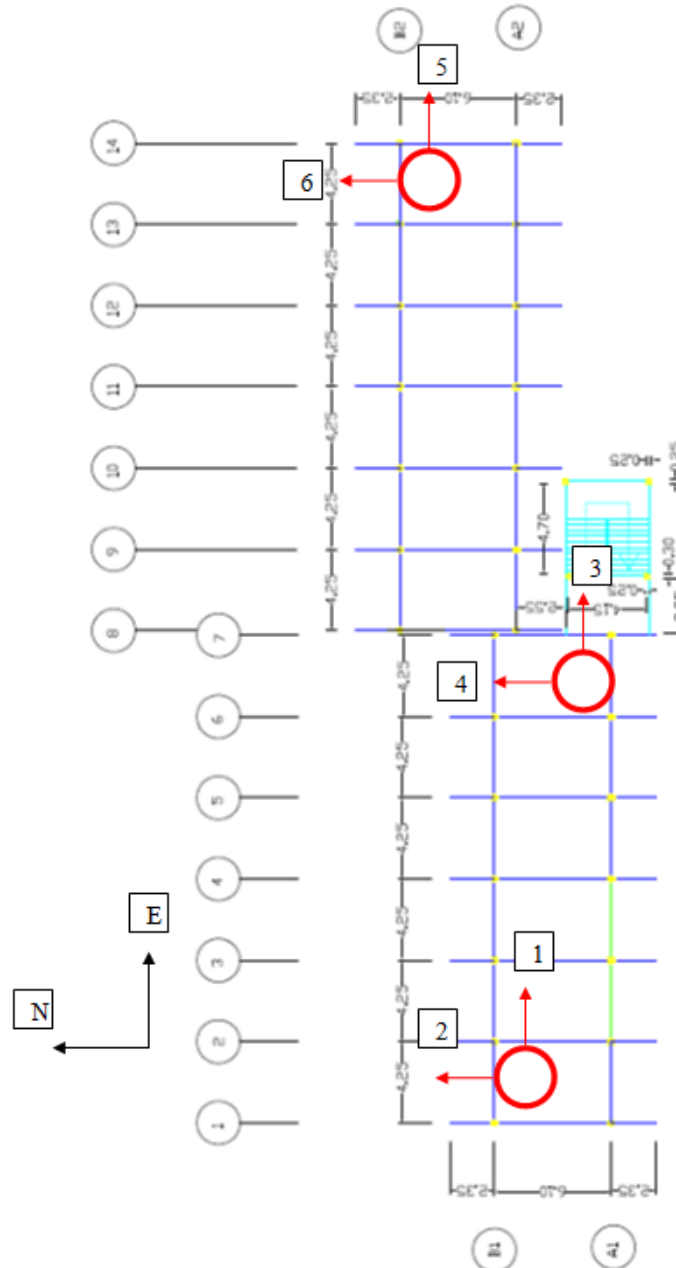


Figura 5.2. 24.- Esquema de instrumentación de la U.E. Luis A. Alvarado. Arreglo 1

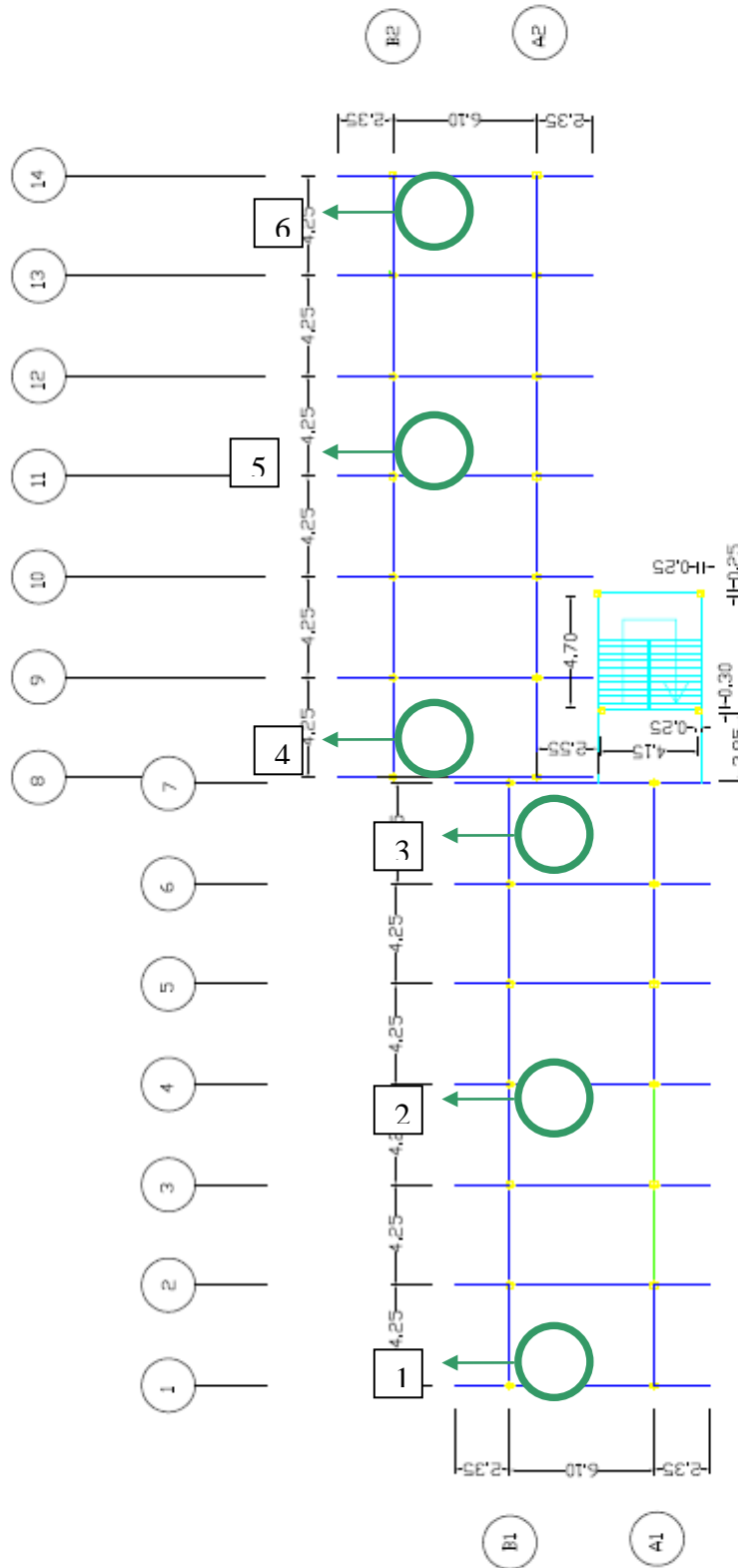


Figura 5.2. 25.- Esquema de instrumentación de la U.E. Luis A. Alvarado. Arreglo 2

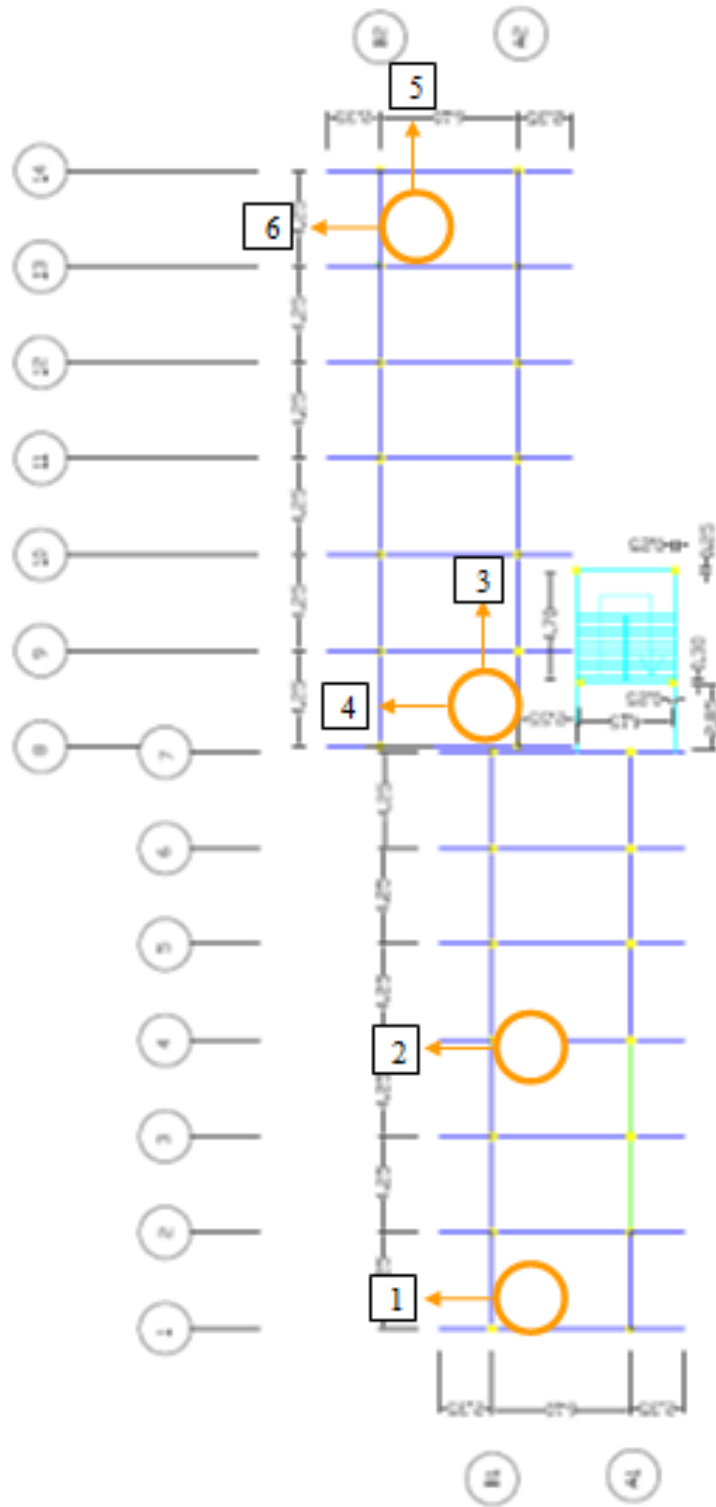


Figura 5.2. 26.- Esquema de instrumentación de la U.E. Luis A. Alvarado. Arreglo 3
b) Registro y procesamiento de datos

Los datos fueron adquiridos a una tasa de 200 muestras por segundo durante 15 minutos para cada arreglo y almacenados para su posterior procesamiento utilizando el programa de computación MatLab.

Una vez determinados los espectros de potencia suavizados, se identificaron los picos máximos que indican las componentes frecuenciales predominantes en el registro.

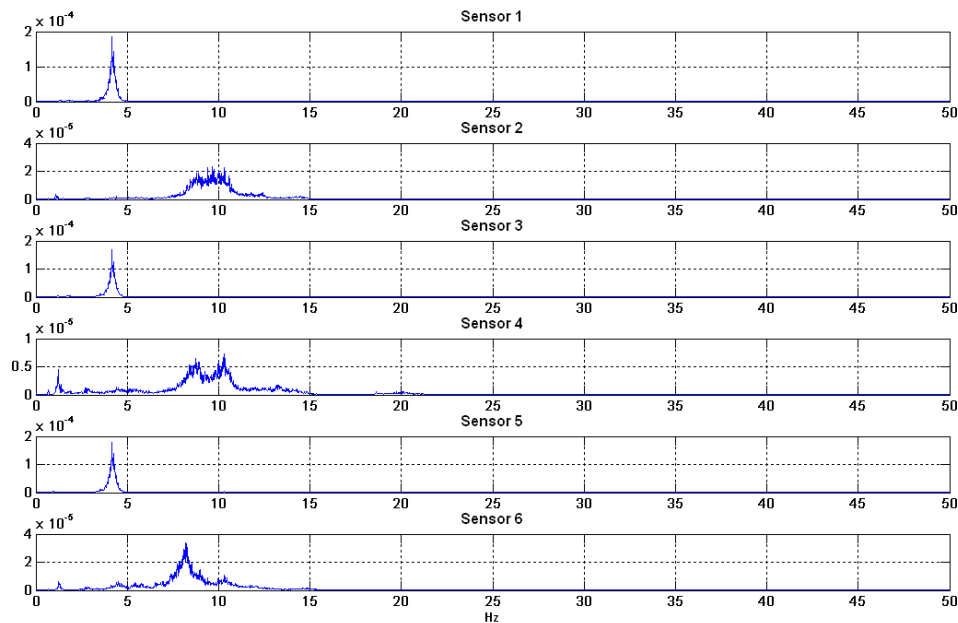


Figura 5.2. 27.- Espectros de potencia. Arreglo 1

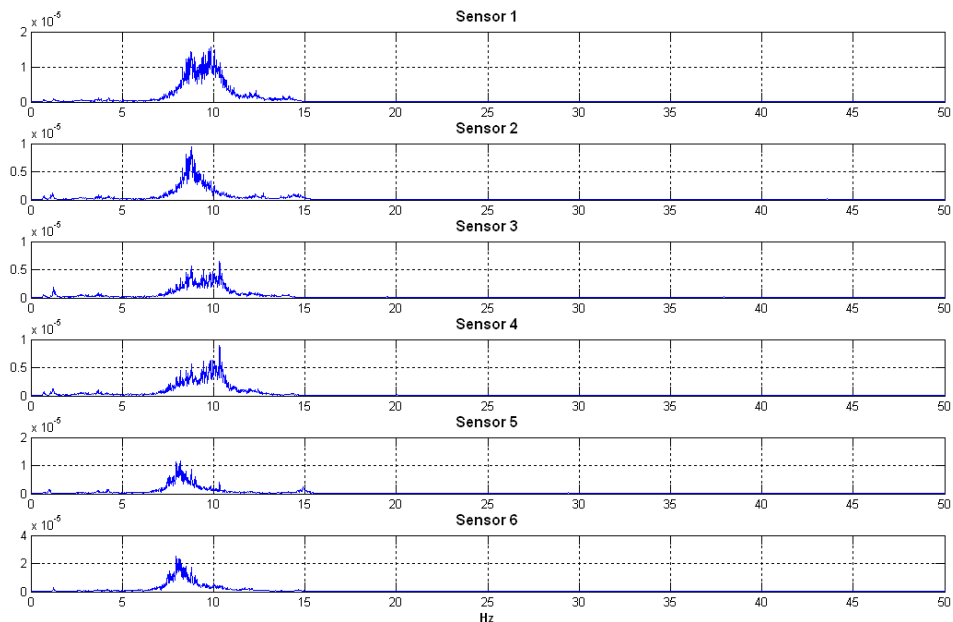


Figura 5.2. 28.- Espectros de potencia. Arreglo 2

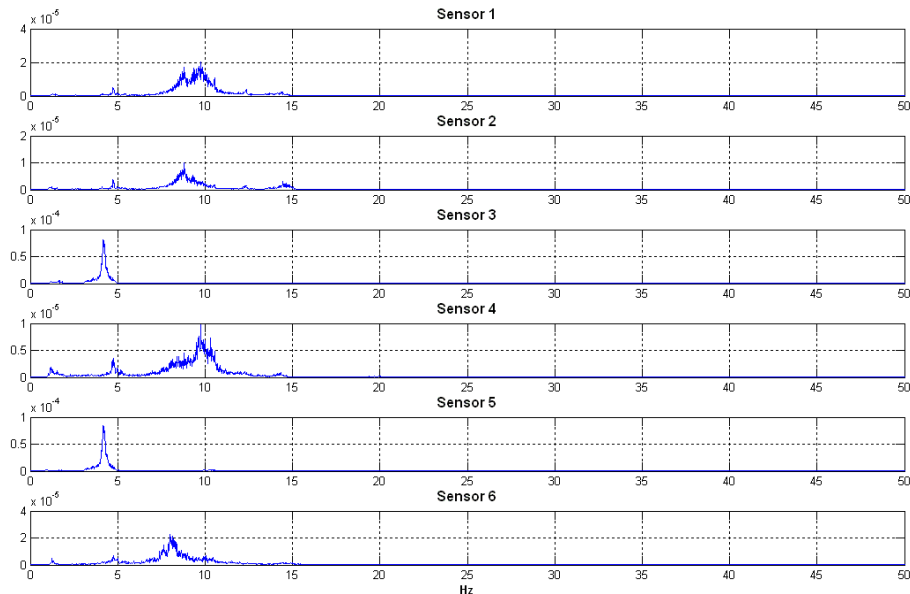


Figura 5.2. 29.- Espectros de potencia. Arreglo 3

Luego de identificadas las posibles frecuencias modales, se calculó la densidad espectral cruzada entre varios registros seleccionados, de manera de poder determinar frecuencias comunes y ángulo de fase entre ellos.

El criterio de selección consiste en buscar en los espectros cruzados aquellas frecuencias vistas en los espectros directos y que a su vez presenten ángulos de fase iguales a 0(cero) o a π radianes (180°), lo cual es indicativo de frecuencia de vibración modal.

Se presentan a continuación una colección de gráficas de densidad espectral cruzada para varios registros correspondientes al arreglo 1

Gráficas correspondientes al arreglo 1

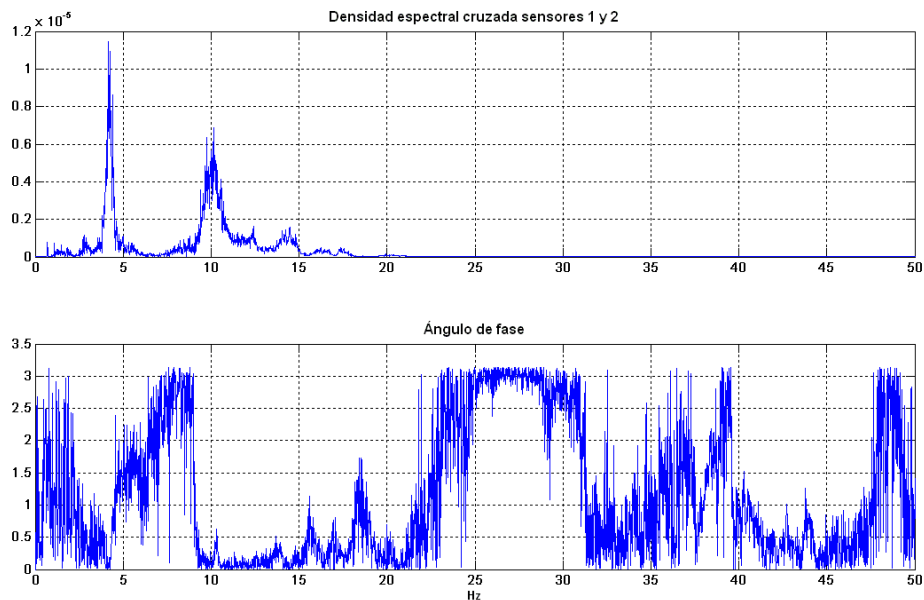


Figura 5.2. 30.- Densidad espectral cruzada canales 1 y 2

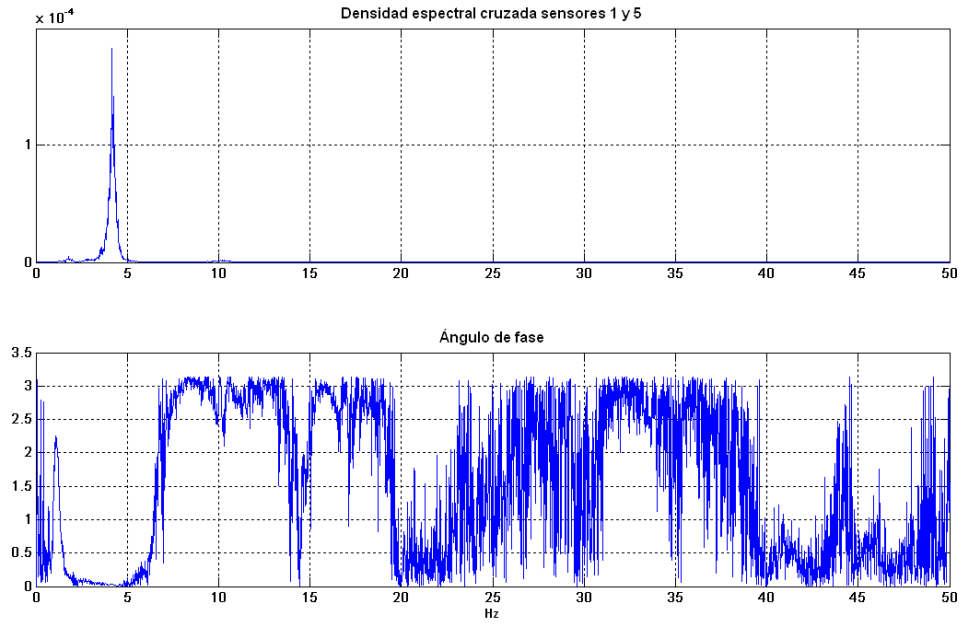


Figura 5.2. 31.- Densidad espectral cruzada canales 1 y 5

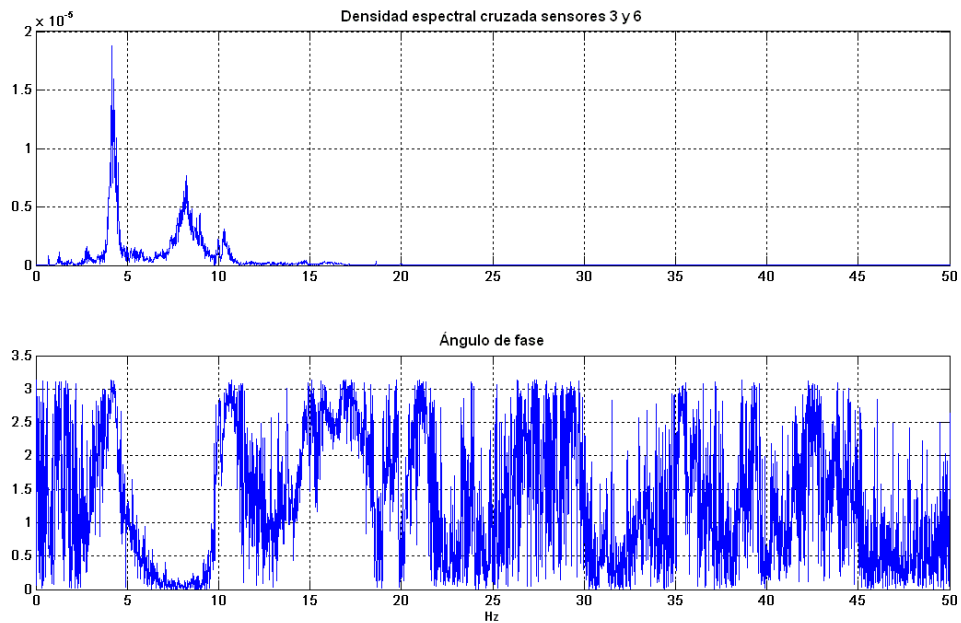


Figura 5.2. 32.- Densidad espectral cruzada canales 3 y 6

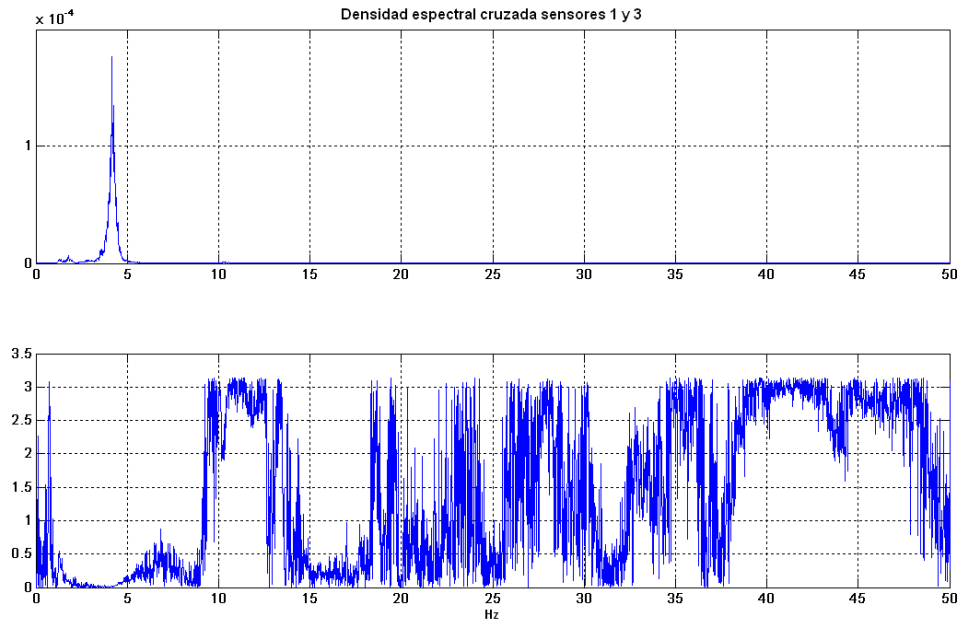


Figura 5.2. 33.- Densidad espectral cruzada canales 1 y 3

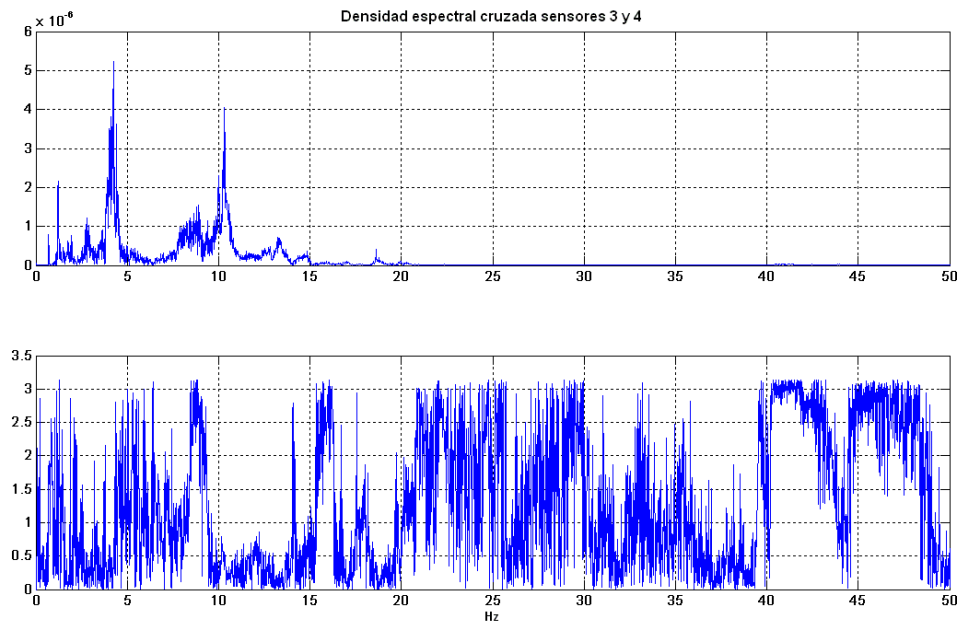


Figura 5.2. 34.- Densidad espectral cruzada canales 3 y 4

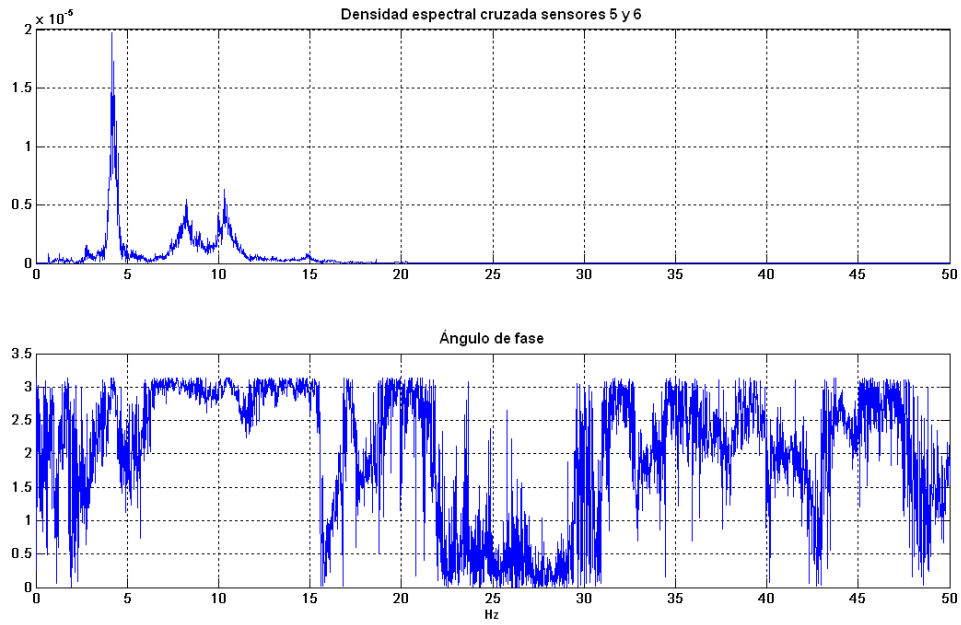


Figura 5.2. 35.- Densidad espectral cruzada canales 5 y 6

Gráficas correspondientes al arreglo 2

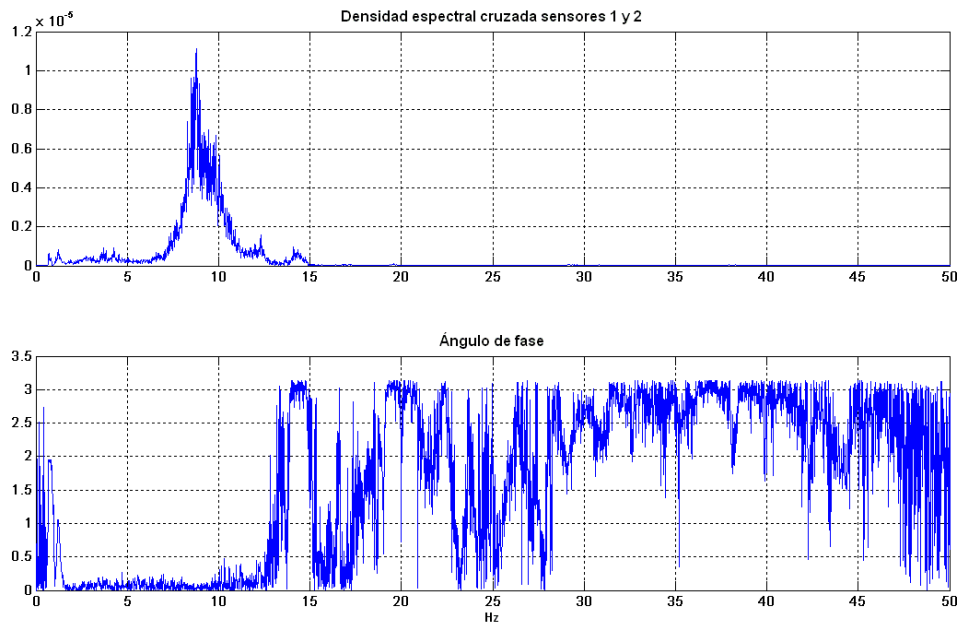


Figura 5.2. 36.- Densidad espectral cruzada canales 1 y 2

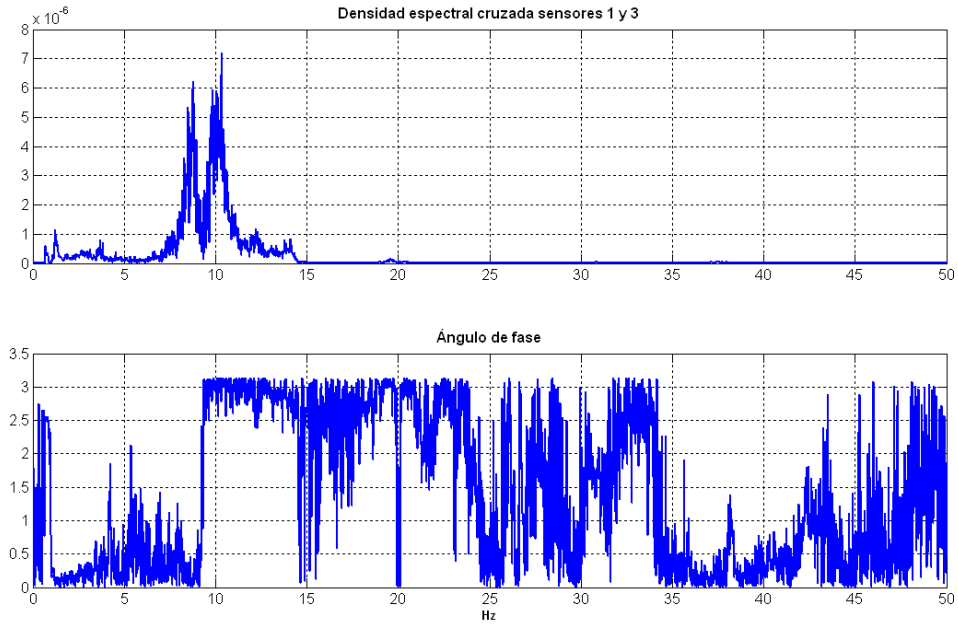


Figura 5.2. 37.- Densidad espectral cruzada canales 1 y 3

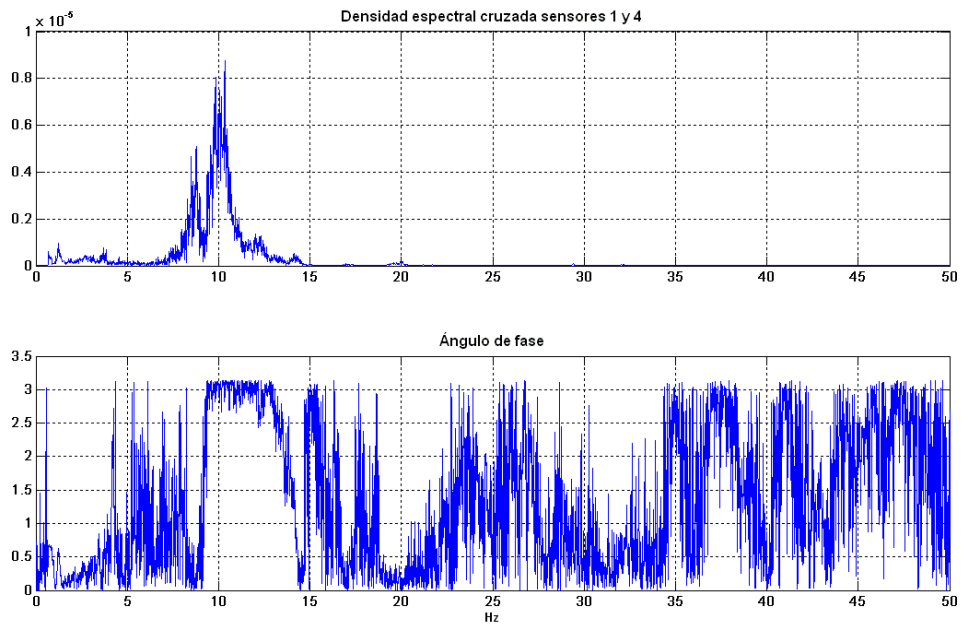


Figura 5.2. 38.- Densidad espectral cruzada canales 1 y 4

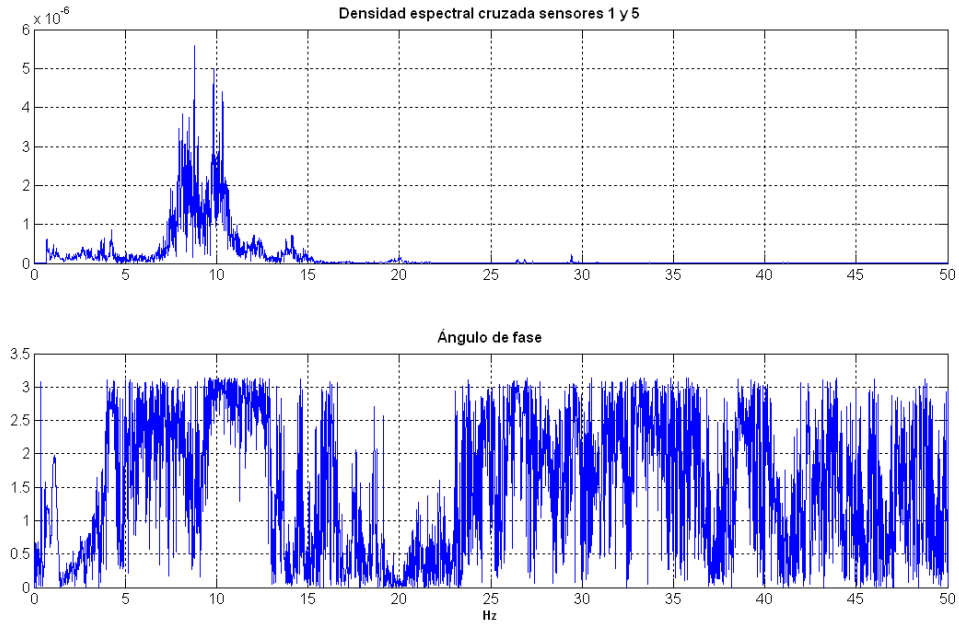


Figura 5.2. 39.- Densidad espectral cruzada canales 1 y 5

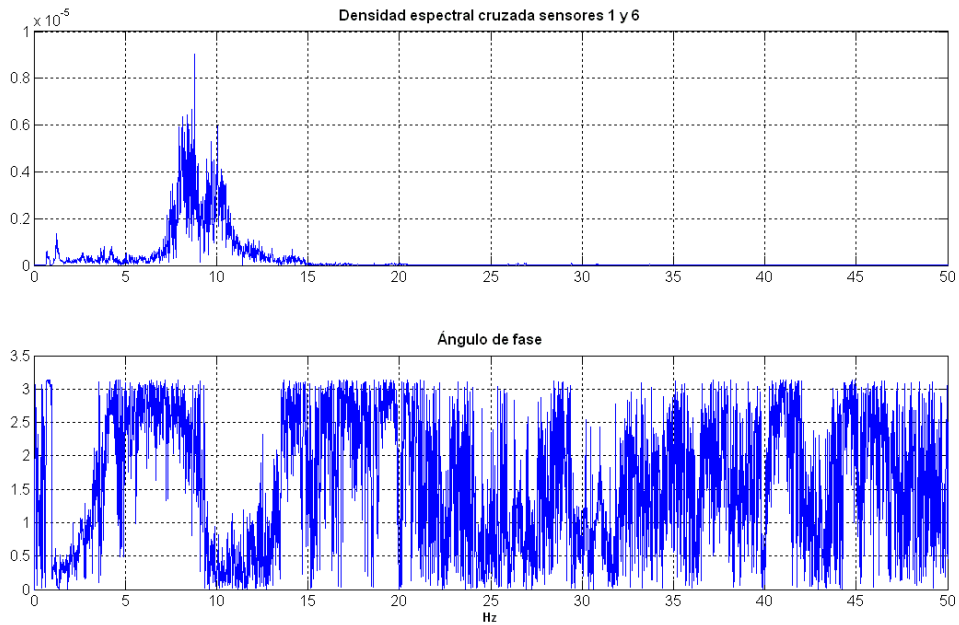


Figura 5.2. 40.- Densidad espectral cruzada canales 1 y 5

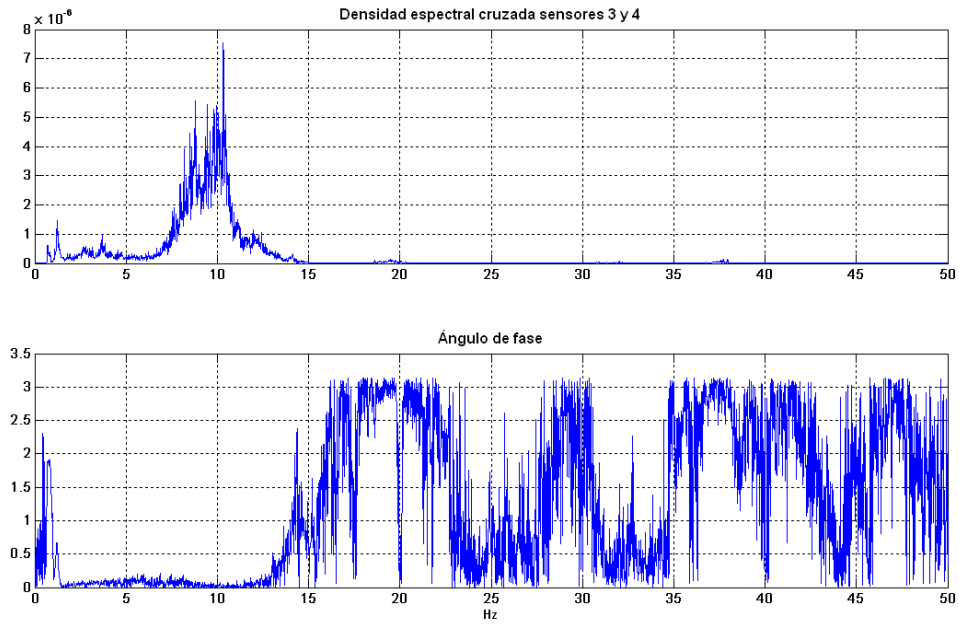


Figura 5.2. 41.- Densidad espectral cruzada canales 3 y 4

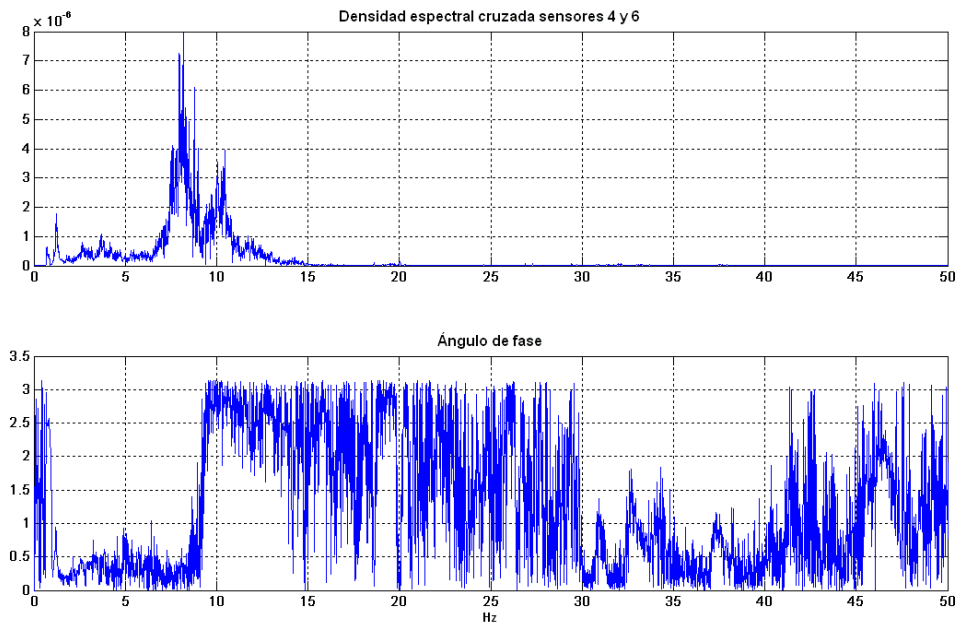


Figura 5.2. 42.- Densidad espectral cruzada canales 4 y 6

Gráficas correspondientes al arreglo 3

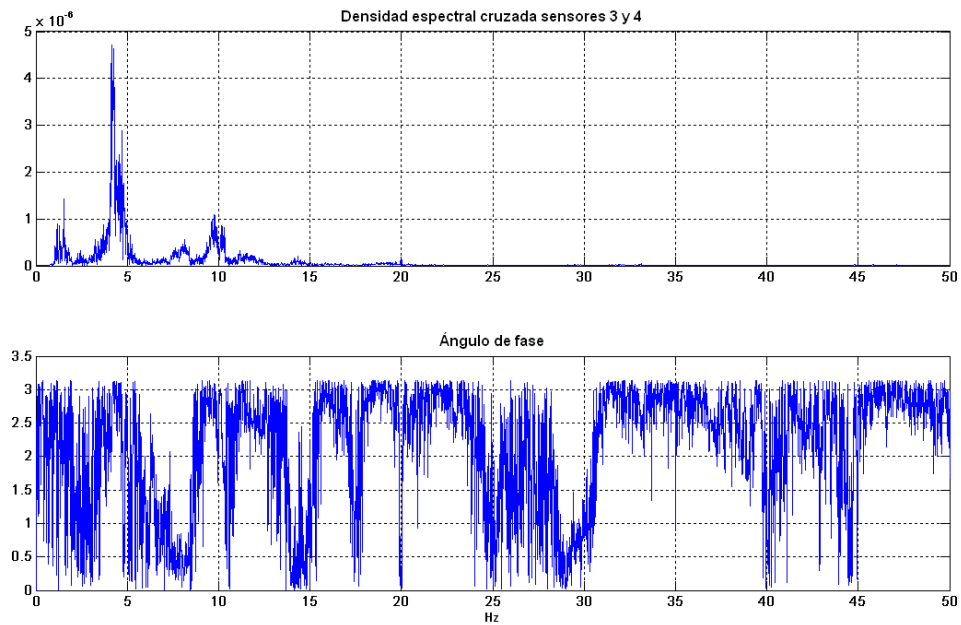


Figura 5.2. 43.- Densidad espectral cruzada canales 3 y 4

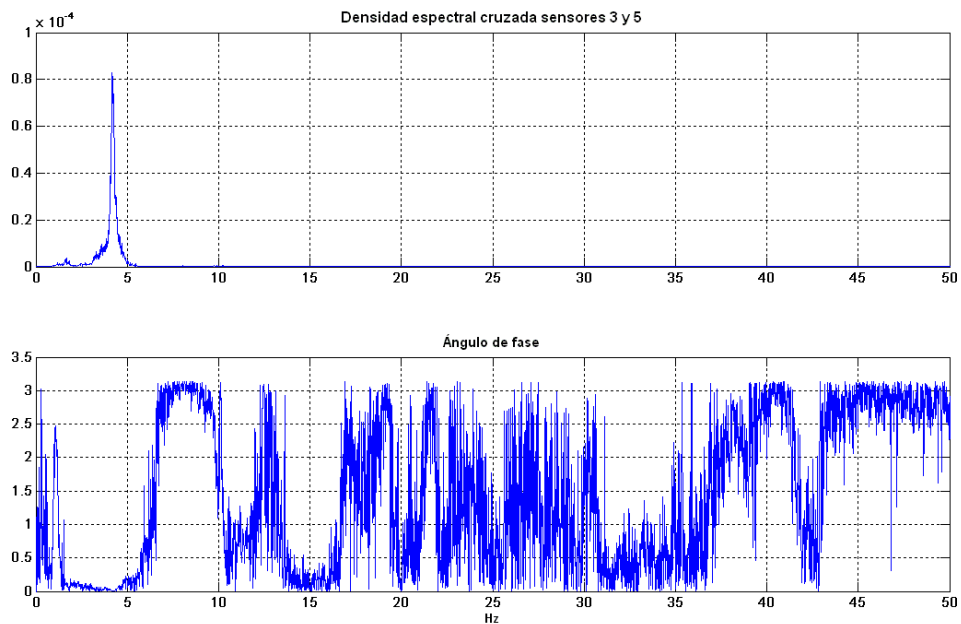


Figura 5.2. 44.- Densidad espectral cruzada canales 3 y 5

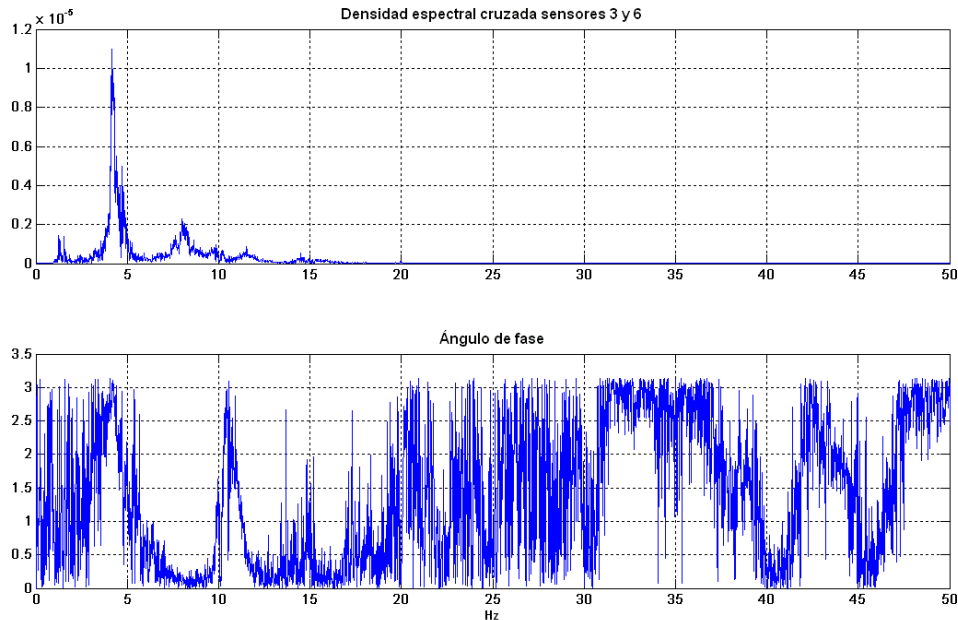


Figura 5.2. 45.- Densidad espectral cruzada canales 3 y 6

c) Análisis de Resultados

Se presentan a continuación las tablas con los resultados provenientes de los espectros de potencia y con el análisis de correlación cruzada, resumido este último como fases, las cuales pueden ser positivas o negativas

Tabla 5.2. 7.- Amplitud de la densidad espectral. Arreglo 1

Amplitud de la densidad espectral					
Arreglo 1	Canal	Frecuencias detectadas			
		4.15	8	8.7	10
MÁXIMOS ESPECTRALES	1	1.90E-04	0	0	0
	2	0	2.00E-06	2.00E-05	1.80E-05
	3	1.70E-04	0	0.00E+00	0
	4	0	4.00E-06	5.00E-06	6.00E-06
	5	1.80E-04	0	0.00E+00	0
	6	0	3.60E-05	1.00E-05	8.00E-06
RAICES CUADRADAS NORMALIZADAS	1	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	2	0.0000	0.2357	1.0000	1.0000
	3	0.9459	0.0000	0.0000	0.0000
	4	0.0000	0.3333	0.5000	0.5774
	5	0.9733	0.0000	0.0000	0.0000
	6	0.0000	1.0000	0.7071	0.6667

Tabla 5.2. 8.- Amplitud de la densidad espectral. Arreglo 2

Amplitud de la densidad espectral					
Arreglo 2	Sensor / registro	Frecuencias detectadas			
		4.15	8	8.7	10
MÁXIMOS ESPECTRALES	1	0	5.00E-06	1.00E-05	1.00E-05
	2	0	2.50E-06	8.00E-06	2.50E-06
	3	0	2.50E-06	5.00E-06	4.00E-06
	4	0	2.50E-06	4.00E-06	5.00E-06
	5	0	1.00E-05	0	1.00E-06
	6	0	2.00E-05	0	1.00E-06
RAICES CUADRADAS NORMALIZADAS	1	0.0000	0.3727	0.7071	0.7454
	2	0.0000	0.2635	0.6325	0.3727
	3	0.0000	0.2635	0.5000	0.4714
	4	0.0000	0.2635	0.4472	0.5270
	5	0.0000	0.5270	0.0000	0.2357
	6	0.0000	0.7454	0.0000	0.2357

Tabla 5.2. 9.- Amplitud de la densidad espectral. Arreglo 3

Amplitud de la densidad espectral					
Arreglo 3	Sensor / registro	Frecuencias detectadas			
		4.15	8	8.7	10
MÁXIMOS ESPECTRALES	1	0	4.00E-06	1.80E-05	1.20E-05
	2	0	4.00E-06	1.00E-05	2.50E-06
	3	8.00E-05	0	0	0
	4	0	3.00E-06	3.00E-06	5.00E-06
	5	8.00E-05	0	0	0
	6	0	1.80E-05	8.00E-06	4.00E-06
RAICES CUADRADAS NORMALIZADAS	1	0.0000	0.3333	0.9487	0.8165
	2	0.0000	0.3333	0.7071	0.3727
	3	0.6489	0.0000	0.0000	0.0000
	4	0.0000	0.2887	0.3873	0.5270
	5	0.6489	0.0000	0.0000	0.0000
	6	0.0000	0.7071	0.6325	0.4714

Tabla 5.2. 10.- Análisis de correlación cruzada de registros

Análisis de correlación cruzada de registros						
Arreglo	Sensor / registro	Sensor / registro	Frecuencias detectadas			
			4.15	8	8.7	10
1	1	2	+	n/a	n/a	+
	3	4		n/a	n/a	n/a
	5	6	-	n/a	-	-
	1	3	+	n/a	n/a	-
	1	5	+	n/a	n/a	-
2	1	2	n/a	+	+	+
	1	3	n/a	n/a	+	-
	3	4	n/a	+	+	+
	4	6	n/a	+	n/a	-
3	3	4	-	-	n/a	-
	3	5	+	-	n/a	-

d) *Conclusiones*

Del análisis de los resultados obtenidos a partir del procesamiento de los datos adquiridos en la medición de propiedades dinámicas de la U.E. Luis A. Alvarado se concluye:

- Los tres primeros modos tienen frecuencias de 4.15, 8~8.7 y 10.10 Hz respectivamente con una tolerancia de cálculo de +/- 0.0061 Hz puesto que la tasa de muestreo fue de 200 Hz y el número de puntos por ventana igual a 16384 muestras. El segundo modo presenta alta dispersión por lo que se presenta como un rango de frecuencias estimado.
- Los modos identificados fueron el primero y el tercero. El primer modo con movimiento principalmente traslacional este y el tercer modo de torsión desfasada entre los dos módulos con ligera traslación en dirección norte. Del análisis se deduce que las juntas estructurales están funcionando como medios elásticos de baja rigidez lo cual induce al acoplamiento de los dos módulos principales. Esto se evidencia en el tercer modo, donde se observan dos registros paralelos concurrentes a ambos lados de la junta estructural presentando un desfase de 180°, lo cual indica que en vez vibrar cada módulo de manera independiente, lo hacen en conjunto como un modo estructural de 6 grados de libertad por nivel, 3 en cada módulo. El segundo modo de vibración no pudo ser determinado debido a la dispersión de los datos.
- El amortiguamiento calculado para el primer modo es 2.51% y para el tercero 10.6% del amortiguamiento crítico. Estos amortiguamientos son representativos de vibraciones a baja amplitud y no deben tomarse para análisis estructurales de edificaciones que no vayan a estar sujetas a esta condición. Se presume que la

presencia de mayor porcentaje de mampostería en la dirección norte haya influido en el incremento del amortiguamiento en esa dirección.

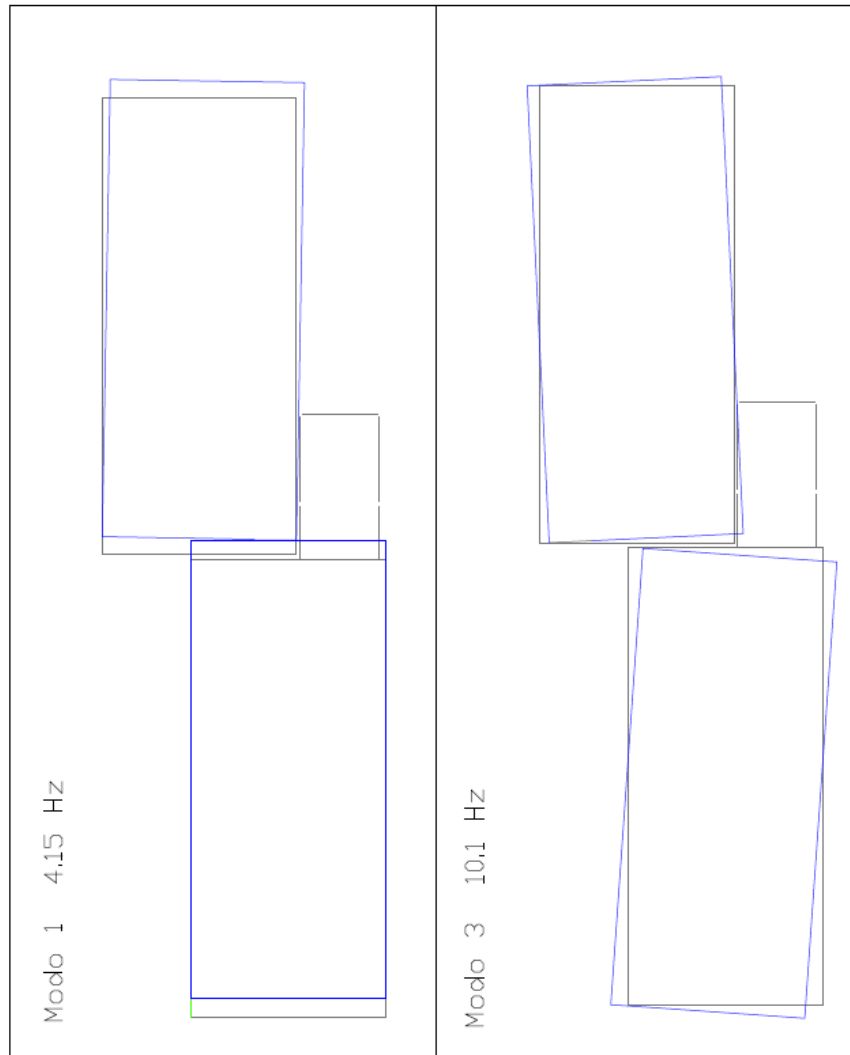


Figura 5.2. 46.- Formas modales determinadas para la U.E. Luis A. Alvarado

5.2.4.- U.E. Experimental Venezuela

a) Instrumentación

La U.E. Experimental Venezuela fue instrumentada con dos sismómetros GURALP, por lo que se requirió de dos arreglos para contar con el número de grados de libertad suficientes para la determinación de las formas modales.

La estructura que compone la escuela en cuestión consta de dos módulos principales unidos por una junta estructural. Cada uno de los módulos presenta un gran porcentaje de abertura en las losas de entrepiso lo que impide asumir la hipótesis de diafragma rígido a menos que sea corroborada por una instrumentación más rigurosa.

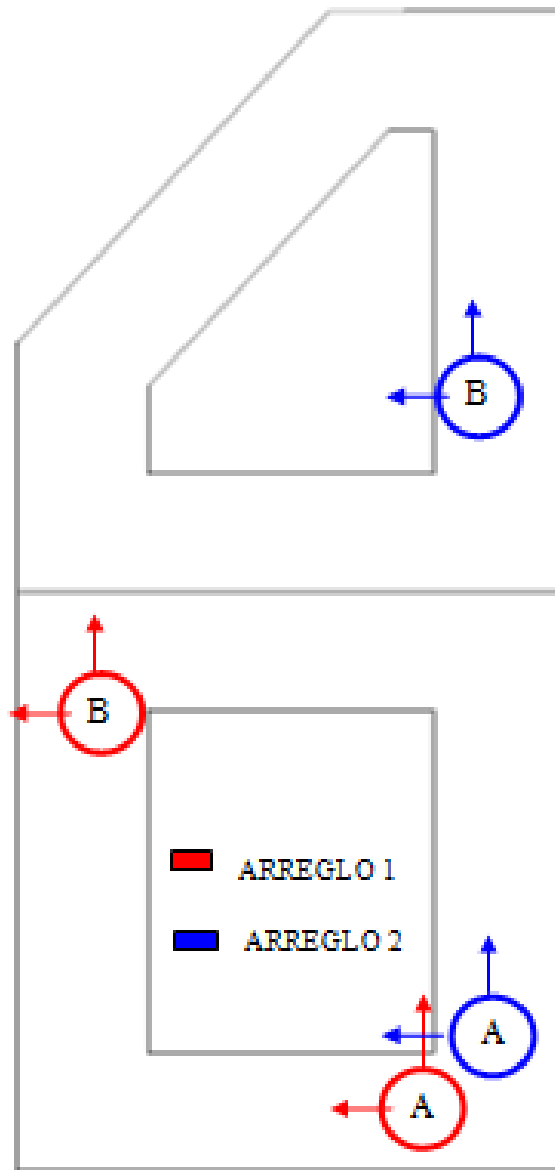


Figura 5.2. 47.- Esquema de instrumentación. U.E. Experimental Venezuela.

b) *Registro y procesamiento de datos*

Los datos fueron adquiridos a una tasa de 200 muestras por segundo durante 30 minutos para cada arreglo y almacenados para su posterior procesamiento utilizando el programa de computación MatLab.

Una vez determinados los espectros de potencia suavizados, se identificaron los picos máximos que indican las componentes frecuenciales predominantes en el registro.

Luego de identificadas las posibles frecuencias modales, se calculó la densidad espectral cruzada entre varios registros seleccionados, de manera de poder determinar frecuencias comunes y ángulo de fase entre ellos. Para este caso particular no se pudieron

conseguir modos de vibración coherentes, básicamente por el comportamiento como diafragma flexible, por lo que no se presentan las gráficas de espectros cruzados.

Se presenta a continuación la gráfica de densidad espectral de los registros obtenidos.

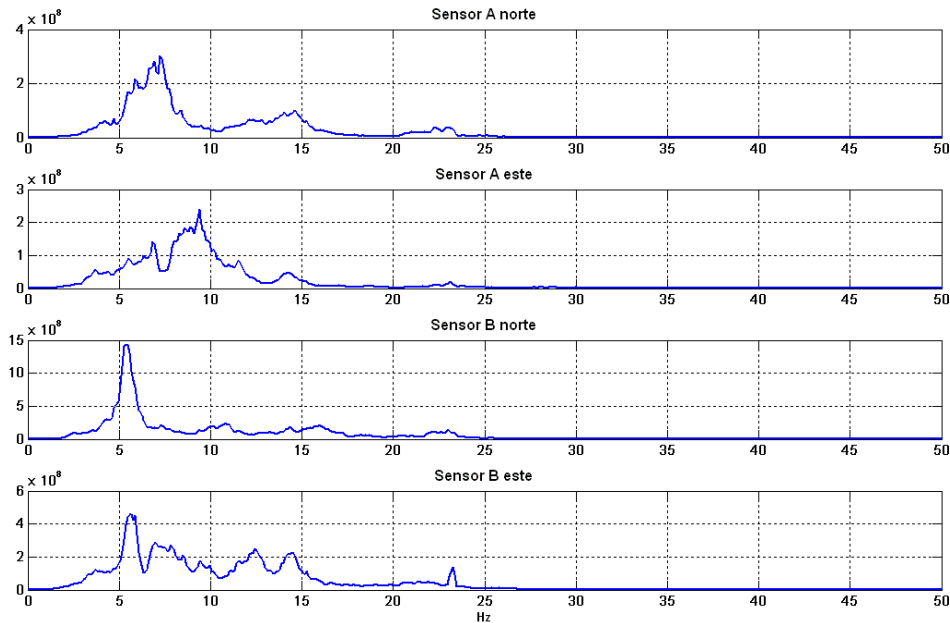


Figura 5.2. 48.- Espectros de potencia. Arreglo 1

c) *Análisis de resultados*

Se presentan a continuación las tablas con los resultados provenientes de los espectros de potencia.

Tabla 5.2. 11.- Amplitud de la densidad espectral. Arreglo 1

Amplitud de la densidad espectral				
Arreglo 1	Sensor / registro	Frecuencias detectadas		
		5.2	7.5	9.5
MAXIMOS ESPECTRALES	A-este	8.00E+07	5.00E+07	2.00E+08
	A-norte	2.00E+08	3.00E+08	3.00E+07
	B-este	4.80E+08	0	2.00E+08
	B-norte	1.50E+09	3.00E+08	2.00E+08
RAICES CUADRADAS NORMALIZADAS	A-este	0.2309	0.4082	1.0000
	A-norte	0.3651	1.0000	0.3873
	B-este	0.5657	0.0000	1.0000
	B-norte	1.0000	1.0000	1.0000

d) *Conclusiones*

De la medición de propiedades dinámicas en la U.E. Experimental Venezuela se puede concluir lo siguiente:

Se detectaron 3 frecuencias que posiblemente puedan ser modos estructurales, sin embargo su condición de modo estructural no puede ser comprobada por la dispersión en los datos obtenidos (frecuencias y fases), posiblemente atribuida a la gran rigidez de la estructura y a la combinación de dos módulos de diafragma flexible a través de una junta estructural. Las frecuencias detectadas son 5.2 Hz, 7.5 Hz y 9.5 Hz.

A pesar de que se realizó el estudio de correlación cruzada, no se consiguió información suficiente para establecer las formas modales, principalmente por contar con menos grados de libertad por planta de los que realmente existen. Un modelo más realista pudiera asumir 12 grados de libertad en el módulo rectangular y 6 grados de libertad adicionales en el módulo triangular, asumiendo entonces subdiafragmas que se puedan considerar rígidos localmente mas no como un conjunto.

Se logró determinar el amortiguamiento para las dos primeras frecuencias. 8% para 5.2 Hz y 16 % para 7.5 Hz. Se presume que la importante contribución de la mampostería en el comportamiento dinámico de esta estructura pueda ser la razón del incremento en el amortiguamiento en relación a los que se obtuvieron en los otros casos.

5.2.5.- Unidad Educativa Playa Grande

a) *Instrumentación*

Se realizó un arreglo con seis sismómetros, el arreglo consistió en la instalación de los equipos en el nivel de techo de la edificación como se indica (Fig.5.11) con el fin de identificar los 3 primeros modos de vibración derivados de la suposición de comportamiento de dicho nivel como diafragma rígido en su plano, con 3 grados de libertad dinámicos. Los datos de este arreglo fueron adquiridos de manera simultánea sincronizados a través del sistema VSS-3000.

El criterio de selección de sitios para la colocación de los sismómetros se fundamentó en cubrir con registros biaxiales, como mínimo, dos esquinas opuestas del entrepiso en estudio, de manera de obtener frecuencias traslacionales y torsionales. Adicionalmente se instalaron dos sismómetros en puntos intermedios a lo largo del eje estructural de mayor longitud para obtener información redundante que permitiera realizar verificaciones en caso de que se hicieran necesarias.



Figura 5.2. 49.- Vista del módulo de la U.E. Playa Grande.

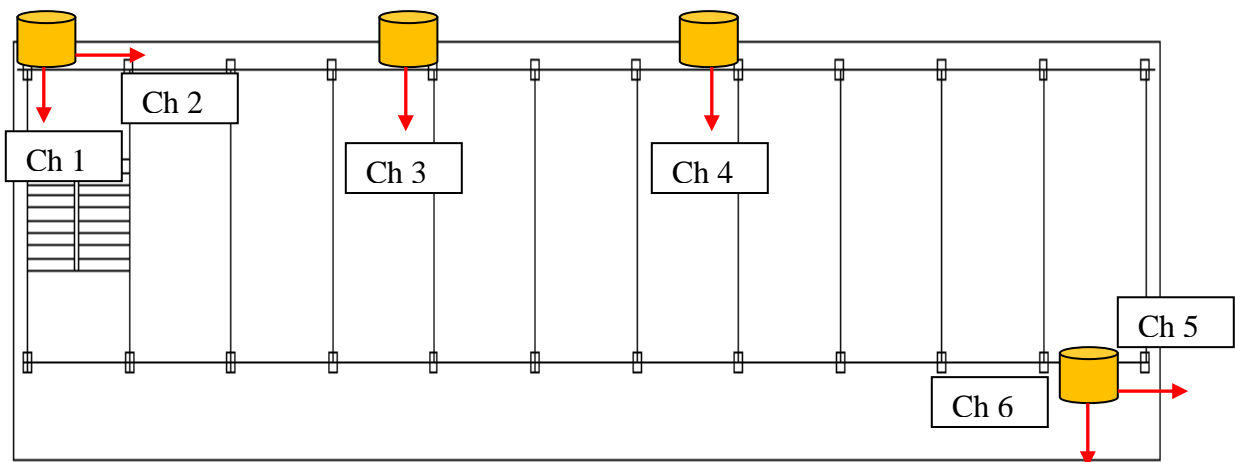


Figura 5.2. 50.- Esquema de instrumentación para la U.E. Playa Grande



Figura 5.2. 51.- Vista de los sensores Ch 1 y Ch 2



Figura 5.2. 52.- Instalación de los sensores Ch 3 y Ch 4

b) Registro y procesamiento de datos

Los datos fueron adquiridos a una tasa de 200 muestras por segundo durante 55 minutos y almacenados para su posterior procesamiento mediante el empleo del programa de computación MatLab [THE MATHWORKS]

Una vez determinados los espectros de potencia suavizados, se identificaron los picos máximos que indican las componentes frecuenciales predominantes en el registro.

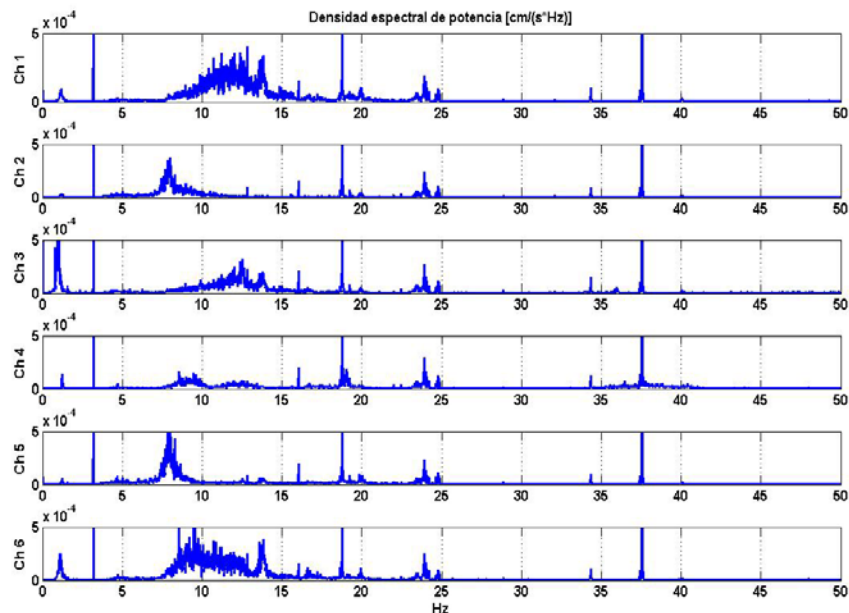


Figura 5.2. 53.- Espectros de potencia U.E. Playa Grande.

Luego de identificadas las posibles frecuencias modales, se calculó la densidad espectral cruzada entre varios registros seleccionados, de manera de poder determinar frecuencias comunes y ángulo de fase entre ellos. El criterio de selección consiste en buscar

en los espectros cruzados aquellas frecuencias vistas en los espectros directos, que a su vez presenten ángulos de fase iguales a 0(cero) o a π radianes (180°), lo cual es indicativo de frecuencia de vibración modal.

Se presenta también el análisis de correlación cruzada de los dos registros rotacionales para detección de diafragma rígido, así como la media cuadrática acumulada para algunos registros en el dominio de la frecuencia, cuya diferencia tomada en el ancho de banda de cada pico detectado, sirve de estimador de la media cuadrática de dicha frecuencia en la señal registrada y por ende, de su amplitud máxima. Valores que se utilizaron para estimar la forma modal.

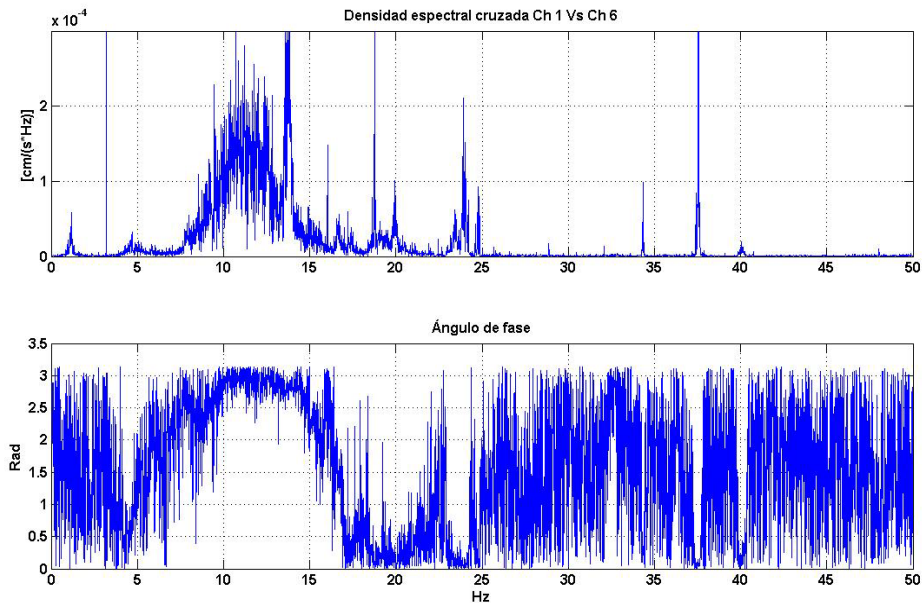


Figura 5.2. 54.- Densidad espectral cruzada Ch1 vs Ch 6

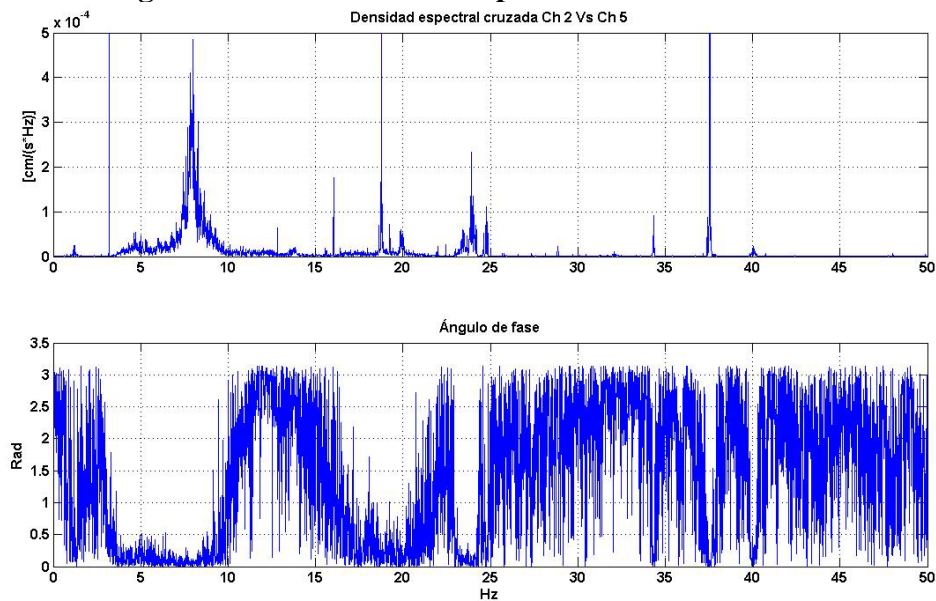


Figura 5.2. 55.- Densidad espectral cruzada Ch 2 vs Ch5

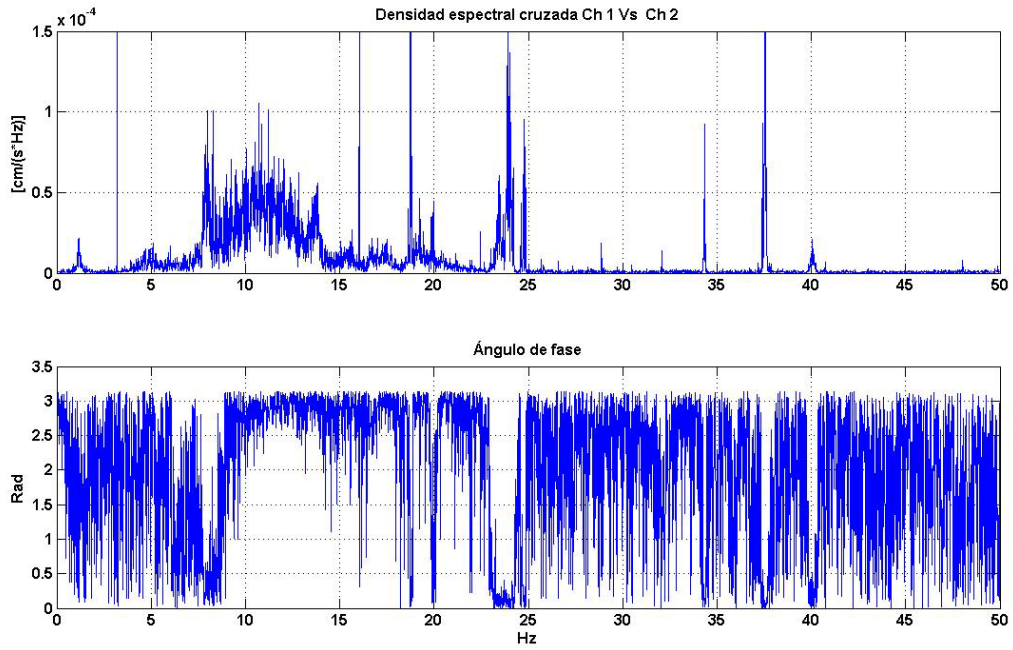


Figura 5.2. 56.- Densidad espectral cruzada Ch 1 vs Ch2

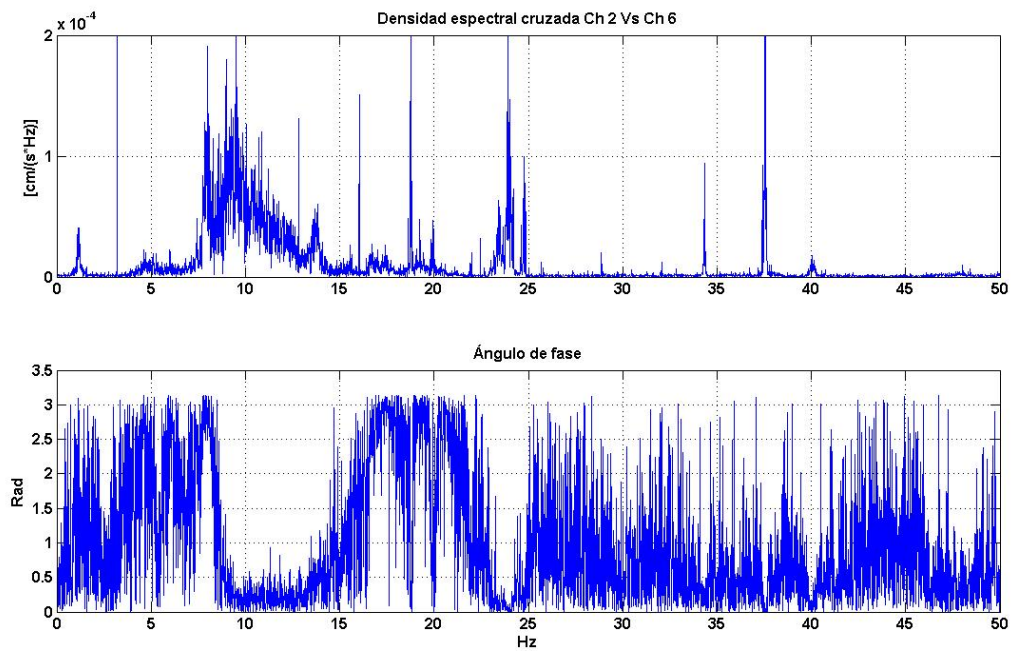


Figura 5.2. 57.- Densidad espectral cruzada Ch 2 vs Ch6

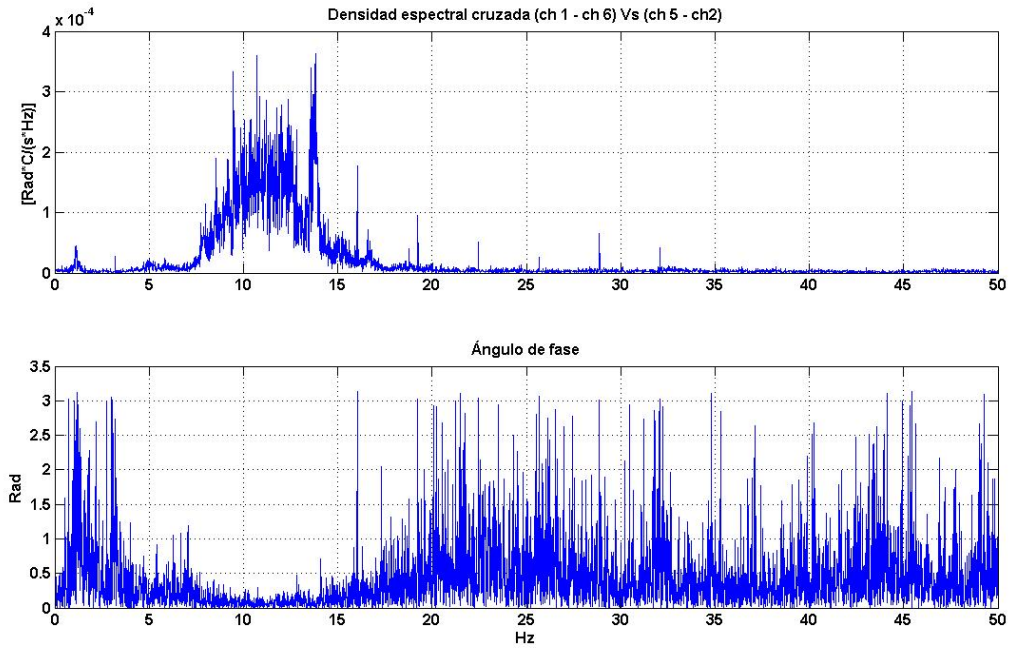


Figura 5.2. 58.- Correlación de registros rotacionales.

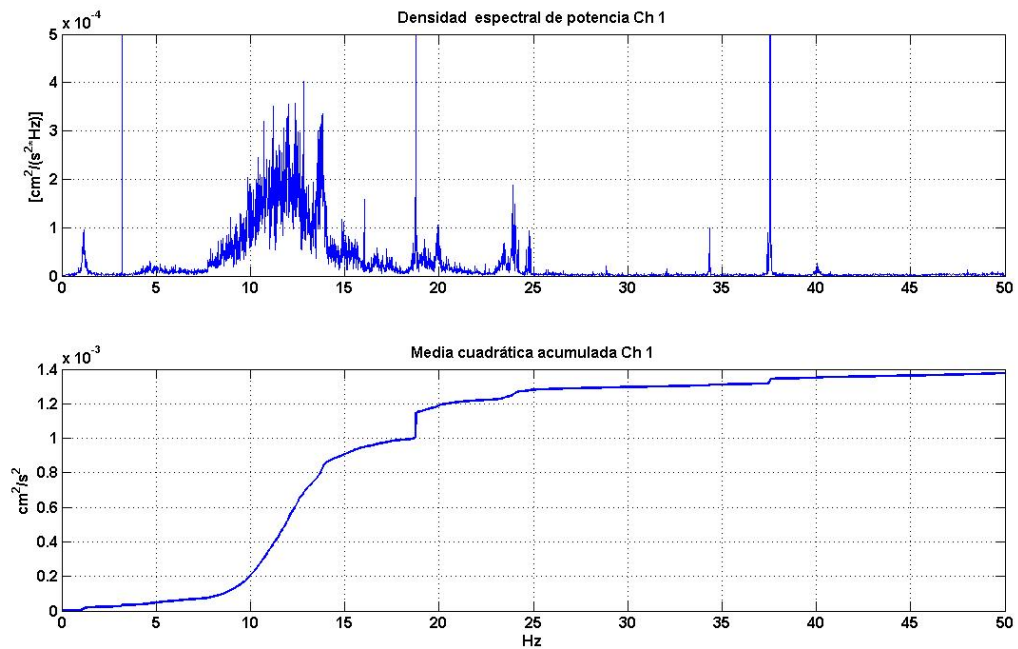


Figura 5.2. 59.- Estimación de amplitudes por frecuencia Ch 1.

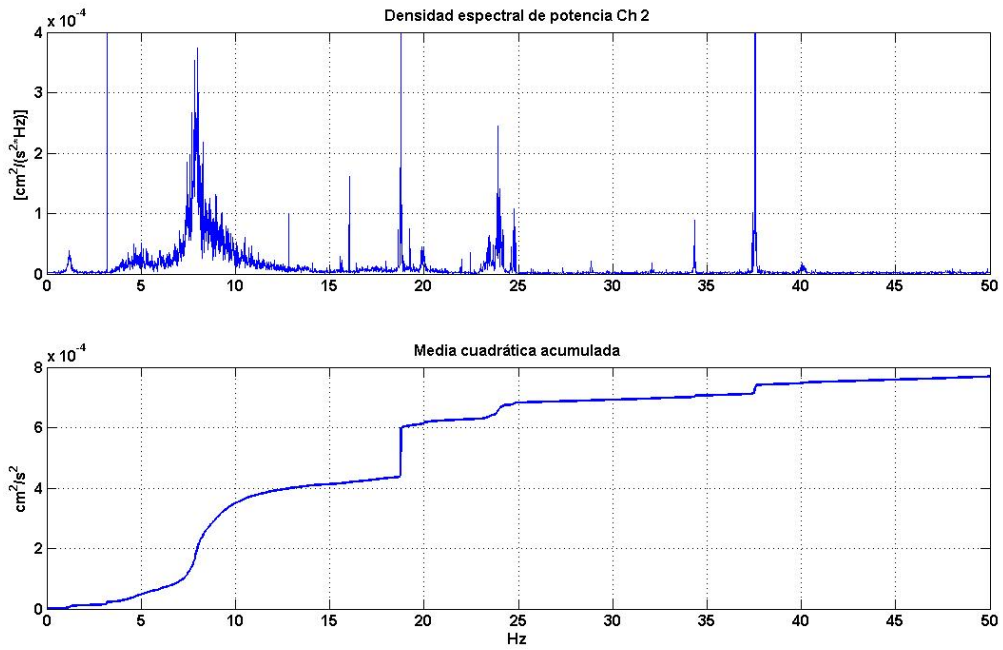


Figura 5.2. 60.- Estimación de amplitudes por frecuencia Ch 2

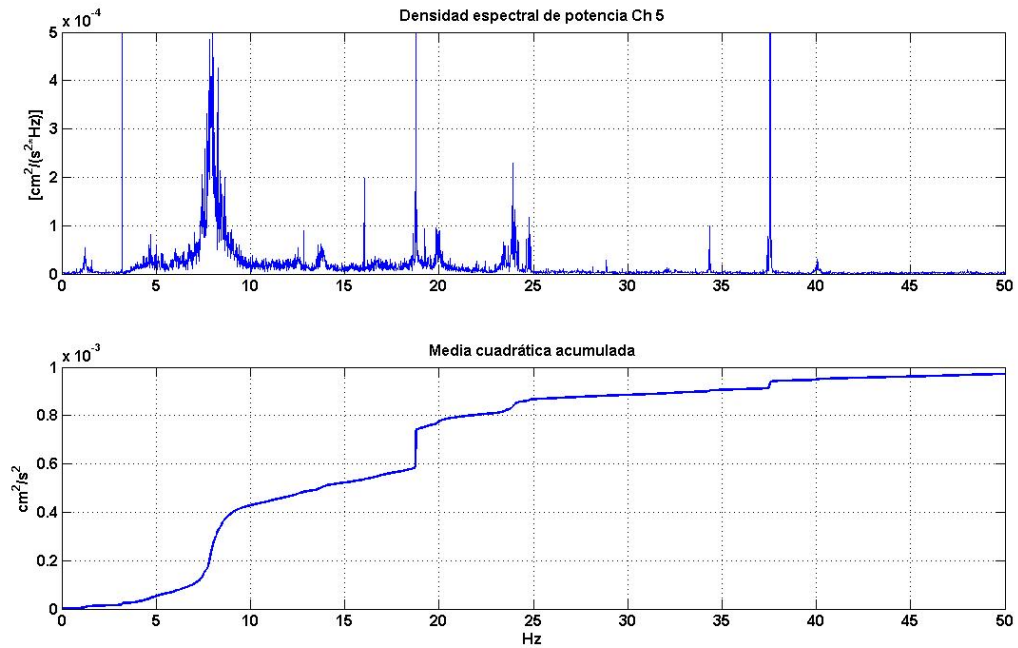


Figura 5.2. 61.- Estimación de amplitudes por frecuencia Ch 5

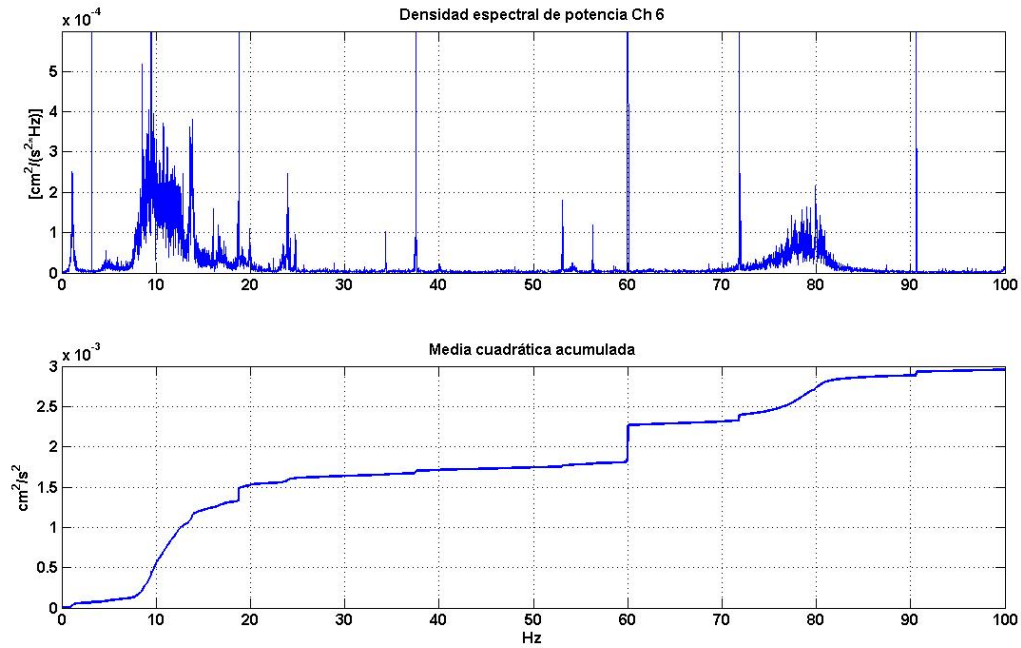


Figura 5.2. 62.- Estimación de amplitudes por frecuencia Ch 6

c) *Análisis de Resultados*

A continuación se presentan dos tablas con los resultados obtenidos. La tabla 1 muestra el análisis de correlación cruzada entre algunos registros seleccionados.

Tabla 5.2. 12.- Correlación cruzada de registros

Análisis de correlación cruzada de registros					
Arreglo	Sensor / registro	Sensor / registro	Frecuencias detectadas (Hz)		
			7.8	11-13	
1	Ch1	Ch6		-	
	Ch2	Ch5	+		
	Ch1	Ch2	+	-	
	Ch2	Ch6	-	+	
	ChR1	ChR2		+	

En la tabla 5.2.12 se muestra, para cada frecuencia modal encontrada, las amplitudes medidas con los instrumentos. Se muestran los máximos espectrales y luego sus raíces cuadradas, las cuales, como se dijo anteriormente, son proporcionales a la amplitud de respuesta.

Tabla 5.1. 13.- Amplitudes de velocidad para cada registro

Amplitud de Movimiento			
	Sensor / registro	Frecuencias detectadas (Hz)	
		7.9	11 ~13
MEDIAS CUADRÁTICAS ESPECTRALES	Ch1		7.50E-04
	Ch2	2.50E-04	
	Ch5	2.50E-04	
	Ch6		7.50E-04
MÁXIMOS NORMALIZADOS	Ch1	0	1
	Ch2	1	0
	Ch5	1	0
	Ch6	0	1

d) Conclusiones

Del análisis de los resultados obtenidos, a partir del procesamiento de los datos adquiridos en la medición de propiedades dinámicas de la U.E. Playa Grande se concluye:

- Los dos primeros modos tienen frecuencias de 7.9 y 11-13 Hz respectivamente con una tolerancia de cálculo de +/- 0.0061 Hz puesto que la tasa de muestreo fue de 200 Hz y el número de puntos por ventana igual a 16384 muestras.
- Los modos identificados en orden creciente de frecuencias son: Traslacional dirección Y y Torsional. Del análisis se deriva que estos dos primeros modos están prácticamente desacoplados a pesar de que puede apreciarse algún acoplamiento menor en algunas gráficas, éste bien puede ser atribuido a la desviación entre la dirección del sensor y la principal de los ejes estructurales, sin embargo, en el caso de que fuese un acoplamiento estructural real, éste es, para fines prácticos, despreciable.
- El amortiguamiento calculado para el primer modo es 3.1% y para el segundo 10.4% del amortiguamiento crítico. Estos amortiguamientos son representativos de vibraciones a baja amplitud y no deben tomarse para análisis estructurales de edificaciones que no vayan a estar sujetas a esta condición.

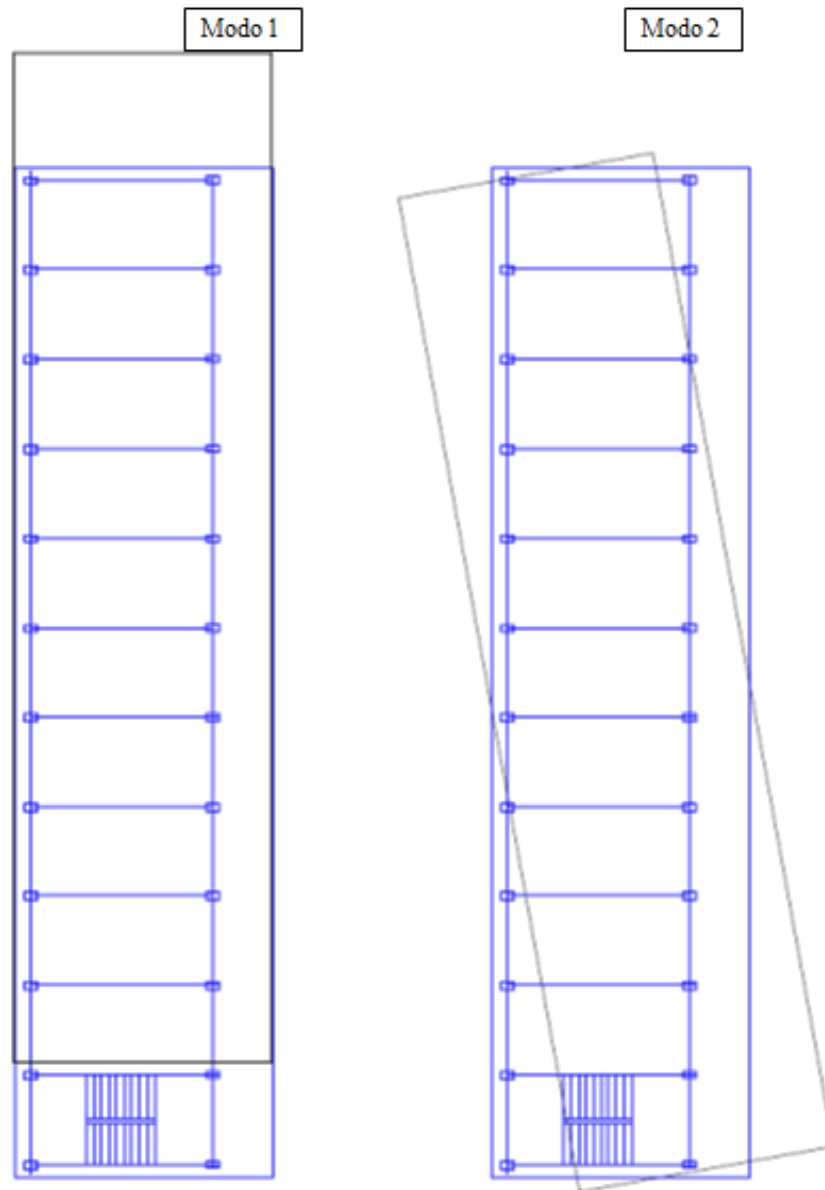


Figura 5.2. 63.- Modos de vibración U.E. Playa Grande

5.2.6.- Unidad Educativa Corazón de Jesús

a) *Instrumentación*

Esta edificación se instrumentó a través de un arreglo de 6 sismómetros, los cuales se colocaron en el segundo nivel, pues el nivel de techo fue inaccesible. Para el día de la visita existían aulas cerradas que impidieron la instalación en dos esquinas opuestas del entrepiso, por lo que se dispuso de dos arreglos biaxiales, uno en esquina y el otro en un punto cercano a la esquina opuesta. Los restantes sismómetros se instalaron en puntos intermedios para obtener información redundante de verificación.



Figura 5.2. 64.- Instalación de sensores Ch 5 y Ch 6 (arriba), sensores Ch3 y Ch4 (derecha) y vista interior del plantel (abajo).

Para esta edificación no se supuso comportamiento como diafragma rígido por la dimensión de la abertura central y por no existir juntas estructurales. Dicho comportamiento se verificó a través de los análisis de correlación cruzada de los registros de rotación.

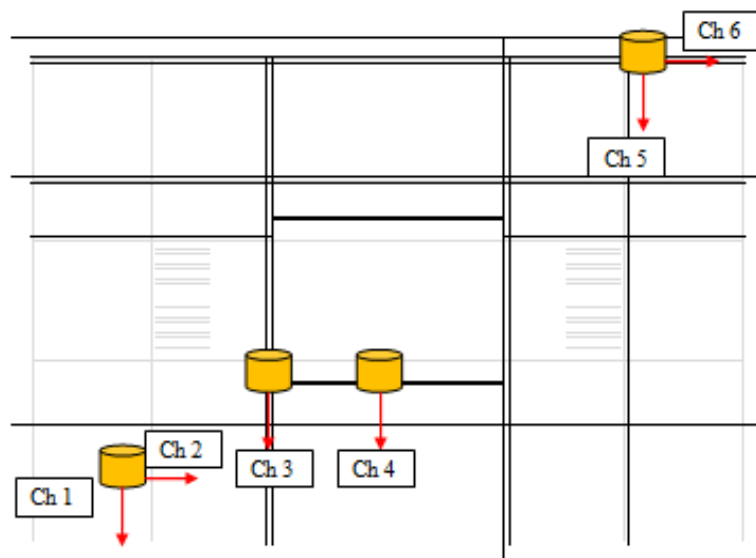


Figura 5.2. 65.- Esquema de instrumentación de la U.E. Corazón de Jesús

b) *Registro y procesamiento de datos*

Los datos fueron adquiridos a una tasa de 500 muestras por segundo durante 60 minutos y almacenados para su posterior procesamiento mediante el empleo del programa de computación MatLab.

Una vez determinados los espectros de potencia suavizados, se identificaron los picos máximos que indican las componentes frecuenciales predominantes en el registro.

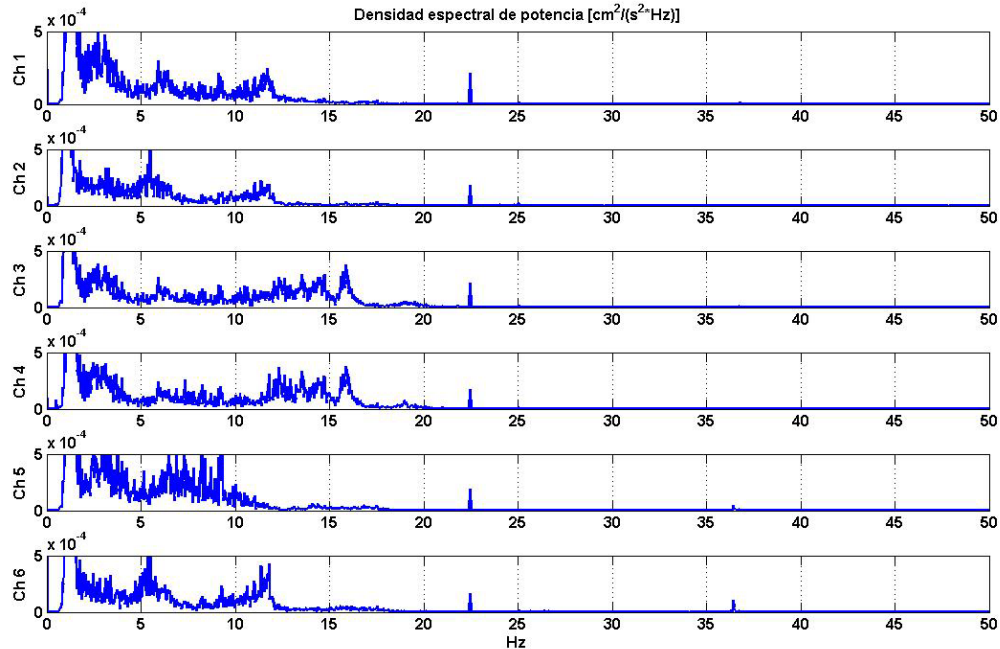


Figura 5.2. 66.- Espectros de potencia U.E. Corazón de Jesús

Luego de identificadas las posibles frecuencias modales, se calculó la densidad espectral cruzada entre varios registros seleccionados, de manera de poder determinar frecuencias comunes y ángulo de fase entre ellos. El criterio de selección consiste en buscar en los espectros cruzados aquellas frecuencias vistas en los espectros directos, que a su vez presenten ángulos de fase iguales a 0 (cero) o a π radianes (180°), lo cual es indicativo de frecuencia de vibración modal.

Se presenta también el análisis de correlación cruzada de los dos registros rotacionales para detección de diafragma rígido, así como la media cuadrática acumulada para algunos registros en el dominio de la frecuencia, cuya diferencia tomada en el ancho de banda de cada pico detectado, sirve de estimador de la media cuadrática de dicha frecuencia en la señal registrada y por ende, de su amplitud máxima. Valores que se utilizaron para estimar la forma modal.

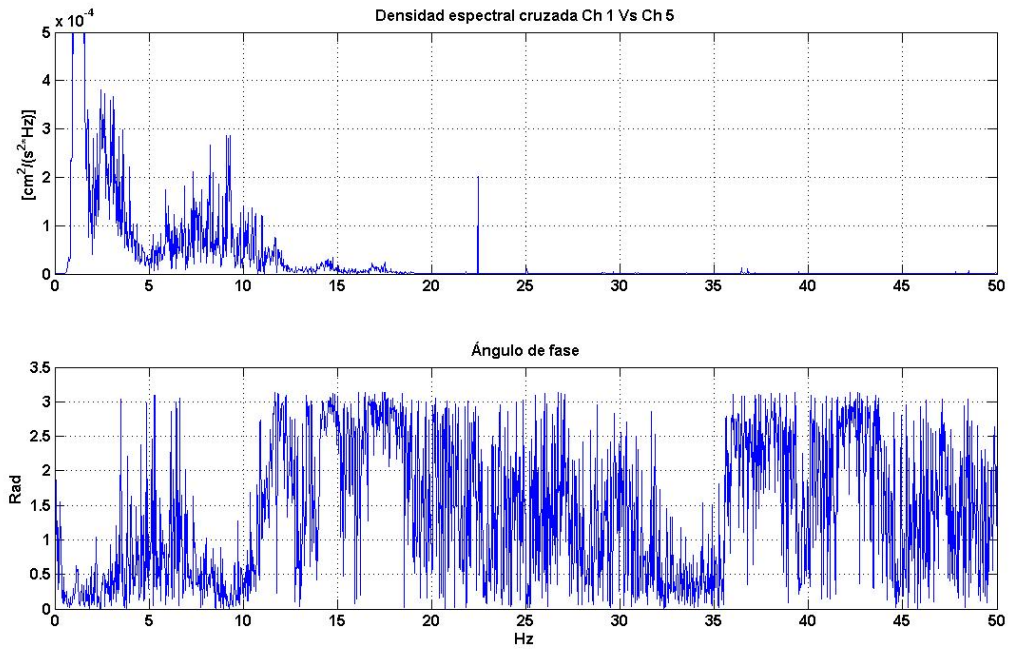


Figura 5.2. 67.- Densidad espectral cruzada Ch 1 vs Ch 5

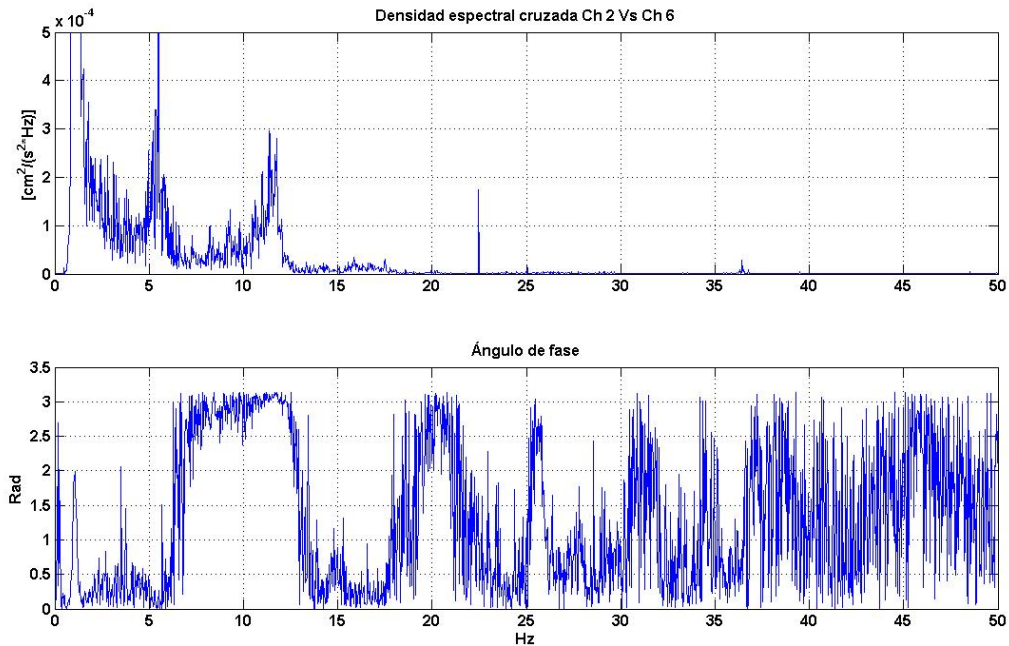


Figura 5.2. 68.- Densidad espectral cruzada Ch 2 vs Ch 6

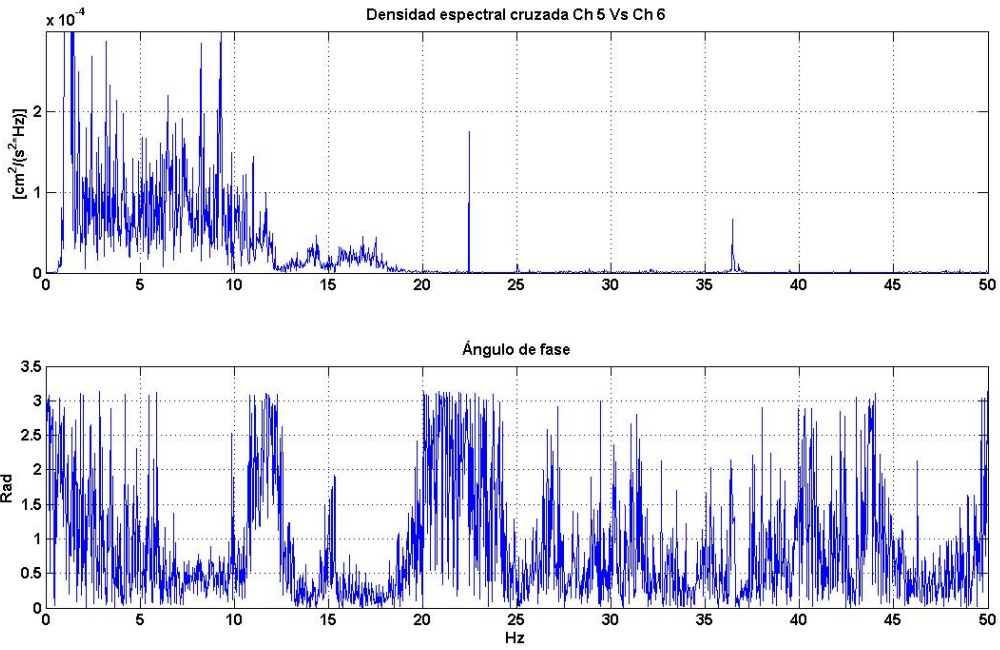


Figura 5.2. 69.- Densidad espectral cruzada Ch 5 vs Ch 6.

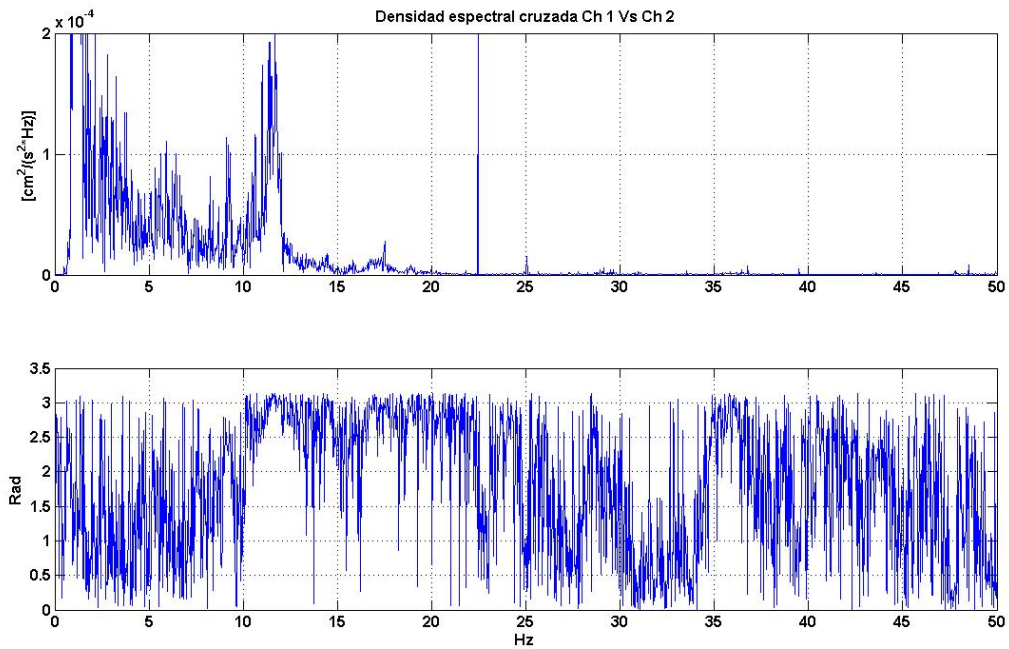


Figura 5.2. 70.- Densidad espectral cruzada Ch 1 vs Ch 2.

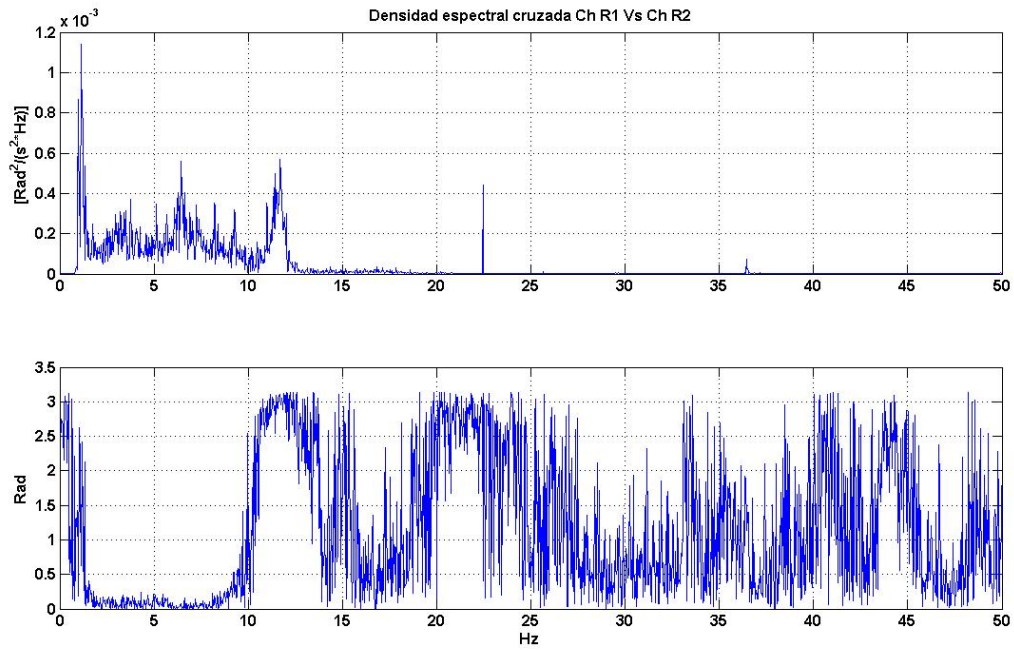


Figura 5.2. 71.- Densidad espectral cruzada del registro rotacional.

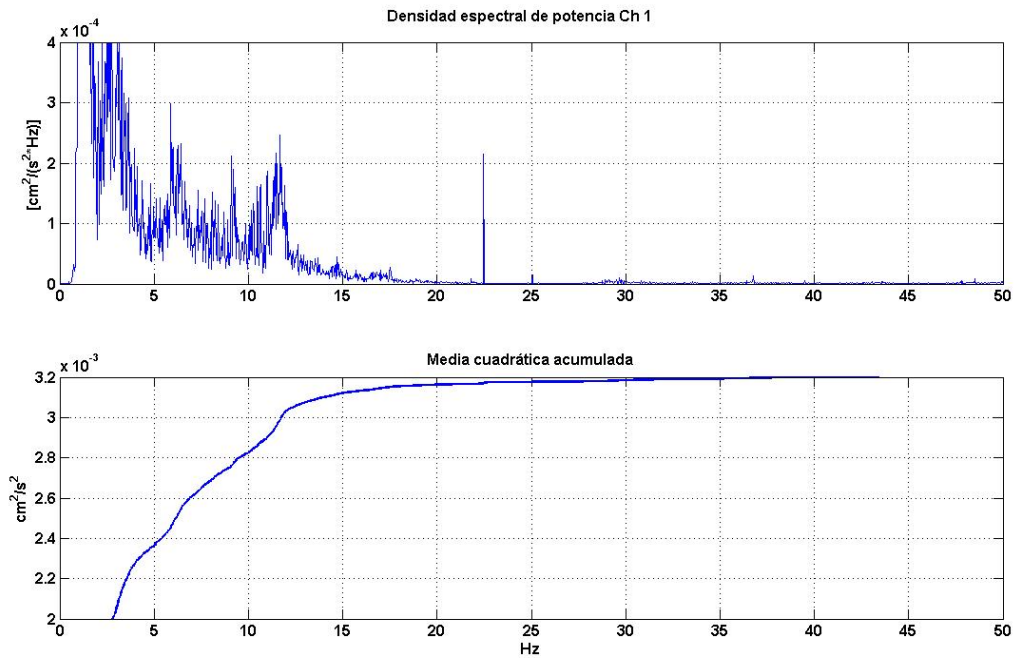


Figura 5.2. 72.- Estimación de amplitud por frecuencia Ch 1.

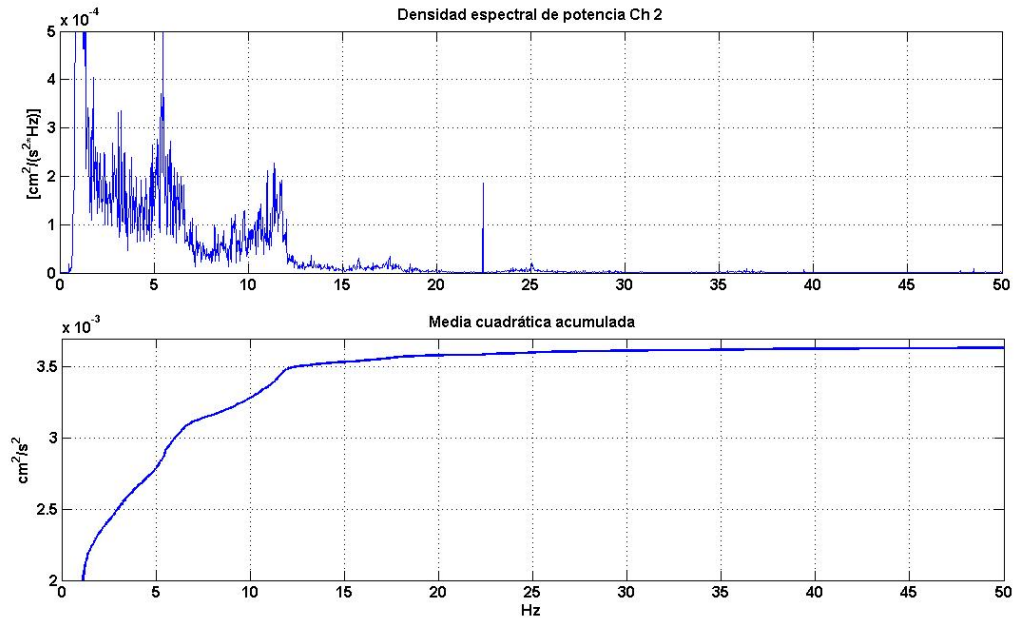


Figura 5.2. 73.- Estimación de amplitud por frecuencia Ch 2

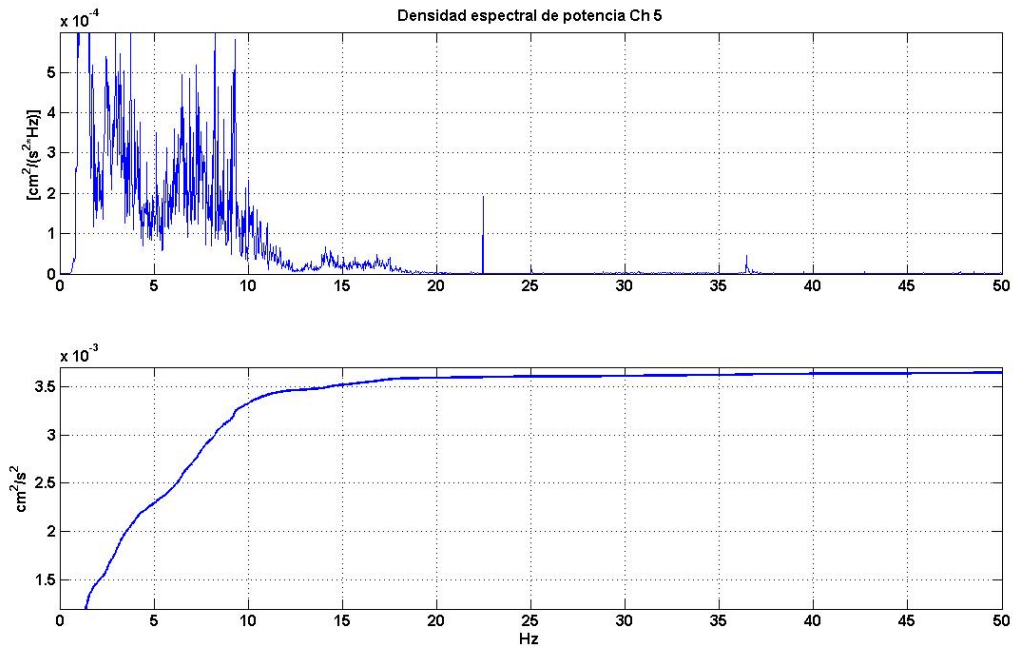


Figura 5.2. 74.- Estimación de amplitud por frecuencia Ch 5.

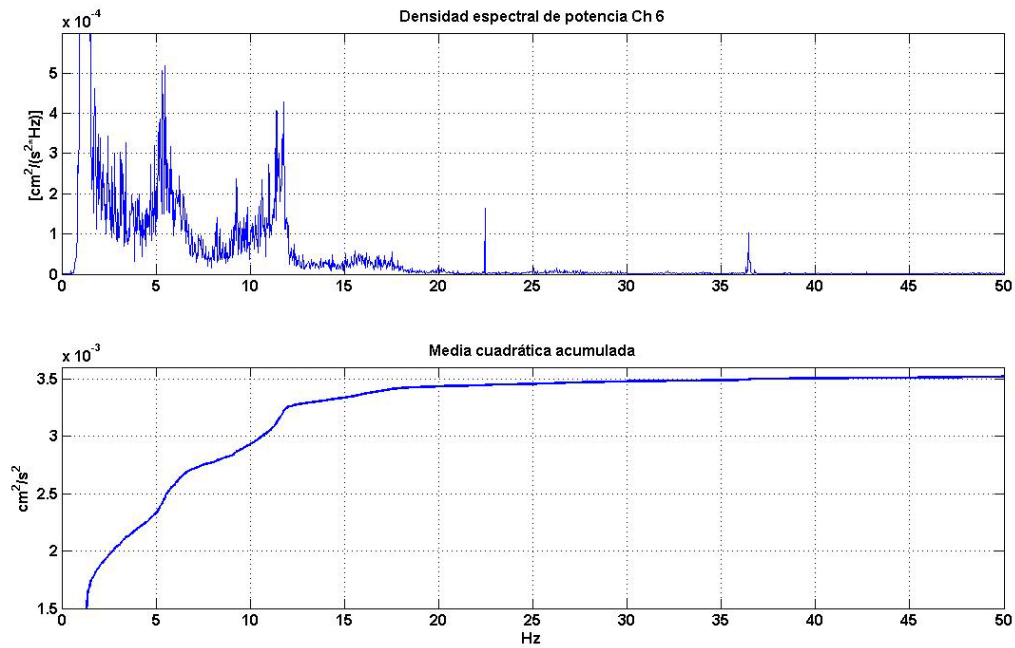


Figura 5.2. 75.- Estimación de amplitud por frecuencia Ch 6.

c) Análisis de Resultados

Se presentan a continuación las tablas con los resultados provenientes de los espectros de potencia y el análisis de correlación cruzada, resumido este último como fases, las cuales pueden ser positivas o negativas.

Tabla 5.2. 14.- Amplitudes de velocidad para cada registro.

Amplitud de Movimiento			
	Sensor / registro	Frecuencias detectadas (Hz)	
		5.50	11.5
MEDIAS CUADRÁTICAS ESPECTRALES	Ch1	0.00020	0.00025
	Ch2	0.00045	0.00025
	Ch5		0.00020
	Ch6	0.00	0.00040
MÁXIMOS NORMALIZADOS	Ch1	0.44	0.63
	Ch2	1.00	0.63
	Ch5	0.00	0.50
	Ch6	0.89	1.00

Tabla 5.2. 15.- Análisis de correlación cruzada.

Análisis de correlación cruzada de registros				
Arreglo	Sensor / registro	Sensor / registro	Frecuencias detectadas (Hz)	
			5.5	11.5
1	Ch1	Ch5		
	Ch2	Ch6	+	-
	Ch5	Ch6		-
	Ch1	Ch2		-
	ChR1	ChR2		-

d) Conclusiones

Del análisis de los resultados obtenidos a partir del procesamiento de los datos adquiridos en la medición de propiedades dinámicas de la U.E. Corazón de Jesús se concluye:

- Los dos primeros modos tienen frecuencias de 5.5 y 11.5 Hz respectivamente con una tolerancia de cálculo de ± 0.0152 Hz puesto que la tasa de muestreo fue de 500 Hz y el número de puntos por ventana igual a 16384 muestras.
- El primer modo de vibración es principalmente traslacional en dirección del eje Y, con algún ligero acomplamiento torsional, pues no se observó correlación entre los registros de los sensores 1 y 5 para el primer modo, pero si se pudo medir algún nivel de amplitud en el registro del sensor 1 para esa frecuencia, cuyo sentido relativo no pudo ser determinado.
- El segundo modo de vibración obedece a una forma modal correspondiente a un diafragma flexible, lo cual además pudo ser corroborado por el análisis de correlación de los registros de rotación, el cual ofrece una fase negativa para la frecuencia del segundo modo, descartando por completo la posibilidad de un diafragma rígido.
- Debido a la alta dispersión se dificultó determinar el amortiguamiento, el cual fue estimado para el primer modo en 10% del amortiguamiento crítico. Estos amortiguamientos son representativos de vibraciones a baja amplitud y no deben tomarse para análisis estructurales de edificaciones que no vayan a estar sujetas a esta condición.

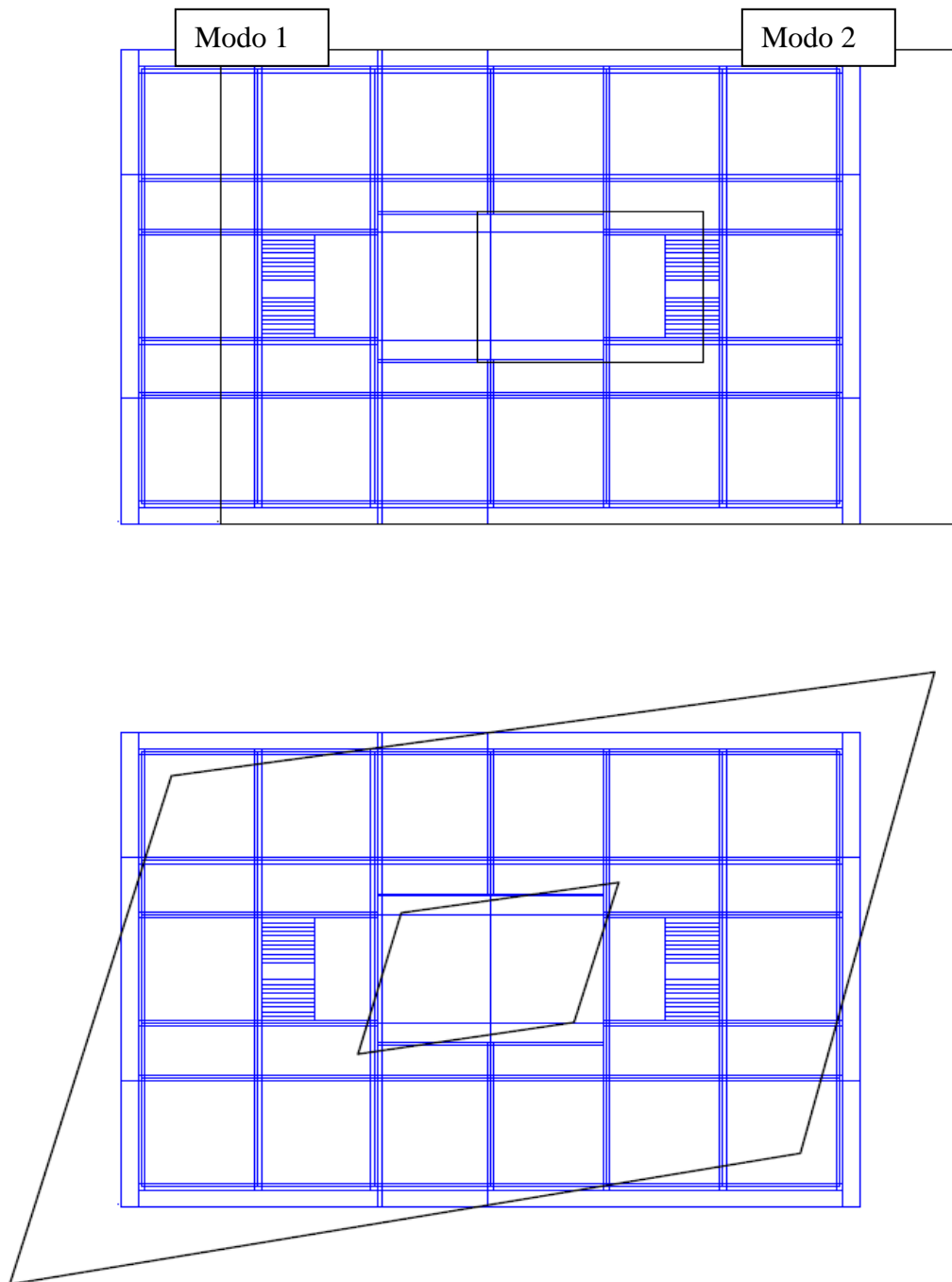


Figura 5.2. 76.- Modos de vibración U.E. Corazón de Jesús.

5.2.7.- Unidad Educativa Antonio Rodríguez Abreu.

a) *Instrumentación*

Esta edificación fue instrumentada con seis sismómetros. Se realizó un arreglo, en el cual los sismómetros fueron distribuidos en dos puntos de registro biaxial y dos puntos de registro uniaxial.



**Figura 5.2. 77.- Sensores Ch 5 y Ch 6 (inferior), vista de la losa de techo (superior),
Vista desde el segundo nivel (derecha).**

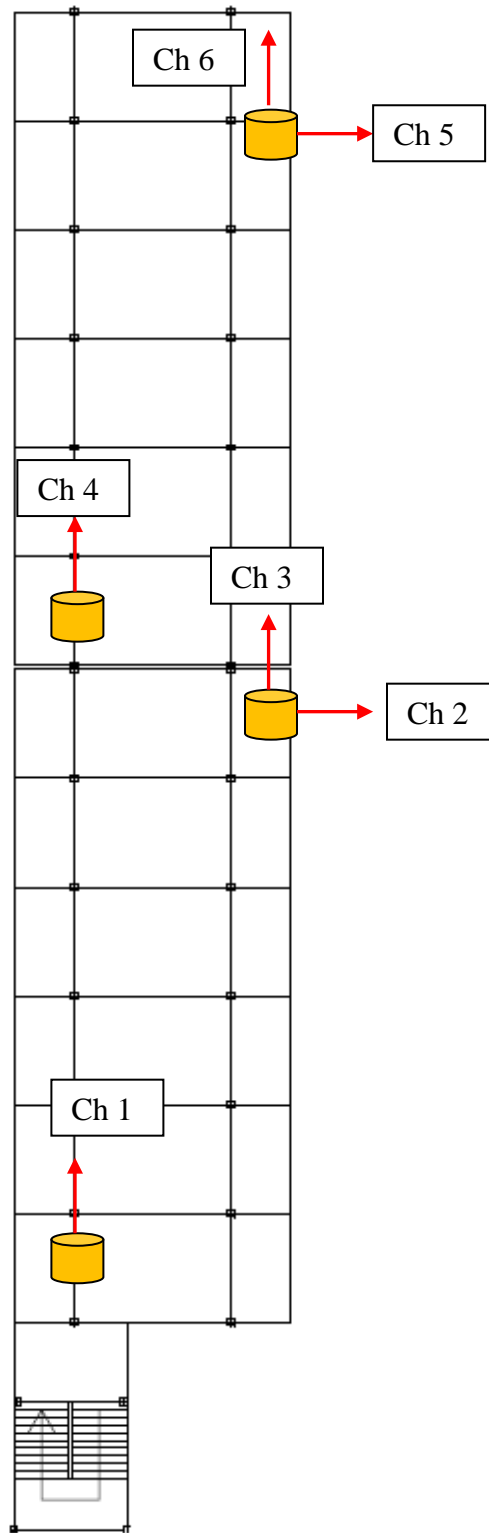


Figura 5.2. 78.- Esquema de instrumentación U.E. Antonio R. Abreu.

b) Registro y procesamiento de datos

Los datos fueron adquiridos a una tasa de 500 muestras por segundo durante 44 minutos y almacenados para su posterior procesamiento utilizando el programa de computación MatLab.

Una vez determinados los espectros de potencia suavizados, se identificaron los picos máximos que indican las componentes frecuenciales predominantes en el registro.

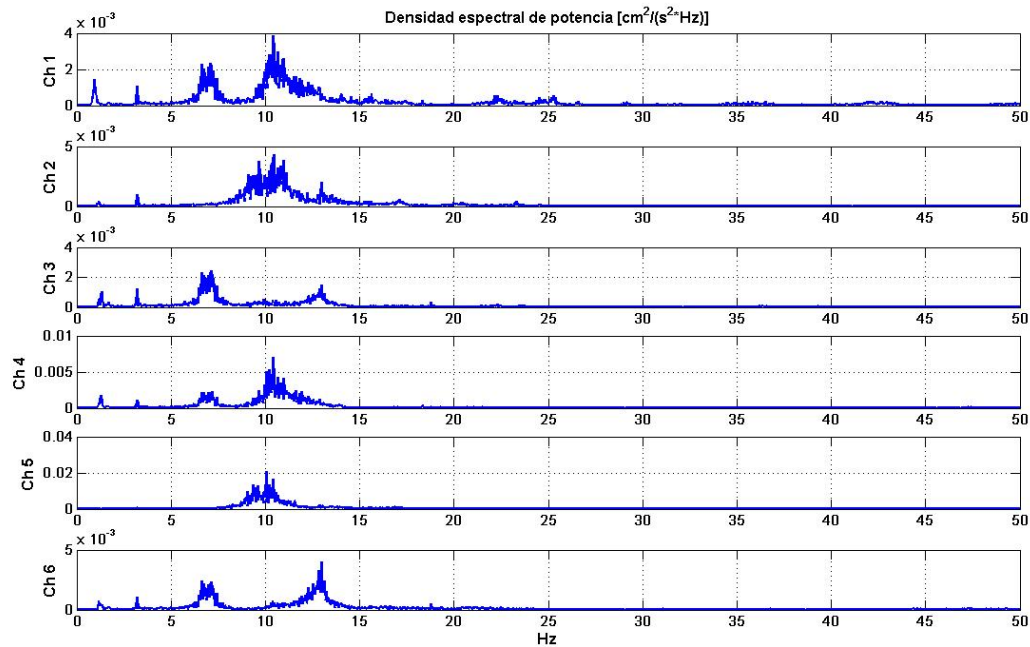


Figura 5.2. 79.- Espectros de potencia.

Luego de identificadas las posibles frecuencias modales, se calculó la densidad espectral cruzada entre varios registros seleccionados, de manera de poder determinar frecuencias comunes y ángulo de fase entre ellos.

El criterio de selección consiste en buscar en los espectros cruzados aquellas frecuencias vistas en los espectros directos y que a su vez presenten ángulos de fase iguales a 0 (cero) o a π radianes (180°), lo cual es indicativo de frecuencia de vibración modal.

Se presentan a continuación una colección de gráficas de densidad espectral cruzada y de amplitud media cuadrática acumulada para varios registros.

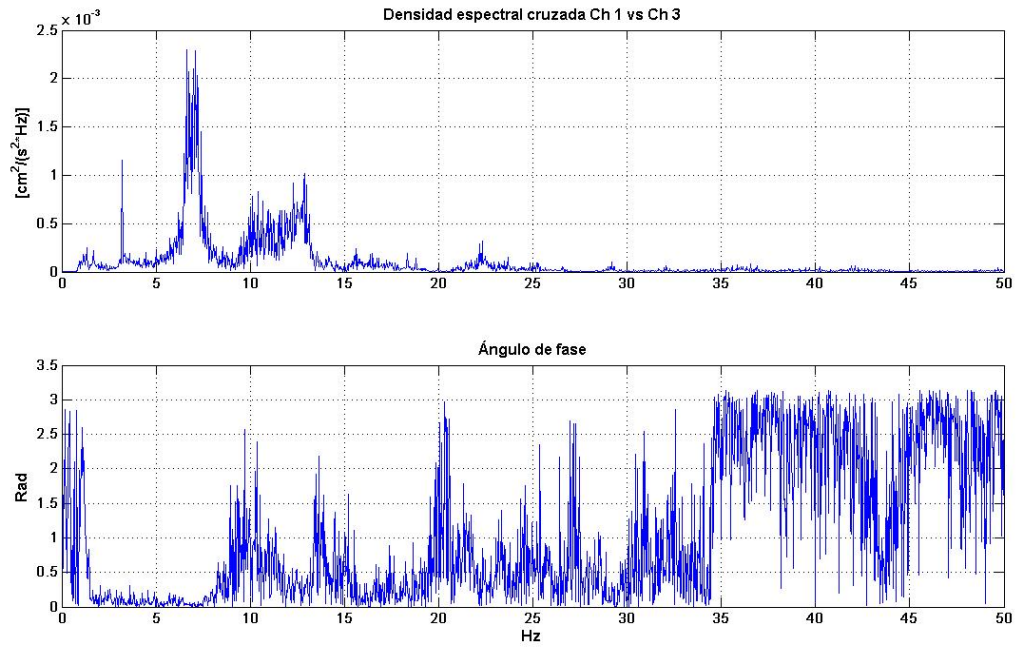


Figura 5.2. 80.- Densidad espectral cruzada Ch 1 vs Ch 3

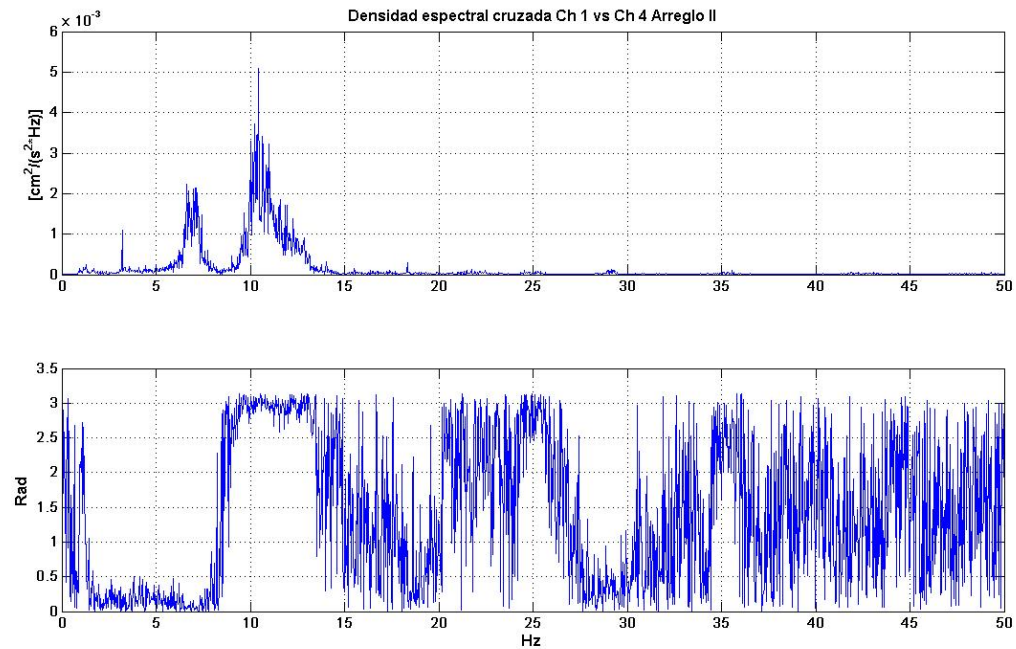


Figura 5.2. 81.- Densidad espectral cruzada Ch 1 vs Ch 4

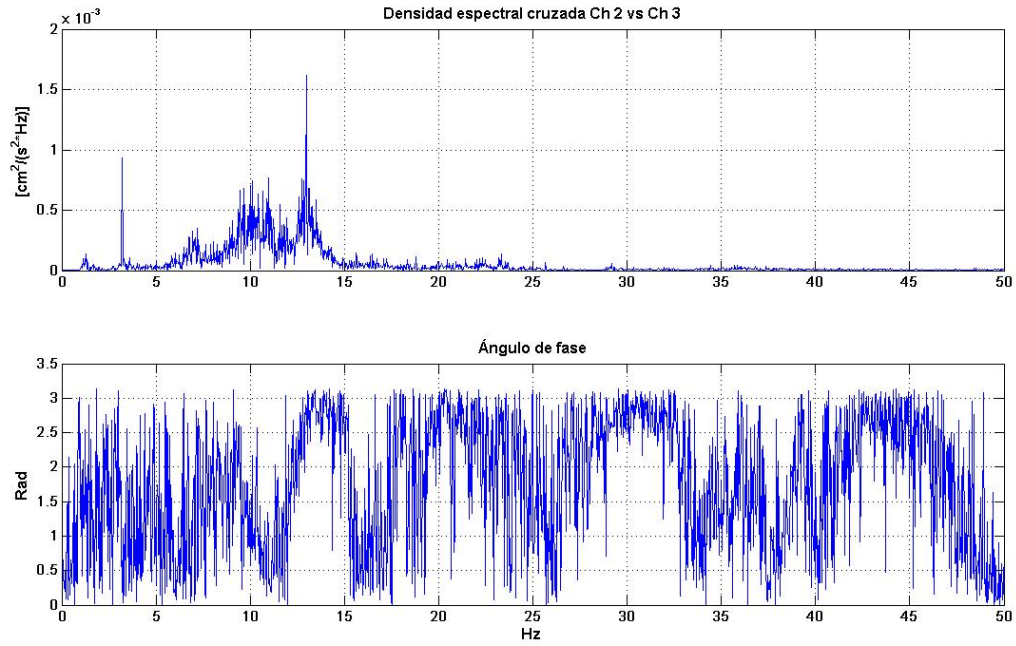


Figura 5.2. 82.- Densidad espectral cruzada Ch 2 vs Ch 3.

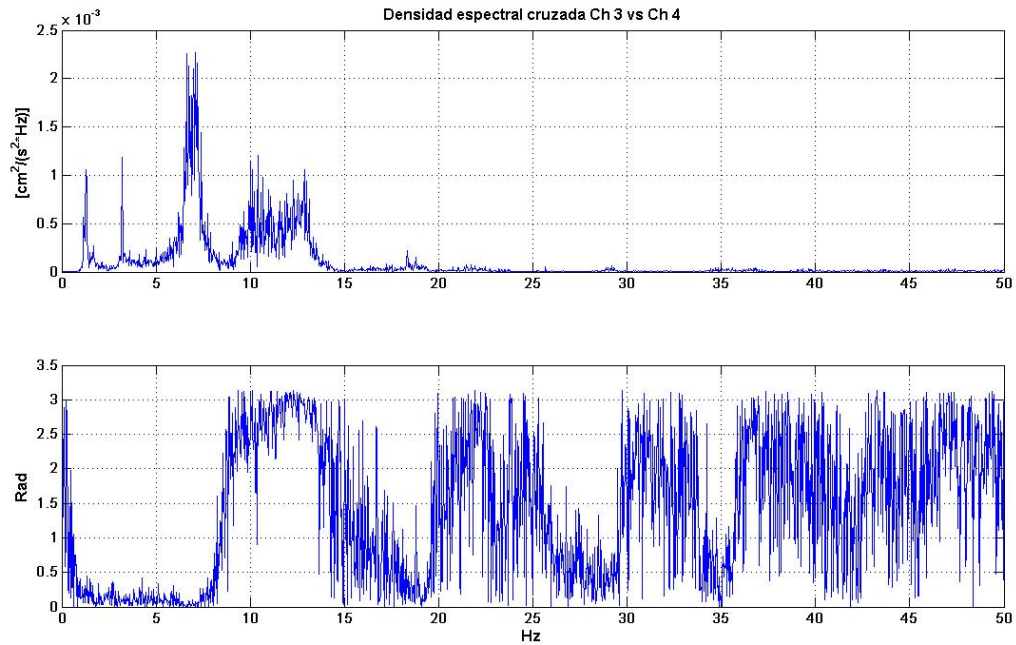


Figura 5.2. 83.- Densidad espectral cruzada Ch 3 vs Ch 4.

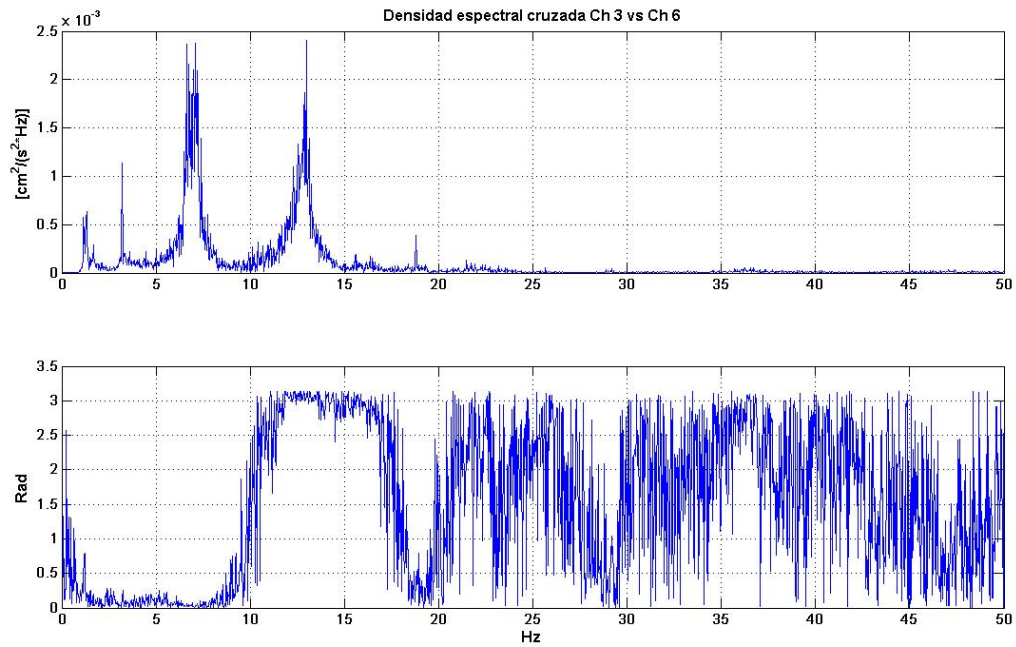


Figura 5.2. 84.- Densidad espectral cruzada Ch 3 vs Ch 6.

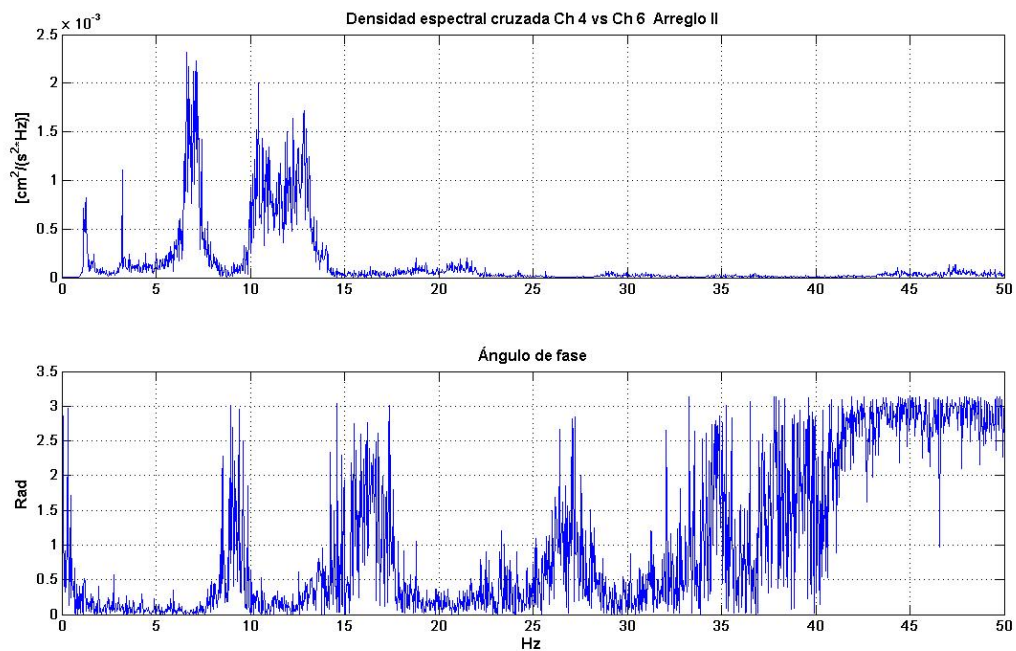


Figura 5.2. 85.- Densidad espectral cruzada Ch 4 vs Ch 6.

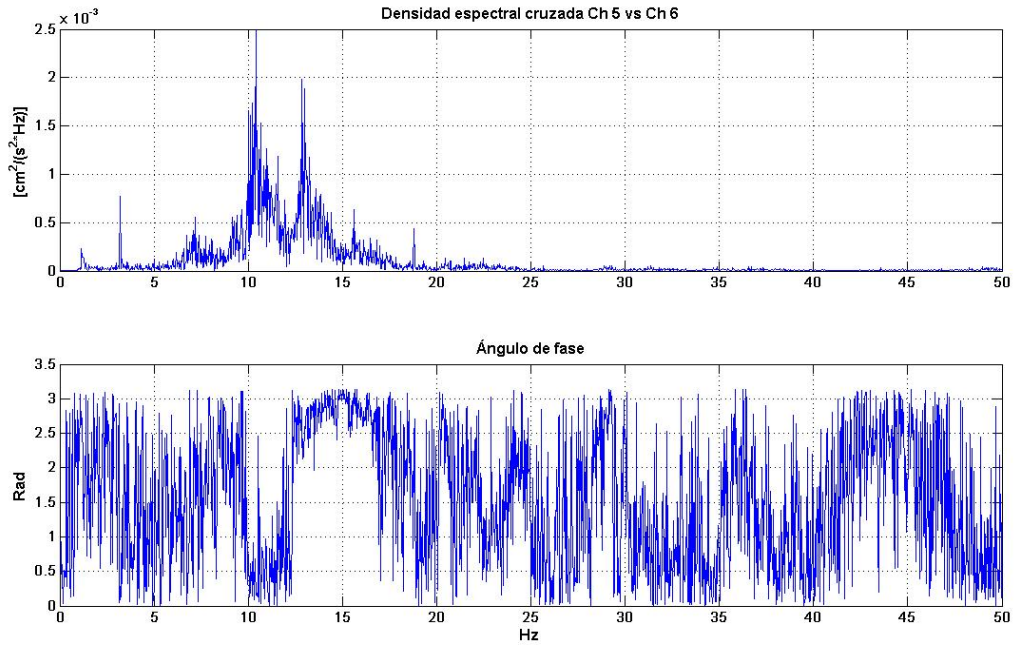


Figura 5.2. 86.- Densidad espectral cruzada Ch 5 vs Ch 6.

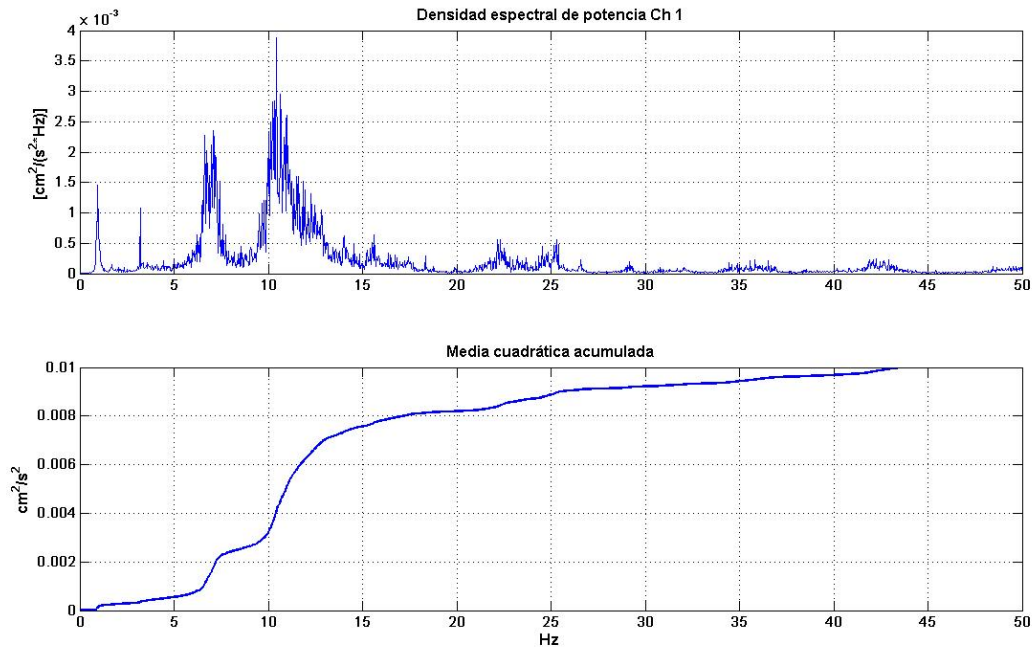


Figura 5.2. 87.- Amplitud por frecuencia Ch 1.

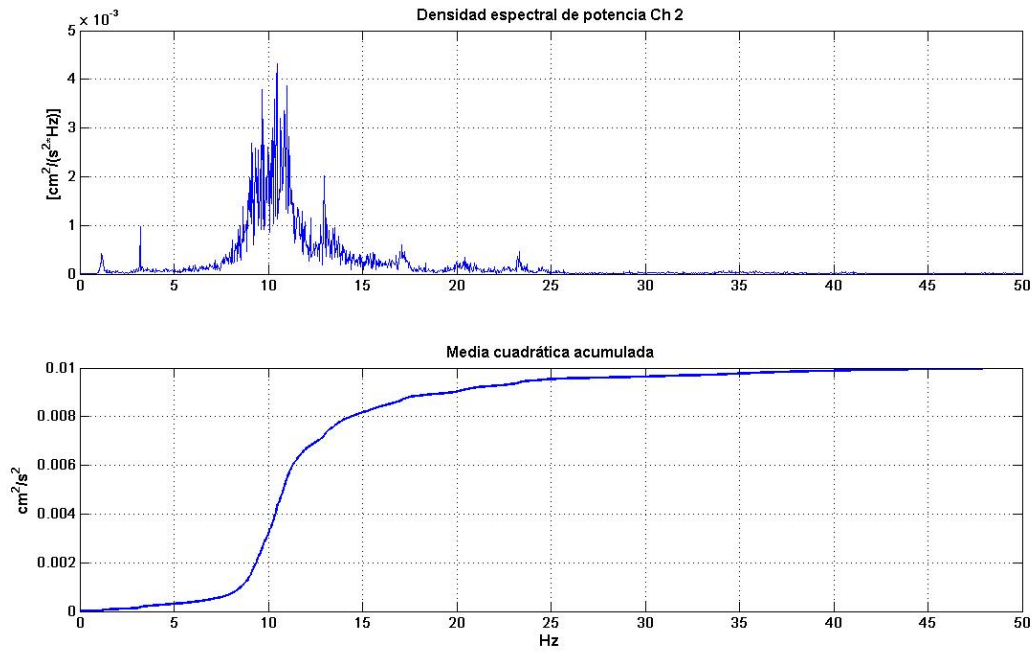


Figura 5.2. 88.- Amplitud por frecuencia Ch2

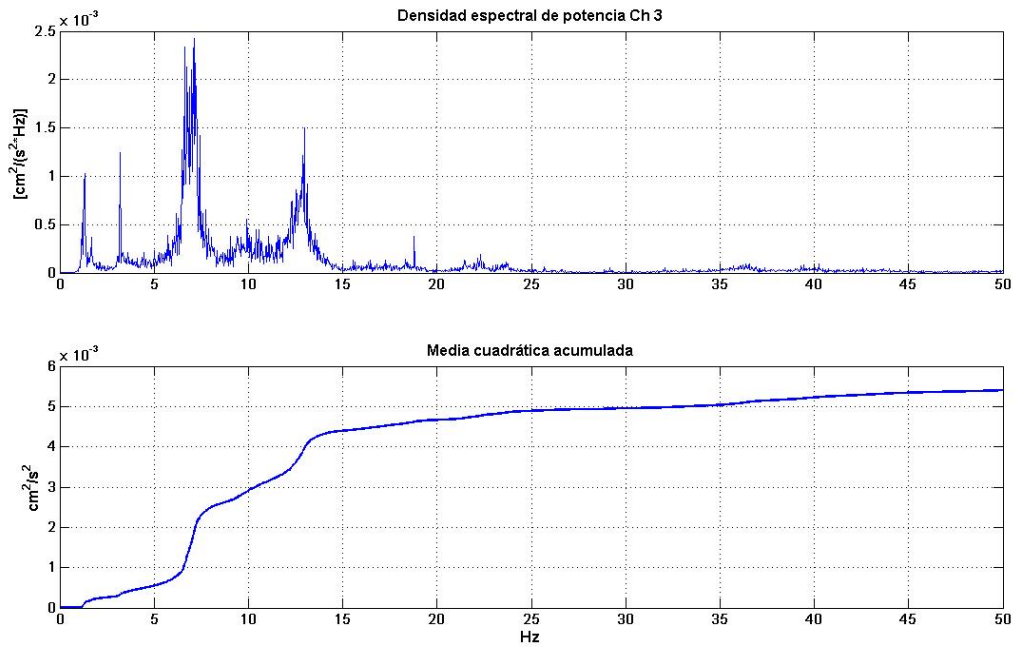


Figura 5.2. 89.- Amplitud por frecuencia Ch 3.

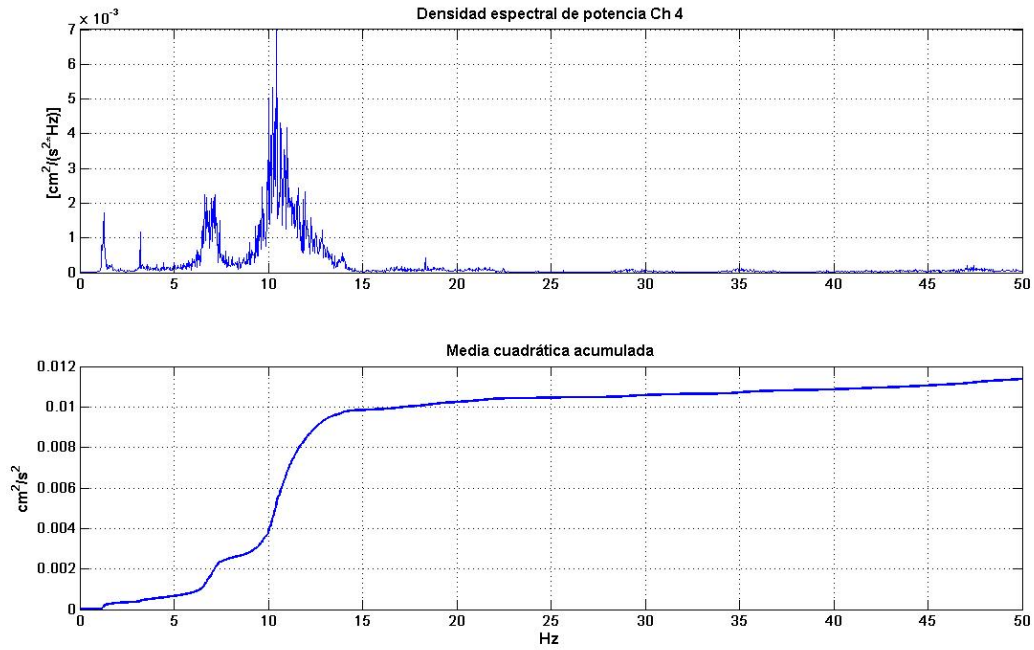


Figura 5.2. 90.- Amplitud por frecuencia Ch 4.

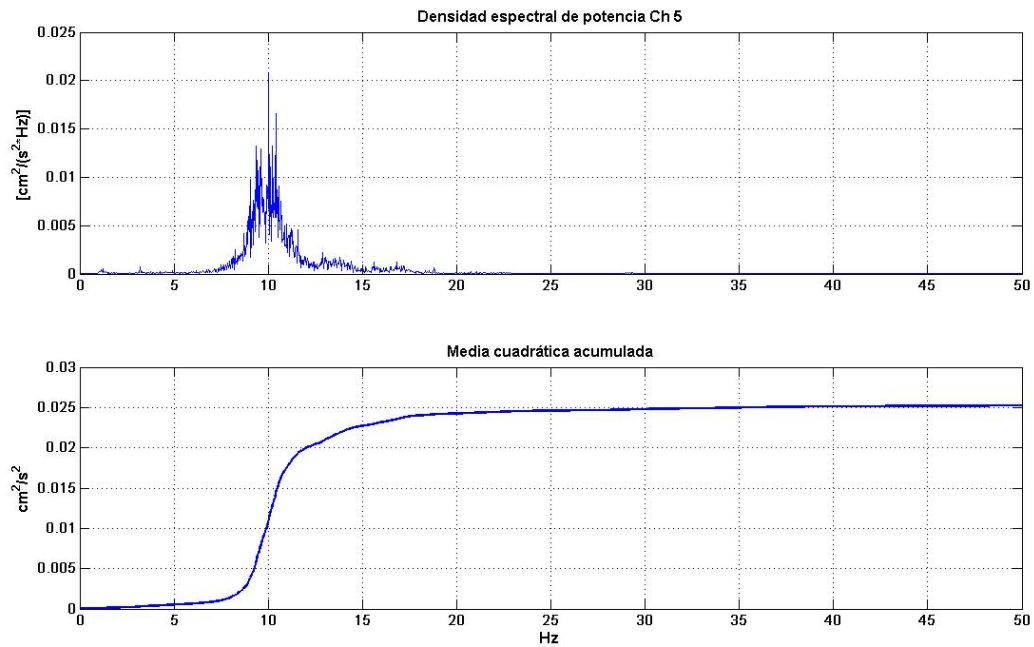


Figura 5.2. 91.- Amplitud por frecuencia Ch 5

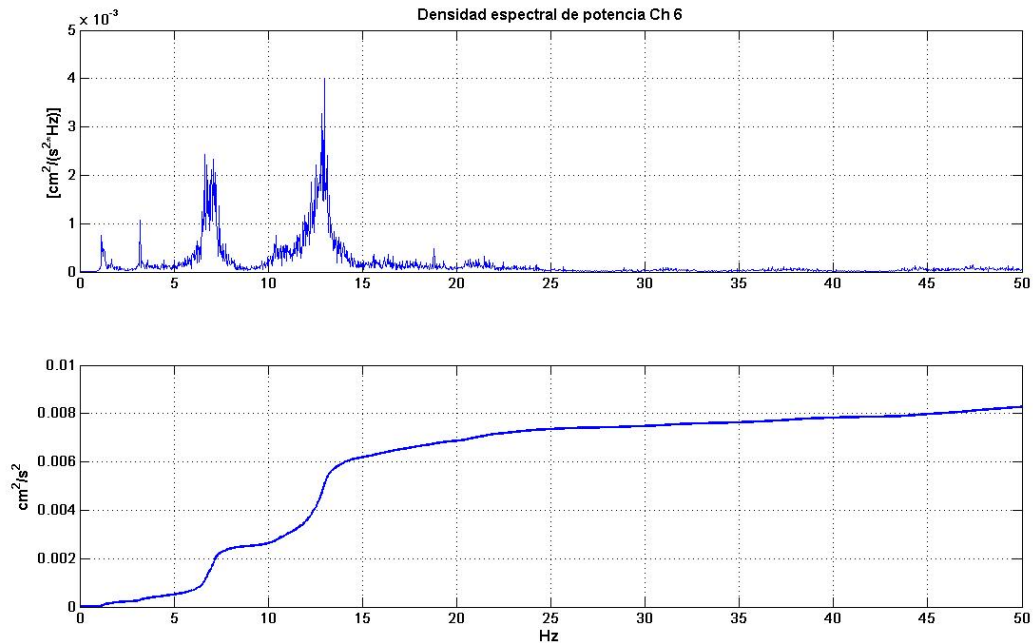


Figura 5.2. 92.- Amplitud por frecuencia Ch 6.

c) *Análisis de Resultados*

Se presentan a continuación las tablas con los resultados provenientes de los espectros de potencia con el análisis de correlación cruzada, resumido este último como fases, las cuales pueden ser positivas o negativas

Tabla 5.2. 16.- Análisis de correlación cruzada.

Análisis de correlación cruzada de registros					
Arreglo	Sensor / registro	Sensor / registro	Frecuencias detectadas		
			7	10.5	13
1	Ch3	Ch4	+	-	-
	Ch1	Ch4	+	-	
	Ch2	Ch3		+	-
	Ch5	Ch6		+	-
	Ch3	Ch6	+		-
	Ch4	Ch6	+	+	+

Tabla 5.2. 17.- Amplitudes de velocidad para cada registro.

Amplitud de Movimiento				
	Sensor / registro	Frecuencias detectadas		
		7	10.5	13
MEDIAS CUADRÁTICAS ESPECTRALES	Ch1	0.0018	0.0042	0
	Ch2	0.0000	0.0065	0
	Ch3	0.0020	0	0.0012
	Ch4	0.0018	0.007	0
	Ch5	0.0000	0.018	0
	Ch6	0.002	0	0.003
MÁXIMOS NORMALIZADOS	Ch1	0.90	0.23	0.00
	Ch2	0.00	0.36	0.00
	Ch3	1.00	0.00	0.40
	Ch4	0.90	0.39	0.00
	Ch5	0.00	1.00	0.00
	Ch6	1.00	0.00	1.00

d) *Conclusiones*

Del análisis de los resultados obtenidos a partir del procesamiento de los datos adquiridos en la medición de propiedades dinámicas de la U.E. J. Rodríguez Abreu:

- Los tres primeros modos tienen frecuencias de 7.0, 10.5 y 13.0 Hz respectivamente con una tolerancia de cálculo de +/- 0.0152 Hz puesto que la tasa de muestreo fue de 500 Hz y el número de puntos por ventana igual a 16384 muestras.
- El primer modo es traslacional en dirección Y de ambos módulos en conjunto, mientras el segundo, que es principalmente torsional y el tercero, acoplado, son modos con interacción a través de la junta estructural. Del análisis se deduce que las juntas estructurales están funcionando como medios elásticos de baja rigidez lo cual induce al acoplamiento de los dos módulos principales. Esto se evidencia en el segundo y tercer modo, donde se observan dos registros paralelos concurrentes a ambos lados de la junta estructural presentando un desfase de 180°, lo cual indica que en vez vibrar cada módulo de manera independiente, lo hacen en

conjunto como un modo estructural de 6 grados de libertad por nivel, 3 en cada módulo.

- El amortiguamiento calculado para el primer modo es 7.14%, 2.7% para el segundo y para el tercero 4.7% del amortiguamiento crítico. Estos amortiguamientos son representativos de vibraciones a baja amplitud y no deben tomarse para análisis estructurales de edificaciones que no vayan a estar sujetas a esta condición. Se presume que la presencia de mayor porcentaje de mampostería en la dirección norte haya influido en el incremento del amortiguamiento en esa dirección.

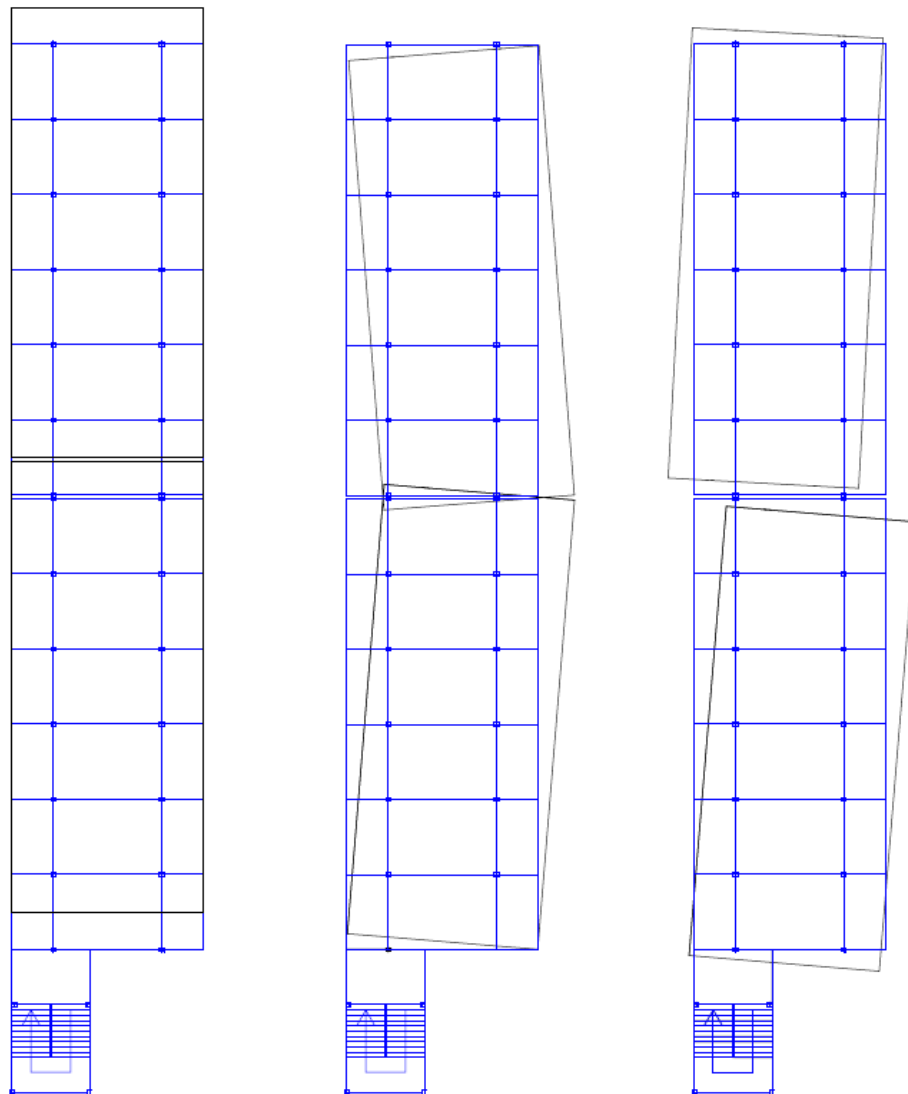


Figura 5.2. 93.- Modos de vibración U.E. Antonio R. Abreu.

5.2.8.- U.E. María Reina de López

a) *Instrumentación*

Esta edificación fue instrumentada con seis sismómetros. Debido a la regularidad en planta, ausencia de juntas estructurales y acceso al nivel de techo, se realizó la adquisición mediante un único arreglo, en el cual los sismómetros fueron distribuidos en tres puntos de registro biaxial, dos correspondientes a esquinas opuestas y uno cercano a lo que se estima pueda ser el centro de masa.



Figura 5.2. 94.- Fachada principal U.E. María R. López.



Figura 5.2. 95.- Sensores Ch 5 y Ch 6.



Figura 5.2. 96.- Sensores Ch 1 y Ch 2.

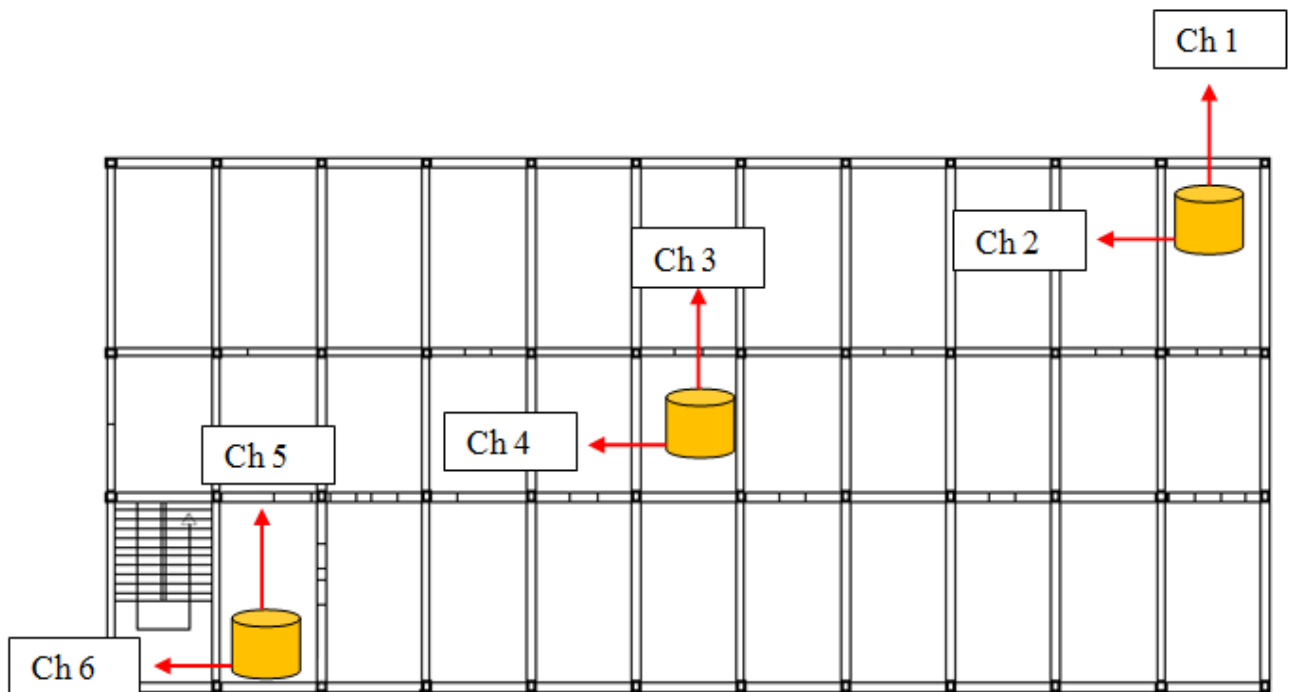


Figura 5.2. 97.- Esquema de instrumentación U.E. María R. López.

b) Registro y procesamiento de datos

Los datos fueron adquiridos a una tasa de 500 muestras por segundo durante 60 minutos y almacenados para su posterior procesamiento utilizando el programa de computación MatLab.

Una vez determinados los espectros de potencia suavizados, se identificaron los picos máximos que indican las componentes frecuenciales predominantes en el registro.

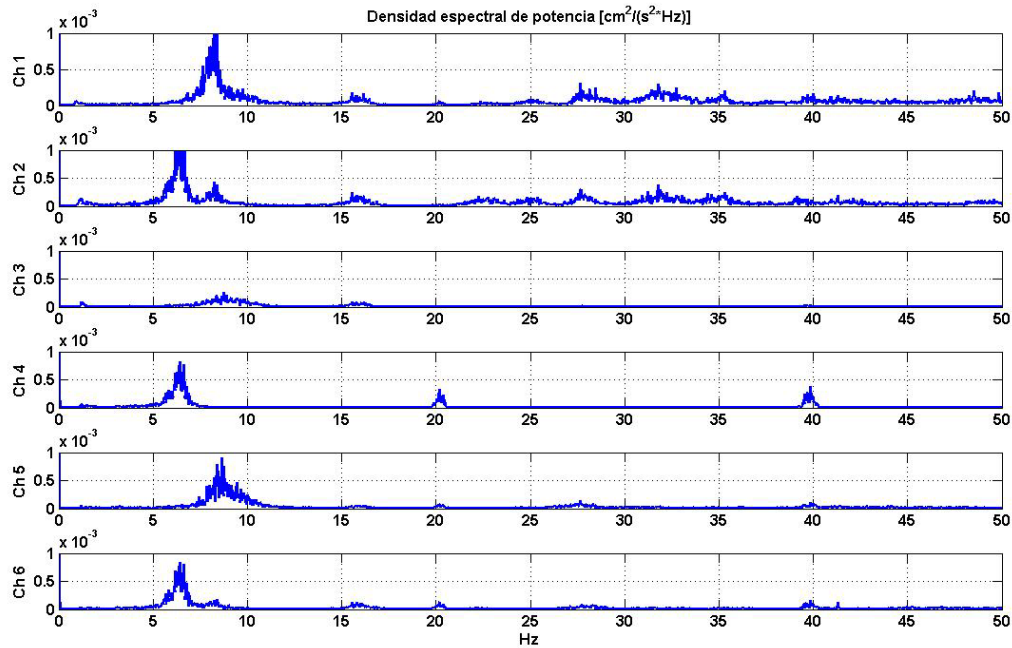


Figura 5.2. 98.- Espectros de potencia U.E. María R. López.

Luego de identificadas las posibles frecuencias modales, se calculó la densidad espectral cruzada entre varios registros seleccionados, de manera de poder determinar frecuencias comunes y ángulo de fase entre ellos.

El criterio de selección consiste en buscar en los espectros cruzados aquellas frecuencias vistas en los espectros directos y que a su vez presenten ángulos de fase iguales a 0(cero) o a π radianes (180°), lo cual es indicativo de frecuencia de vibración modal.

Se presentan a continuación una colección de gráficas de densidad espectral cruzada y de amplitud media cuadrática acumulada para varios registros.

Como información adicional se realizó la comprobación de comportamiento como diafragma rígido a través del análisis de correlación de los registros de rotación.

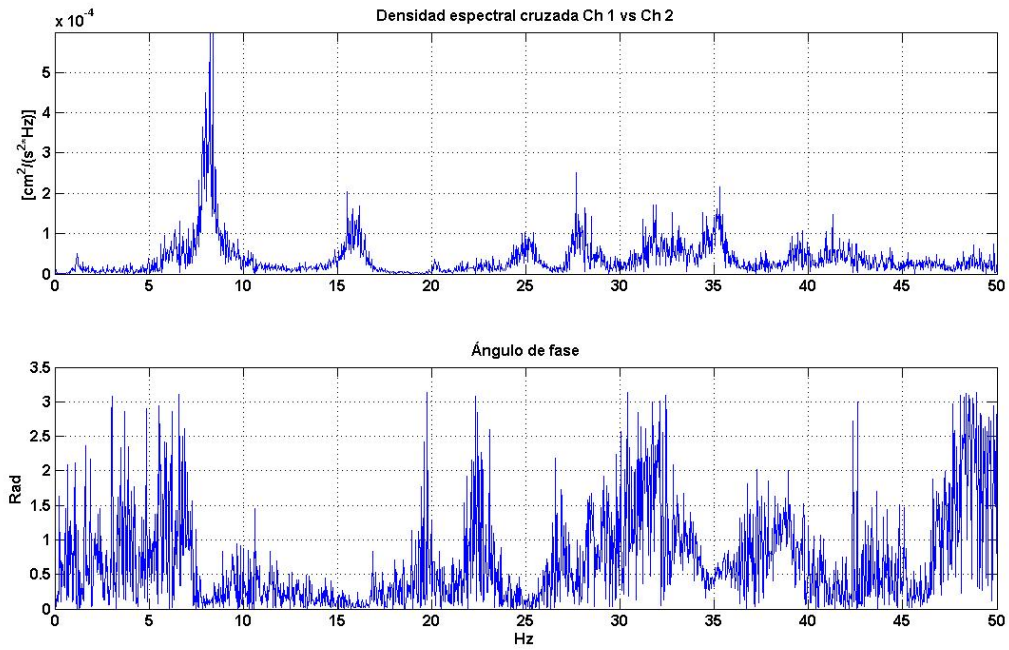


Figura 5.2. 99.- Densidad espectral cruzada Ch 1 vs Ch 2.

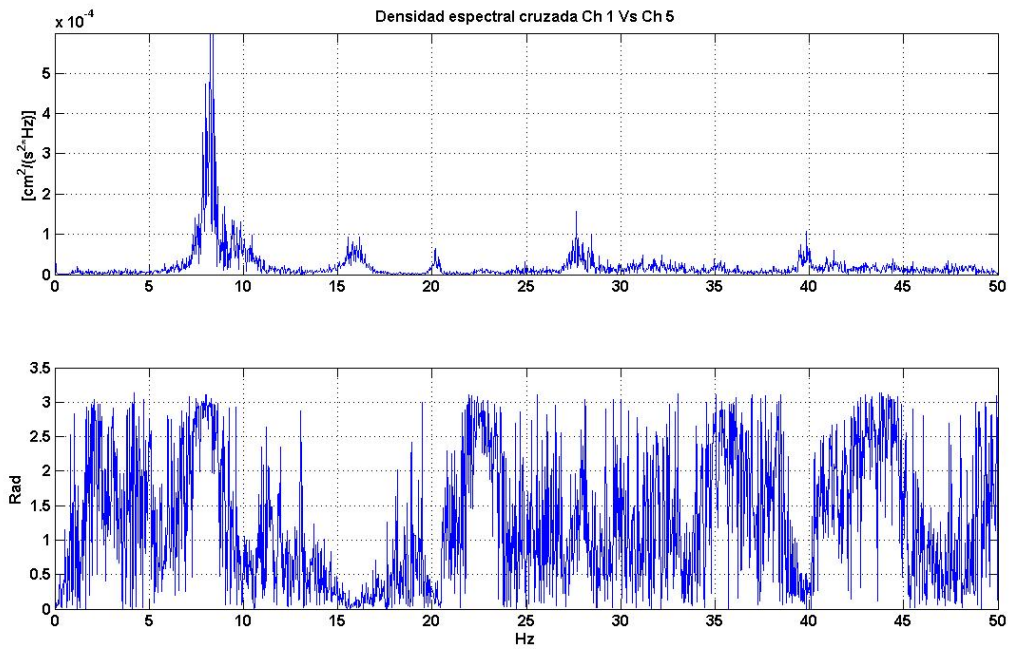


Figura 5.2. 100.- Densidad espectral cruzada Ch 1 vs Ch 5.

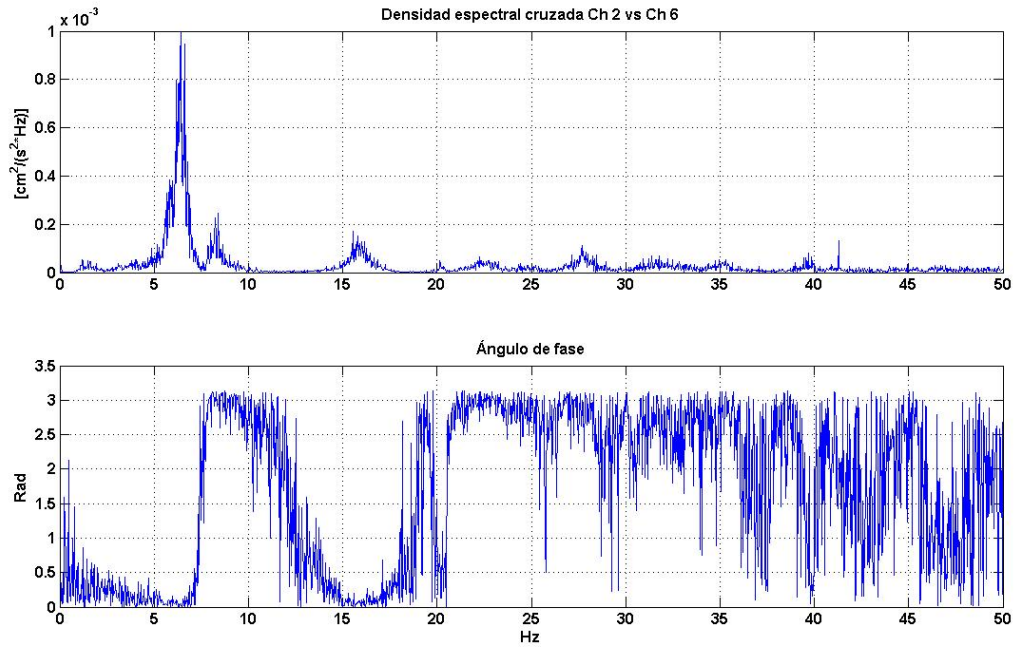


Figura 5.2. 101.- Densidad espectral cruzada Ch 2 vs Ch 6.

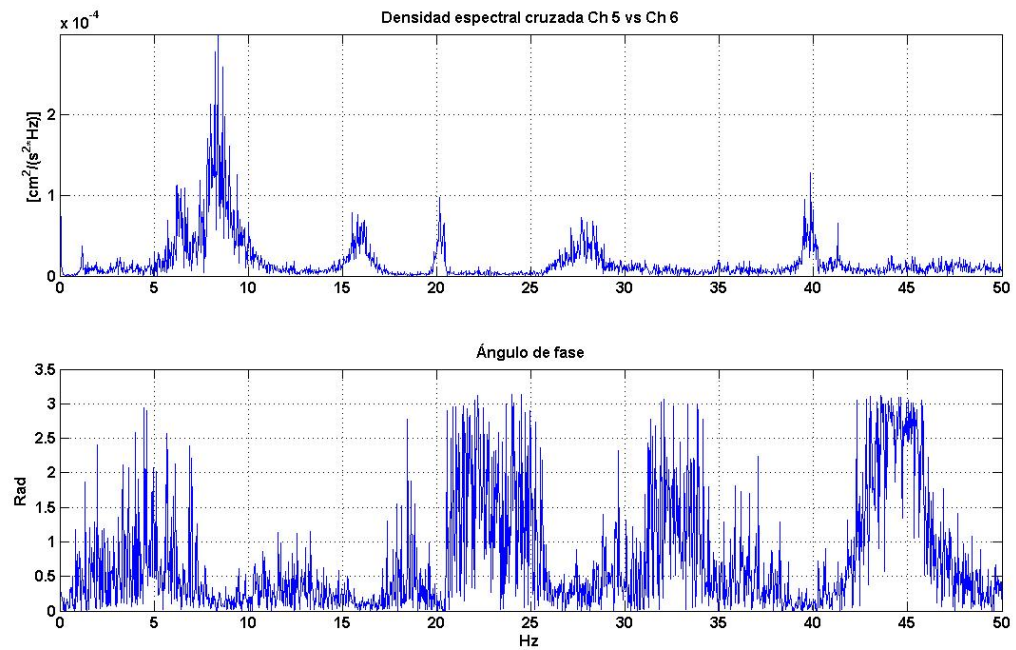


Figura 5.2. 102.- Densidad espectral cruzada Ch 2 vs Ch 6.

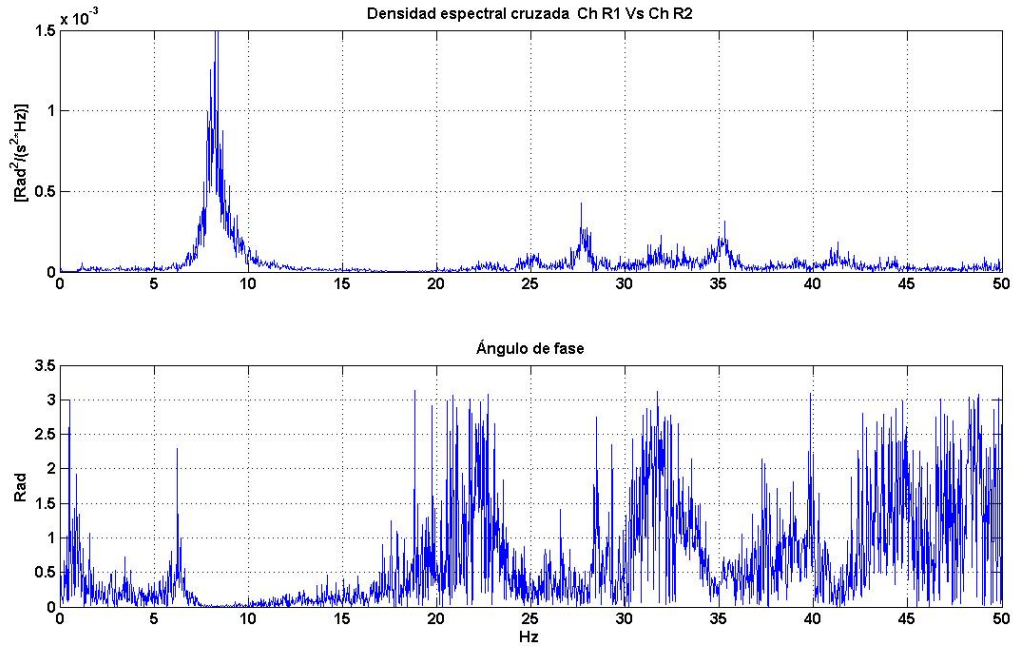


Figura 5.2. 103.- Densidad espectral cruzada para los registros rotacionales.

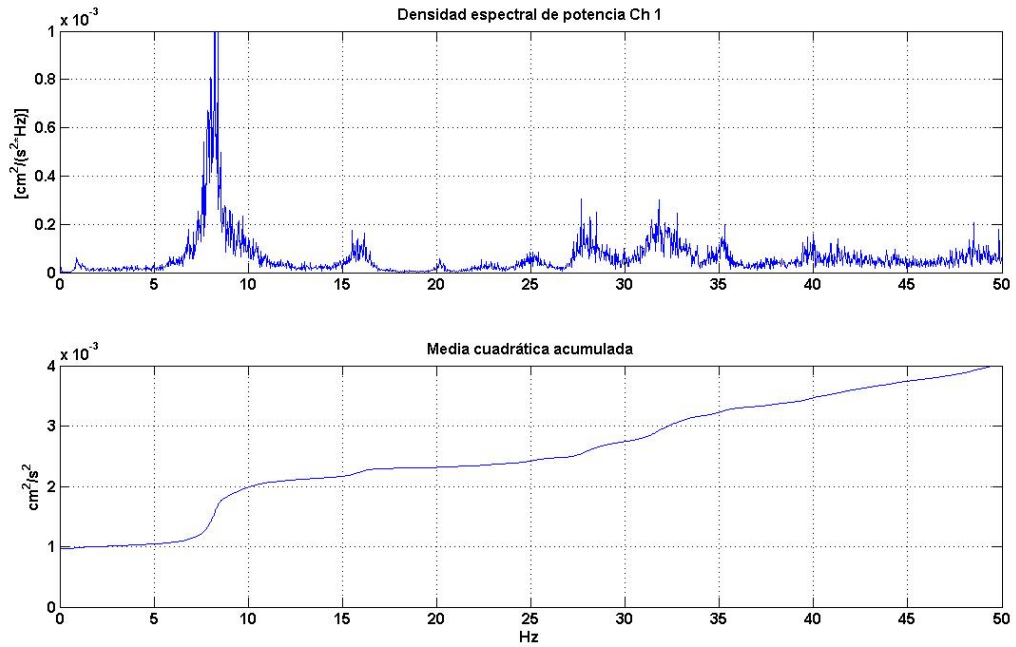


Figura 5.2. 104.- Amplitud por frecuencia Ch 1.

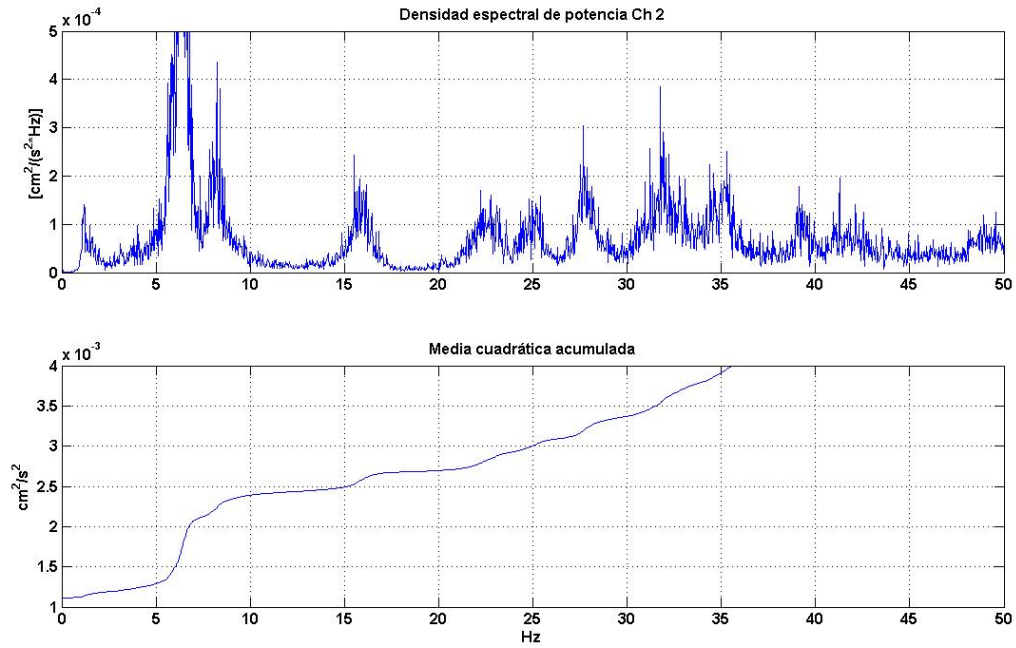


Figura 5.2. 105.- Amplitud por frecuencia Ch 2.

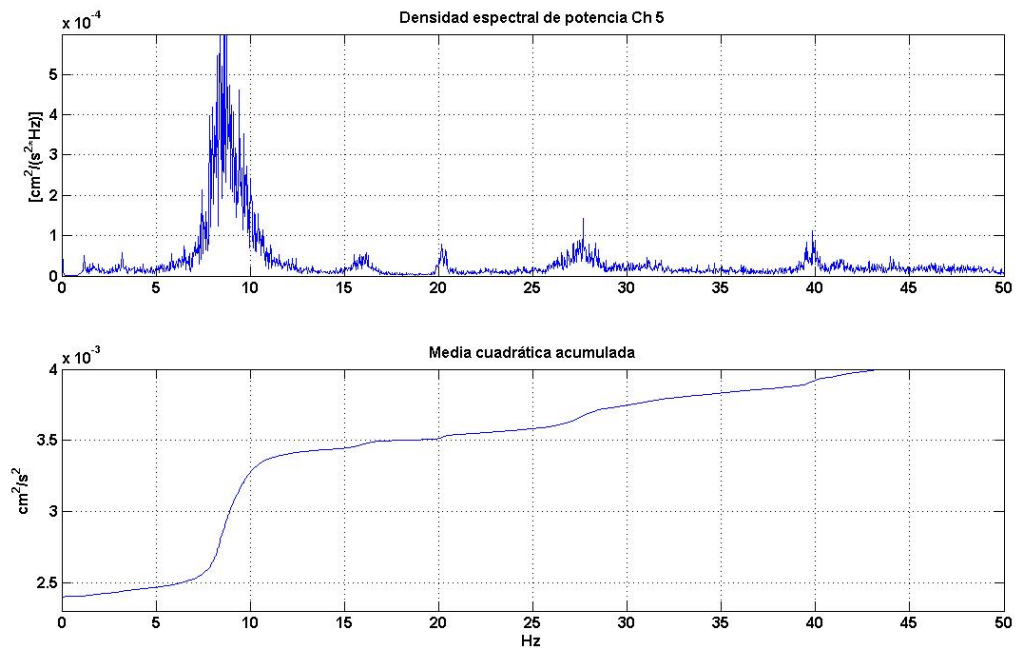


Figura 5.2. 106.- Amplitud por frecuencia Ch 5.

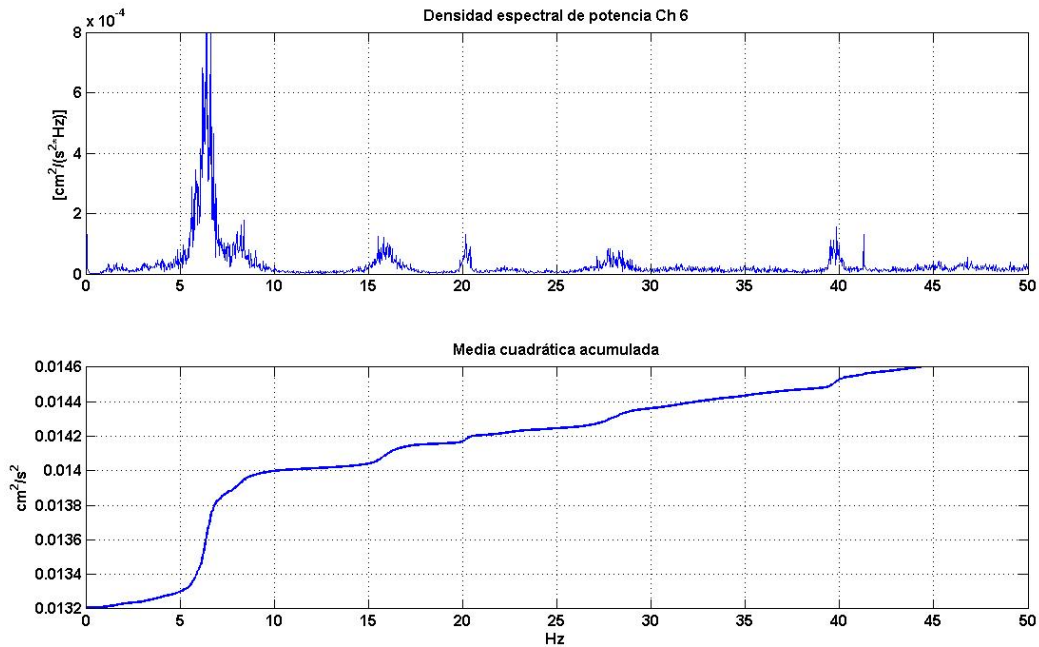


Figura 5.2. 107.- Amplitud por frecuencia Ch 6.

c) *Análisis de Resultados*

Se presentan a continuación las tablas con los resultados provenientes de los espectros de potencia con el análisis de correlación cruzada, resumido este último como fases, las cuales pueden ser positivas o negativas.

Tabla 5.2.18.- Análisis de correlación cruzada.

Análisis de correlación cruzada de registros					
Arreglo	Sensor / registro	Sensor / registro	Frecuencias detectadas		
			6.40	8.2	15.8
1	Ch1	Ch2		+	+
	Ch1	Ch5		-	+
	Ch2	Ch6	+	-	+
	Ch5	Ch6		+	+
	ChR1	ChR2		+	

Tabla 5.2. 19.- Amplitud de velocidad de registros.

Amplitud de Movimiento				
	Sensor / registro	Frecuencias detectadas		
		6.40	8.2	15.8
MEDIAS CUADRÁTICAS ESPECTRALES	Ch1	0	0.001	0.0001
	Ch2	0.0010	0.0002	0.0002
	Ch3	0	0	0
	Ch4	0	0	0
	Ch5	0.0000	0.0009	0.00005
	Ch6	0.0006	0.0001	0.00015
MÁXIMOS NORMALIZADOS	Ch1	0.00	1.00	0.50
	Ch2	1.00	0.20	1.00
	Ch3	0.00	0.00	0.00
	Ch4	0.00	0.00	0.00
	Ch5	0.00	0.90	0.25
	Ch6	0.63	0.10	0.75

d) *Conclusiones*

Del análisis de los resultados obtenidos a partir del procesamiento de los datos adquiridos en la medición de propiedades dinámicas de la U.E. María Reina de López:

- Los tres primeros modos tienen frecuencias de 6.40, 8.2 y 15.8 Hz respectivamente con una tolerancia de cálculo de ± 0.0152 Hz puesto que la tasa de muestreo fue de 500 Hz y el número de puntos por ventana igual a 16384 muestras.
- El primer modo es traslacional en dirección Y, el segundo es principalmente torsional con ligero acoplamiento traslacional y el tercero, traslacional en dirección X con ligero acoplamiento torsional.
- El amortiguamiento calculado para el primer modo es 6.25% , 4.87% para el segundo y para el tercero 4.74% del amortiguamiento crítico. Estos amortiguamientos son representativos de vibraciones a baja amplitud y no deben

tomarse para análisis estructurales de edificaciones que no vayan a estar sujetas a esta condición.

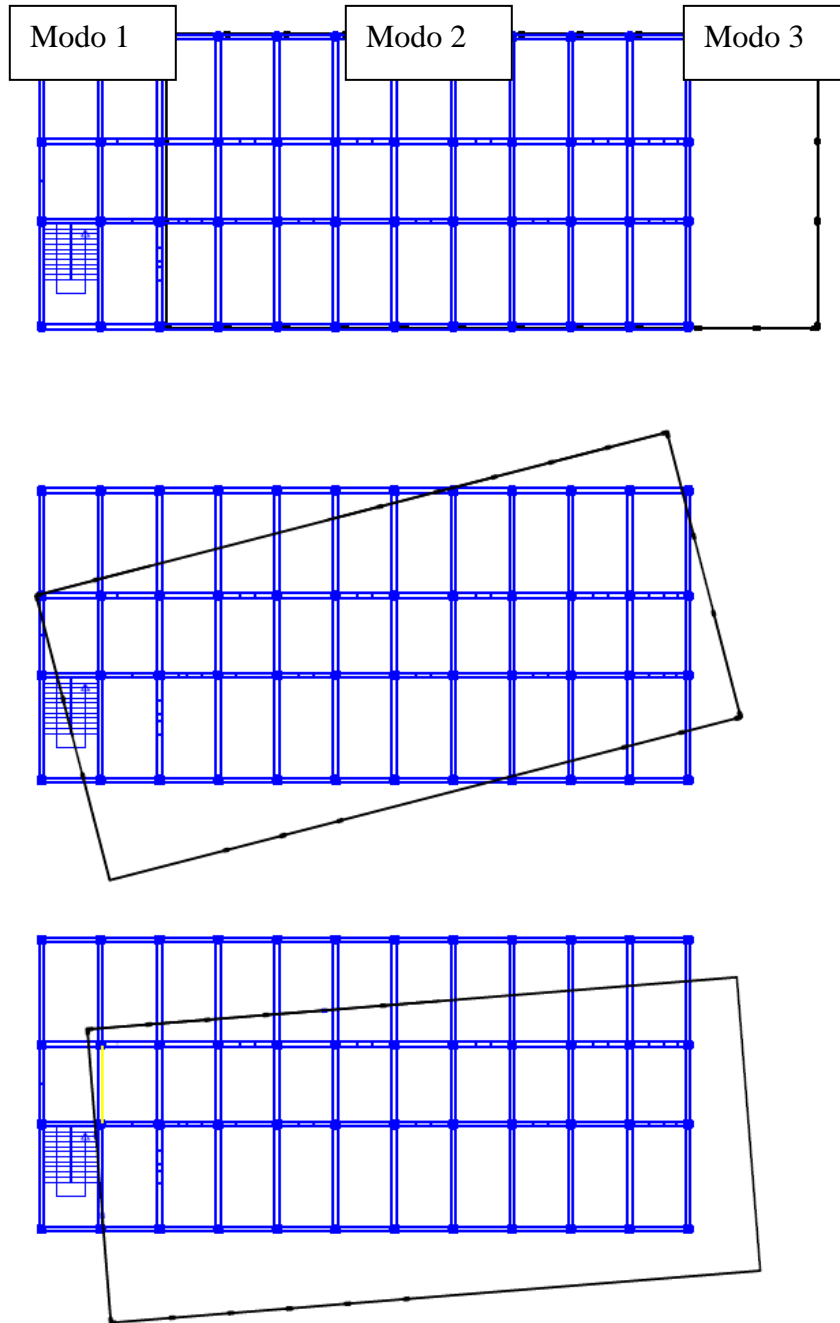


Figura 5.2. 108.- Modos de vibración U.E. María R. López.

5.2.9.- Unidad Educativa Escuela Experimental Venezuela (2da Parte)

a) Instrumentación

Esta unidad educativa tiene por sede, una edificación que consta de dos estructuras separadas por una junta estructural. Las mismas fueron identificadas como Edificio Este y Edificio Oeste, atendiendo a la respectiva ubicación espacial. Se decidió realizar una segunda secuencia de ensayos en esta escuela a fin de mejorar la calidad de los resultados. Se definieron dos (02) arreglos, uno de ellos establecido exclusivamente en el edificio Oeste, mientras el restante se distribuyó entre los dos edificios con la intención de investigar el efecto de la junta estructural. La distribución y orientación de estos arreglos es mostrada en la figura 5.2.109.

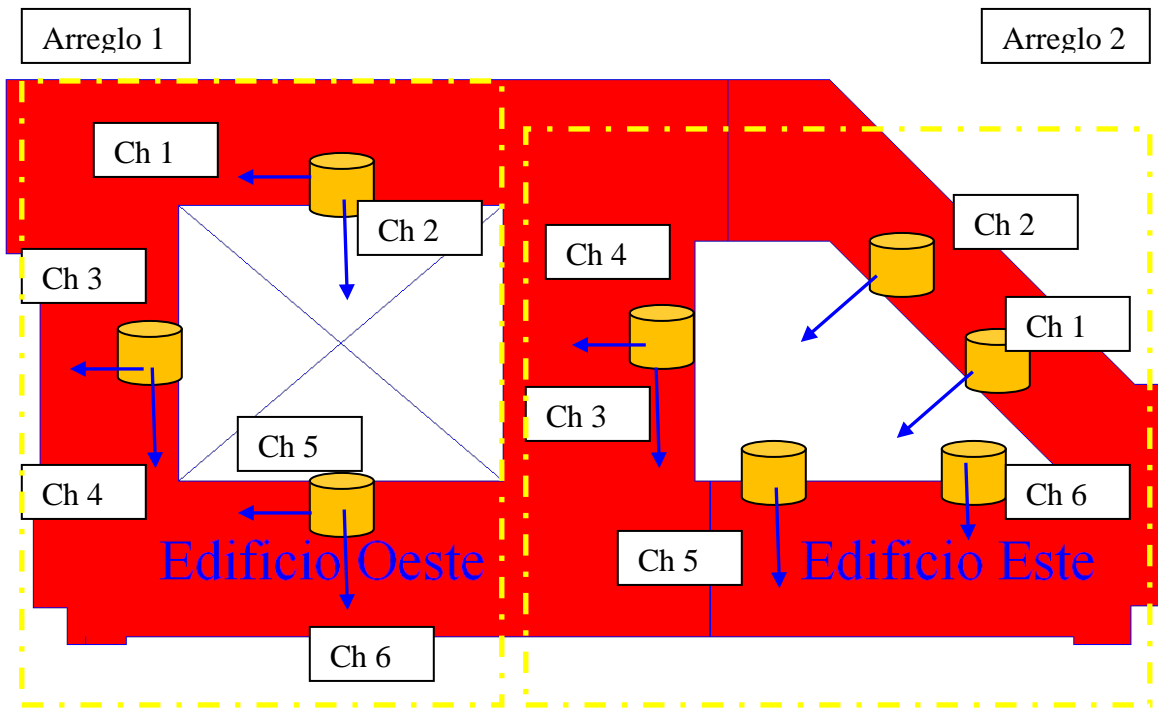


Figura 5.2. 109.- Esquema de la instrumentación de la U.E. Nacional Experimental Venezuela.

Con la finalidad de detectar experimentalmente la posible existencia de la irregularidad tipificada como diafragma flexible, el arreglo 1 se distribuyó en tres pares de instrumentos instalados en los tramos medios de cada lado de la losa, tal como se aprecia en la figura. Analíticamente se puede comprobar que las estructuras poseen diafragma flexible; en la tabla 5.2.20 se detalla este análisis. En esta misma tabla se leen los valores del cociente área-hueca/área-total para cada estructura, así, para el edificio Este dicho valor es 0.29 mientras para el edificio Oeste tenemos que el valor es 0.24; de tal forma que, al menos normativamente ambos diafragmas pueden ser clasificados como flexibles.

Tabla 5.2. 20.- Propiedades geométricas de las plantas de la edificación.

Edificio	Área total, At (m ²)	Área hueca, Ah (m ²)	Área losa, Al (m ²)	Cociente (Ah/At)	Clasificación
Este	814.86	234.41	580.45	0.29	Diafragma flexible
Oeste	1605.80	379.80	1226.00	0.24	Diafragma flexible

b) Registro y procesamiento de datos

b.1) Edificio Este

Se adquirieron los datos a una tasa de 500 muestras por segundo durante 58 minutos y almacenados para su posterior procesamiento utilizando el programa de computación MatLab.

Aplicando rutinas propias y herramientas proporcionadas por el programa de cálculo, se determinaron los espectros de potencia suavizados (para cada canal), en los cuales se identificaron los picos máximos asociados a las componentes de frecuencias predominantes en el registro.

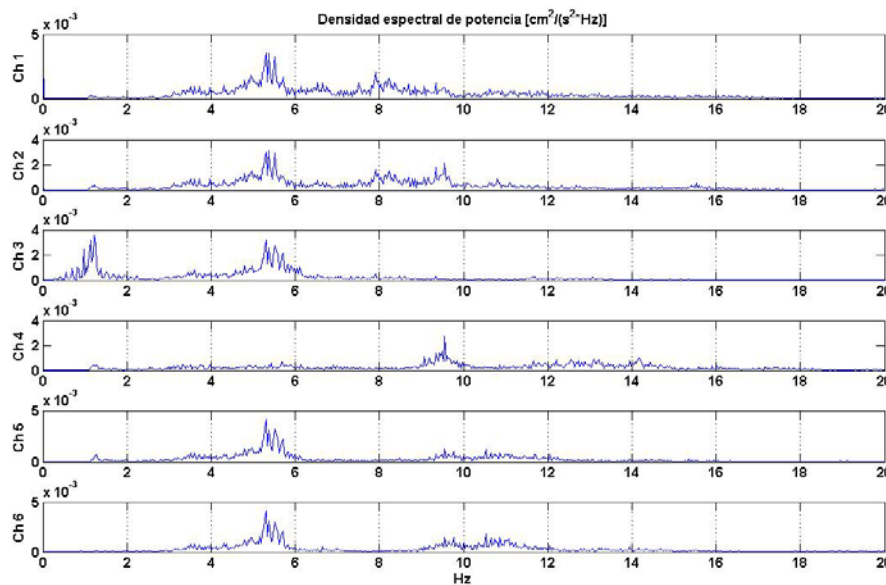


Figura 5.2. 110.- Espectros de potencia de la U.E. Nacional Experimental Venezuela.

El siguiente paso consistió en estudiar la correlación existente entre los distintos picos máximos de cada registro. Para ello se procedió a estimar la densidad espectral de potencia cruzada con la cual se detectaron las frecuencias comunes entre pares de registros y el ángulo de fase existente entre estos. El ángulo de fase, es el parámetro indicador del tipo de correlación existente, así encontraremos dos casos: correlación positiva ($\varnothing = 0^\circ$) y correlación negativa ($\varnothing = 180^\circ$), cada una de las cuales proveerá información relevante

concerniente a las propiedades modales del edificio. Un paso adicional, efectuado sobre cada uno de los registros individuales, fue el cálculo de la media cuadrática acumulada en el dominio de las frecuencias y a través de ella se pudo estimar las amplitudes relativas dentro de los modos hallados.

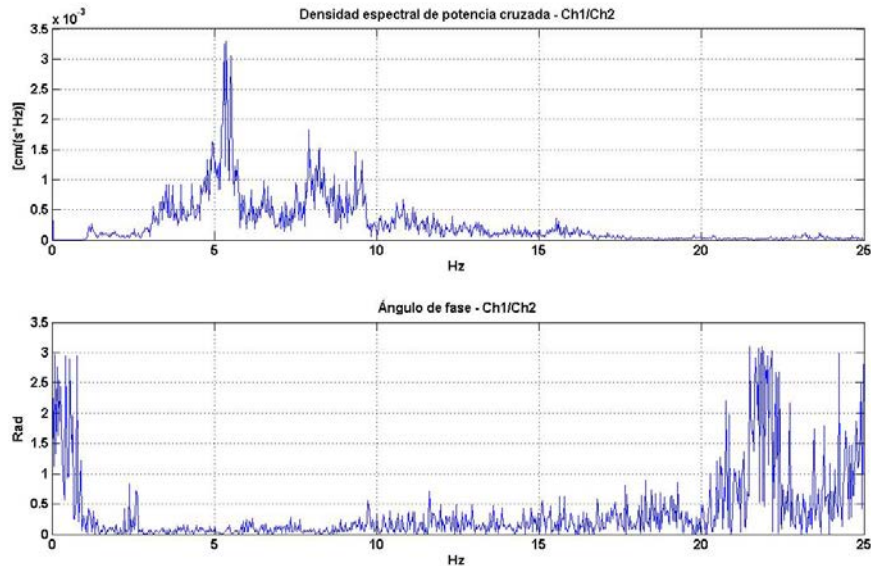


Figura 5.2. 111.- Densidad espectral de cruzada Ch 1 vs Ch 2.

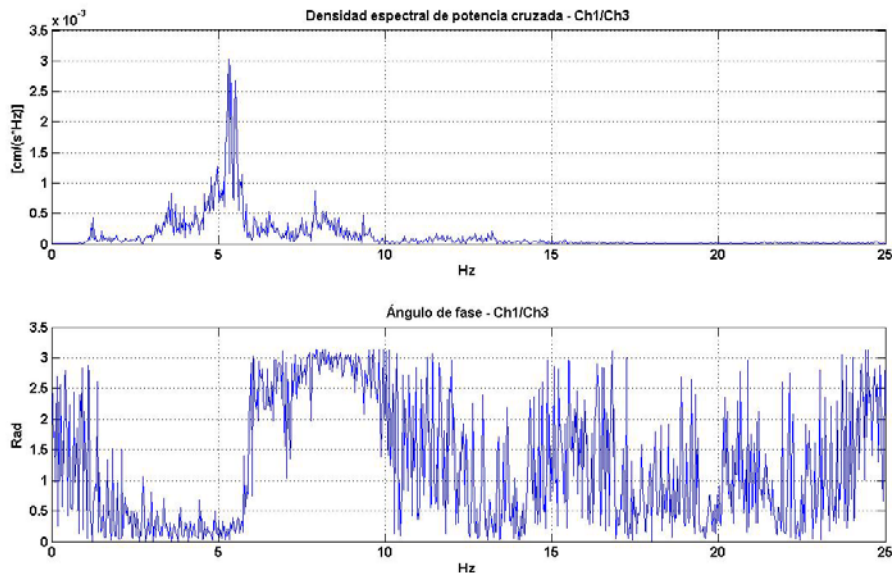


Figura 5.2. 112.- Densidad espectral de cruzada Ch 1 vs Ch 3.

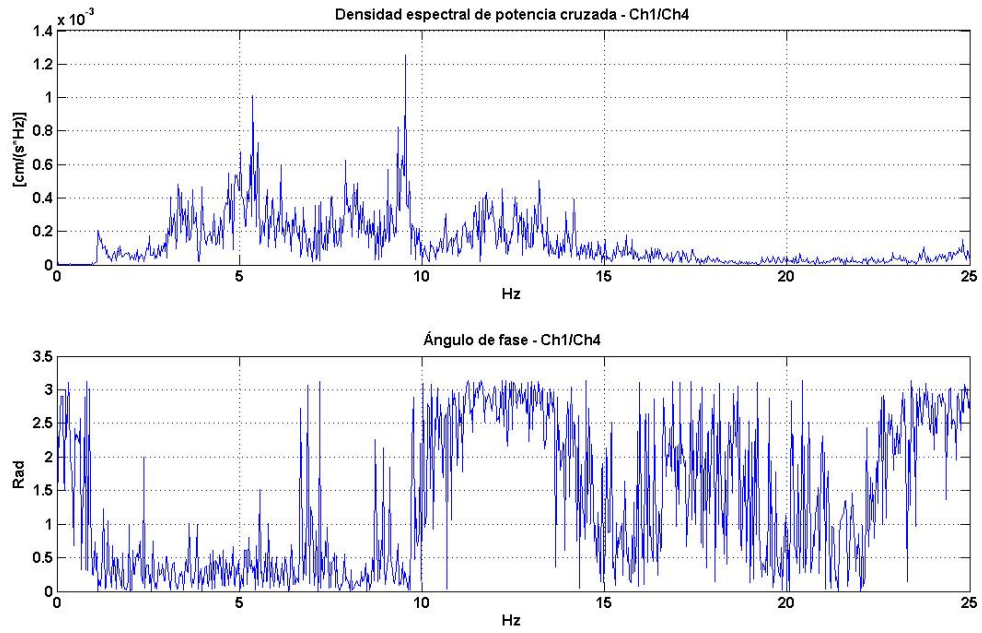


Figura 5.2. 113.- Densidad espectral de cruzada Ch 1 vs Ch 4.

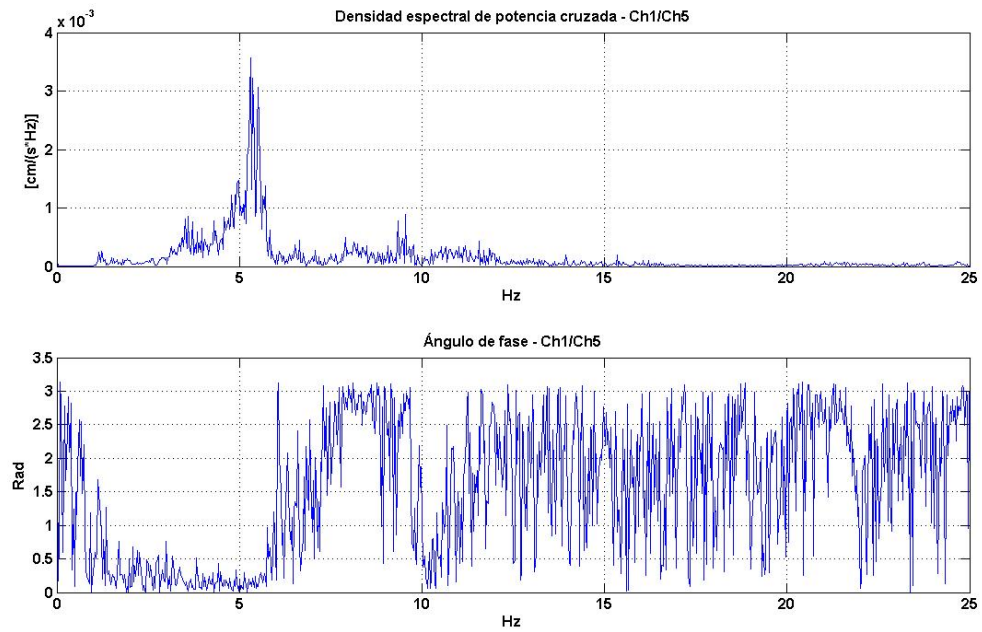


Figura 5.2. 114.- Densidad espectral de cruzada Ch 1 vs Ch 5.

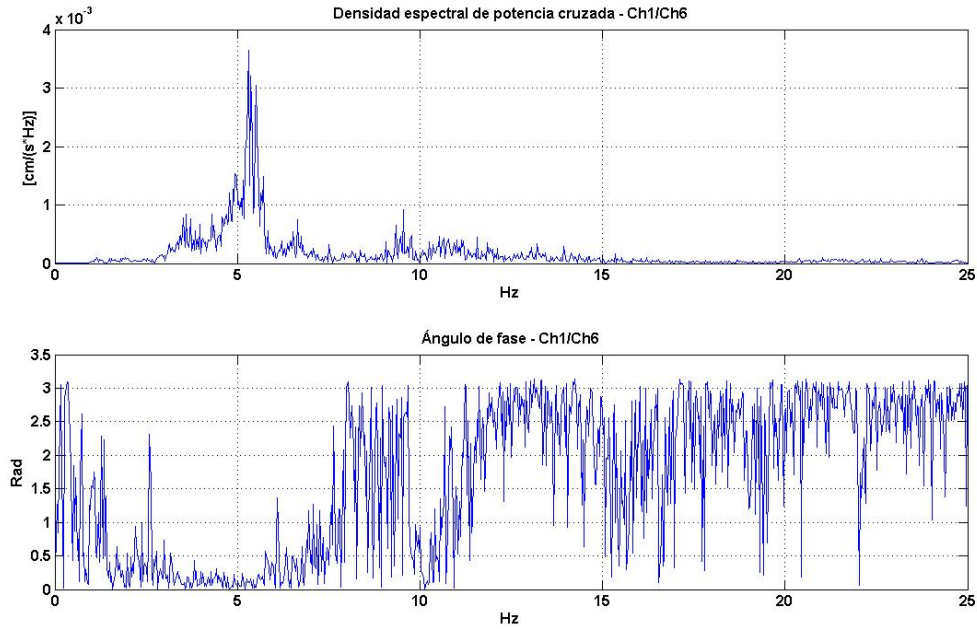


Figura 5.2. 115.- Densidad espectral de cruzada Ch 1 vs Ch 6.

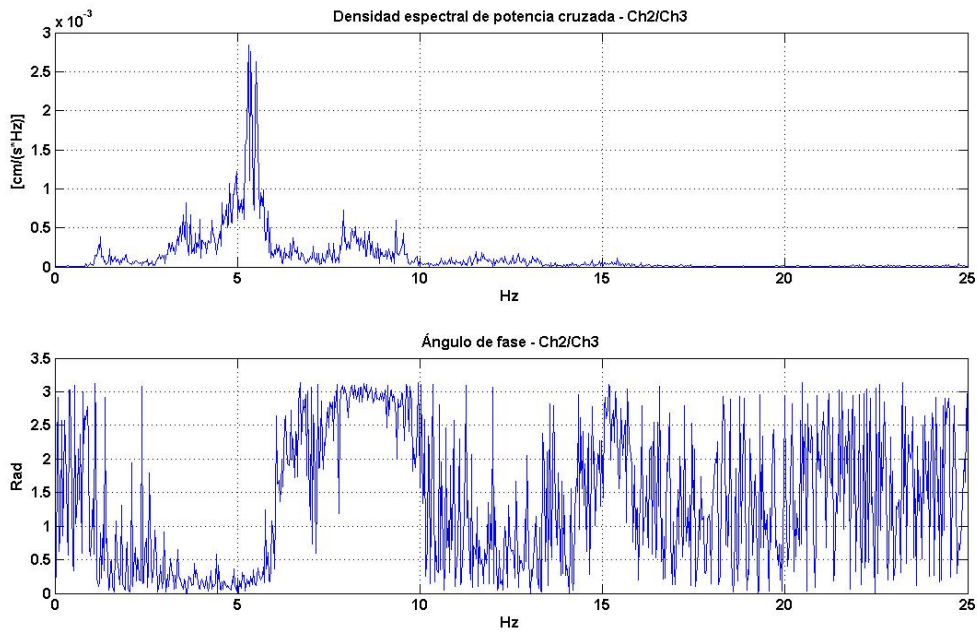


Figura 5.2. 116.- Densidad espectral de cruzada Ch 2 vs Ch 3.

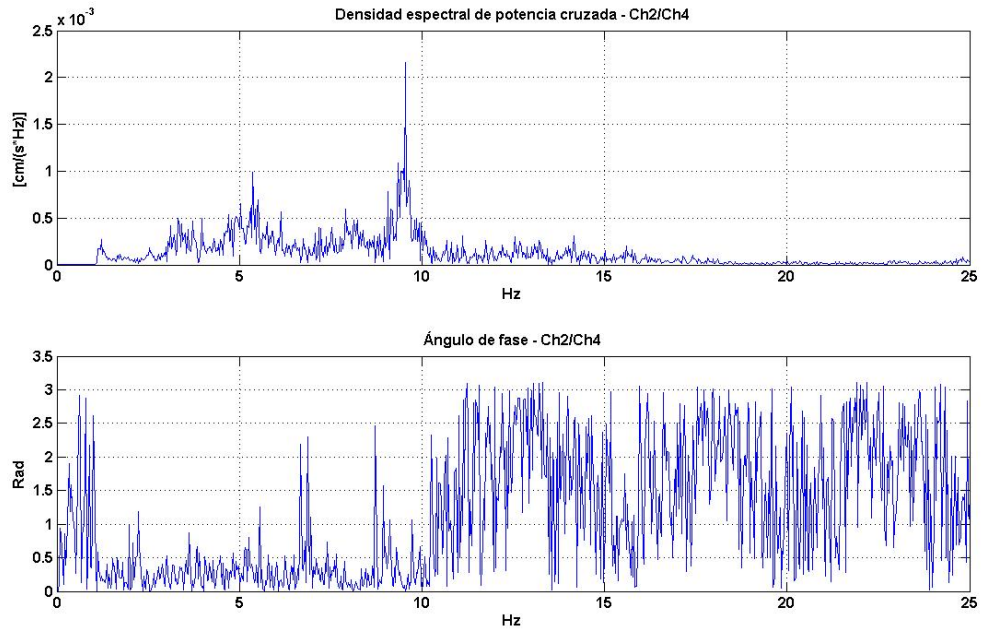


Figura 5.2. 117.- Densidad espectral de cruzada Ch 2 vs Ch 4.

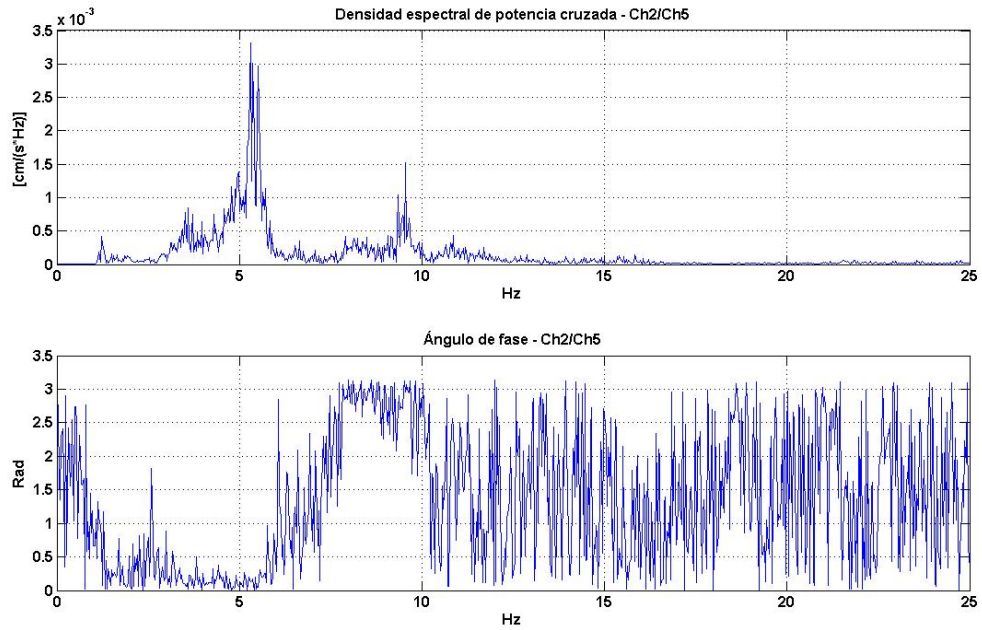


Figura 5.2. 118.- Densidad espectral de cruzada Ch 2 vs Ch 5.

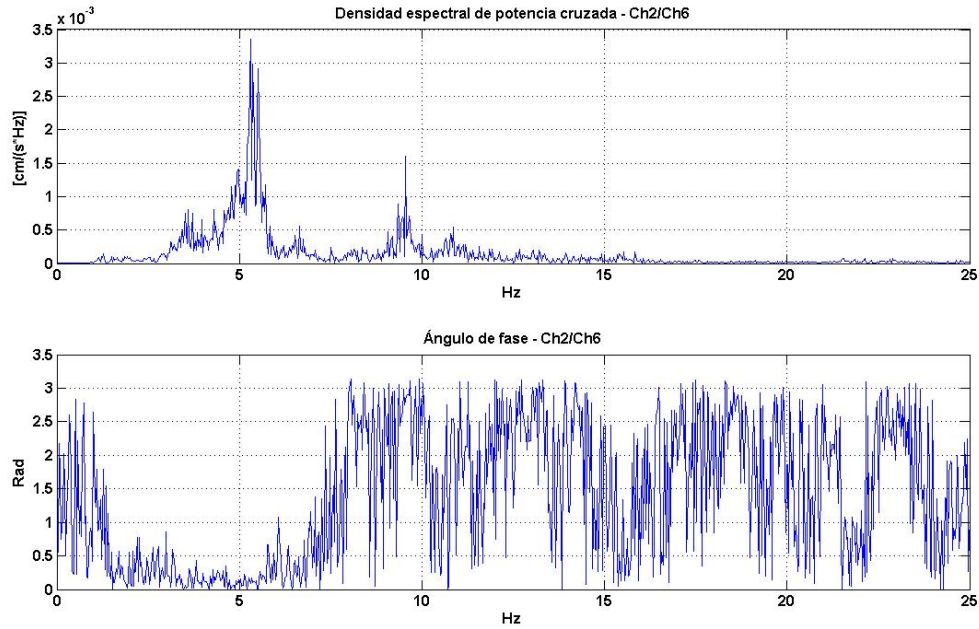


Figura 5.2. 119.- Densidad espectral de cruzada Ch 2 vs Ch 6.

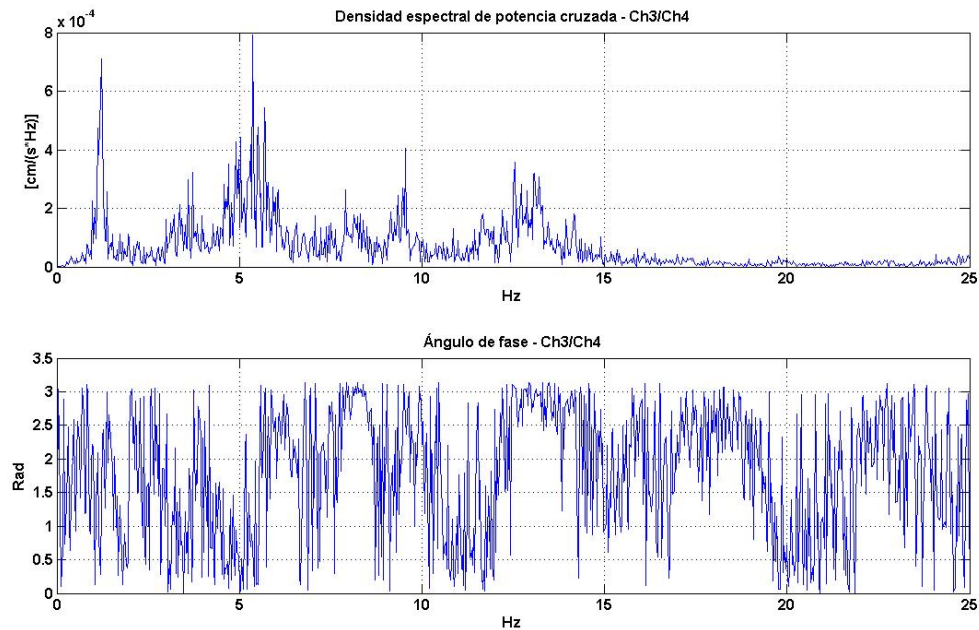


Figura 5.2. 120.- Densidad espectral de cruzada Ch 3 vs Ch 4.

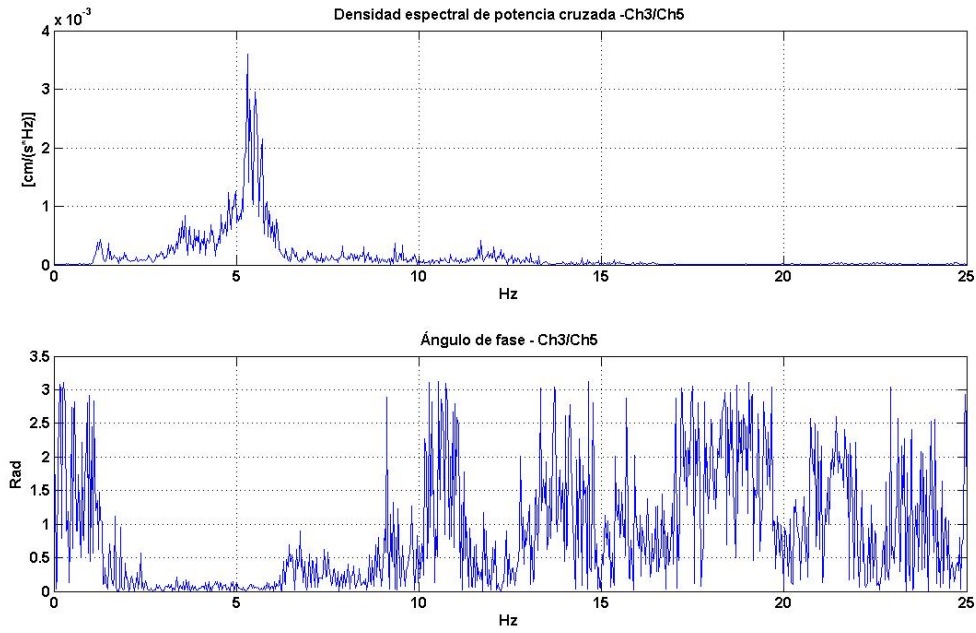


Figura 5.2. 121.- Densidad espectral de cruzada Ch 3 vs Ch 5.

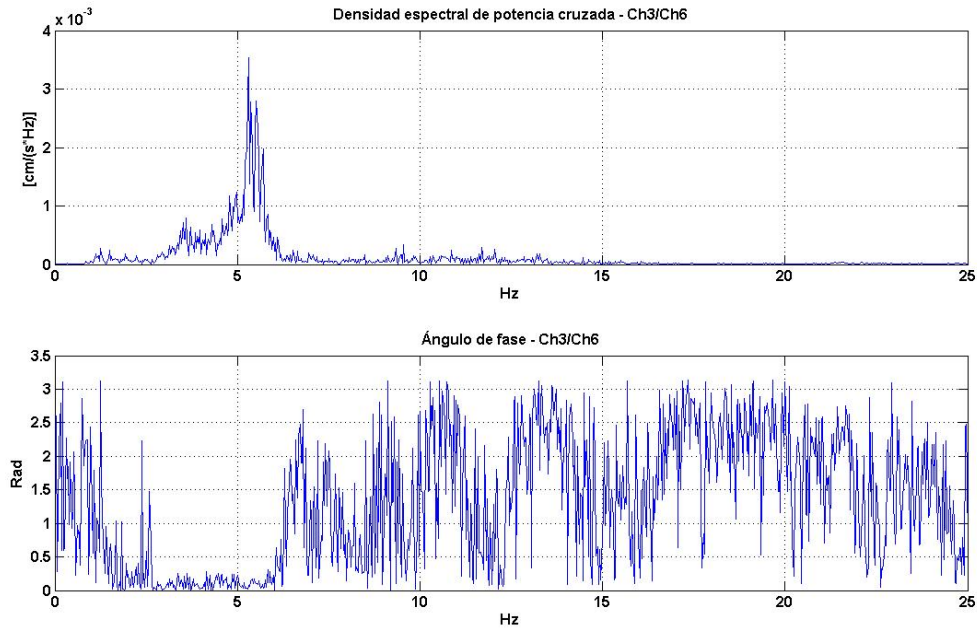


Figura 5.2. 122.- Densidad espectral de cruzada Ch 3 vs Ch 6.

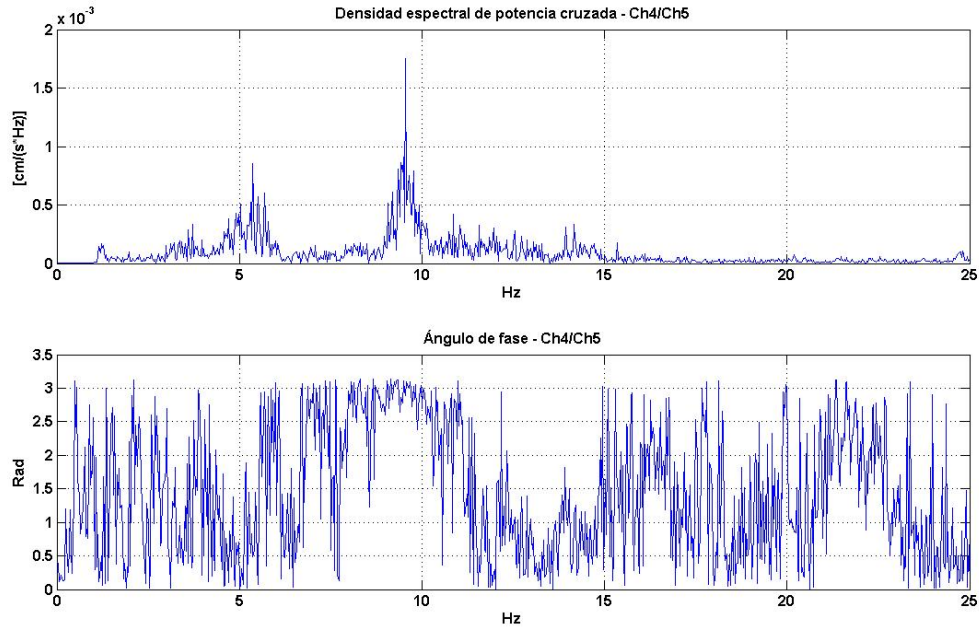


Figura 5.2. 123.- Densidad espectral de cruzada Ch 4 vs Ch 5.

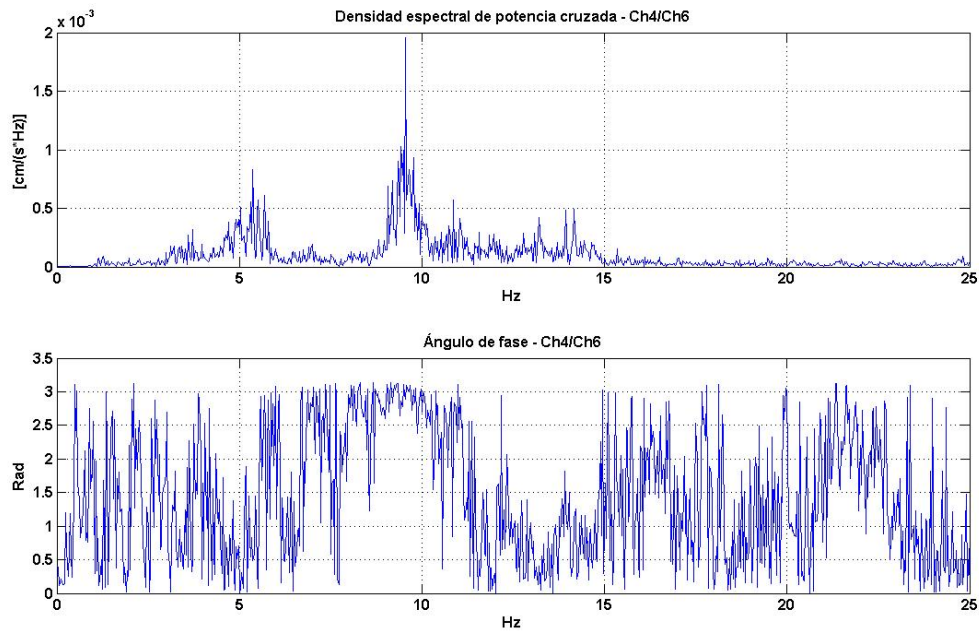


Figura 5.2. 124.- Densidad espectral de cruzada Ch 4 vs Ch 6.

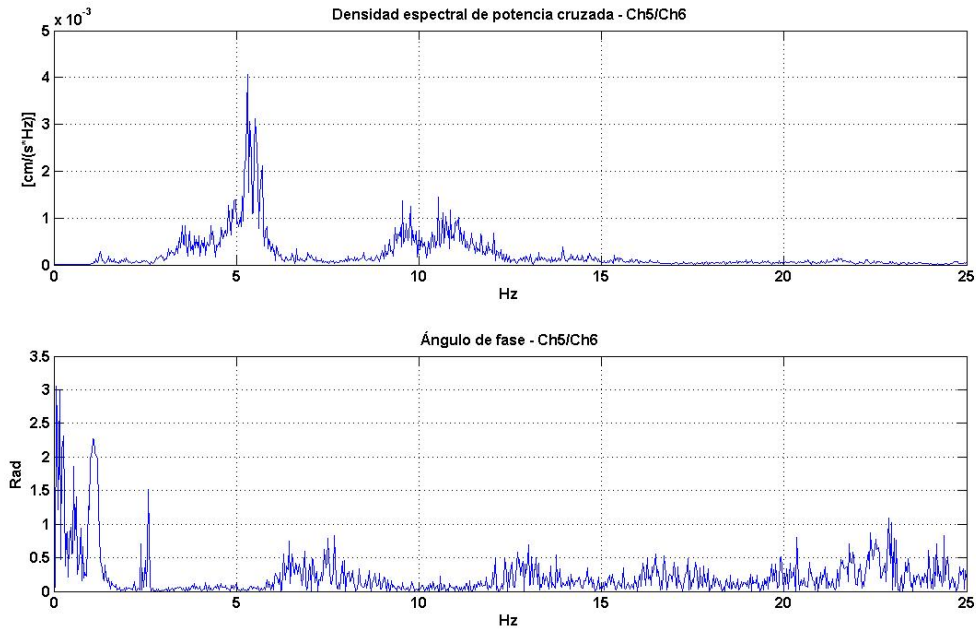


Figura 5.2. 125.- Densidad espectral de cruzada Ch 5 vs Ch 6.

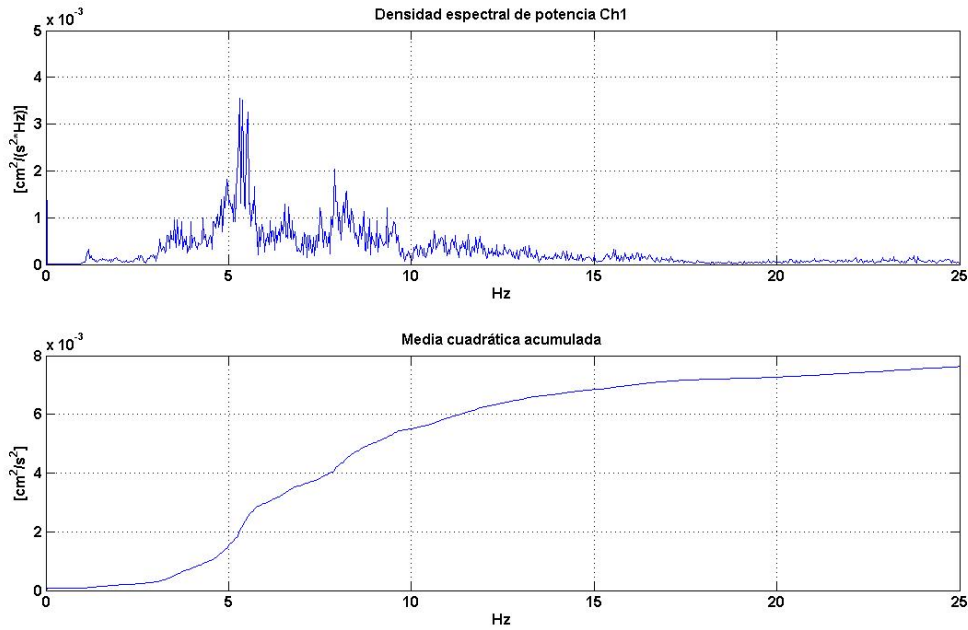


Figura 5.2. 126.- Amplitud por frecuencia Ch 1.

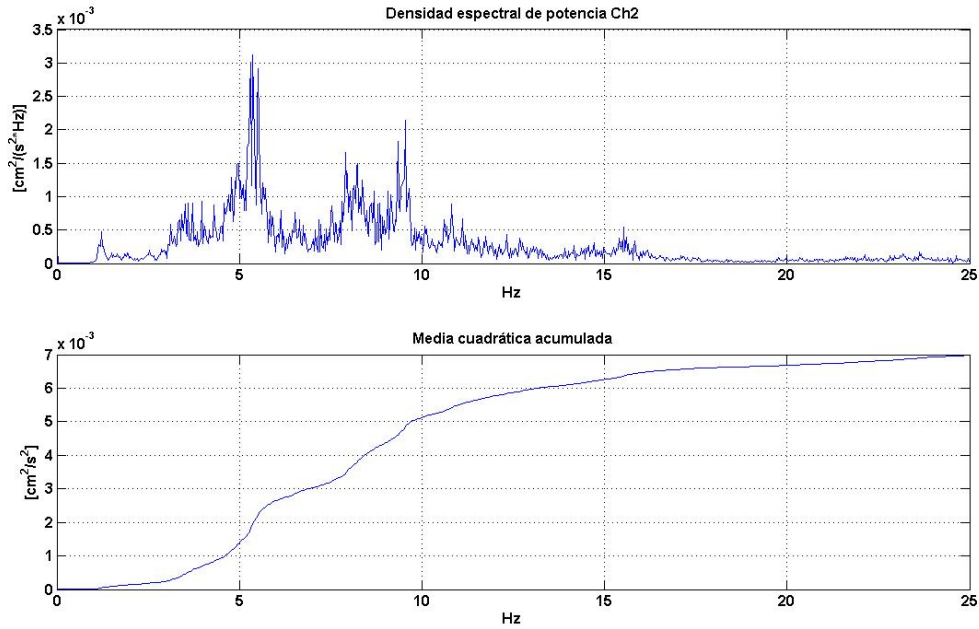


Figura 5.2. 127.- Amplitud por frecuencia Ch 2.

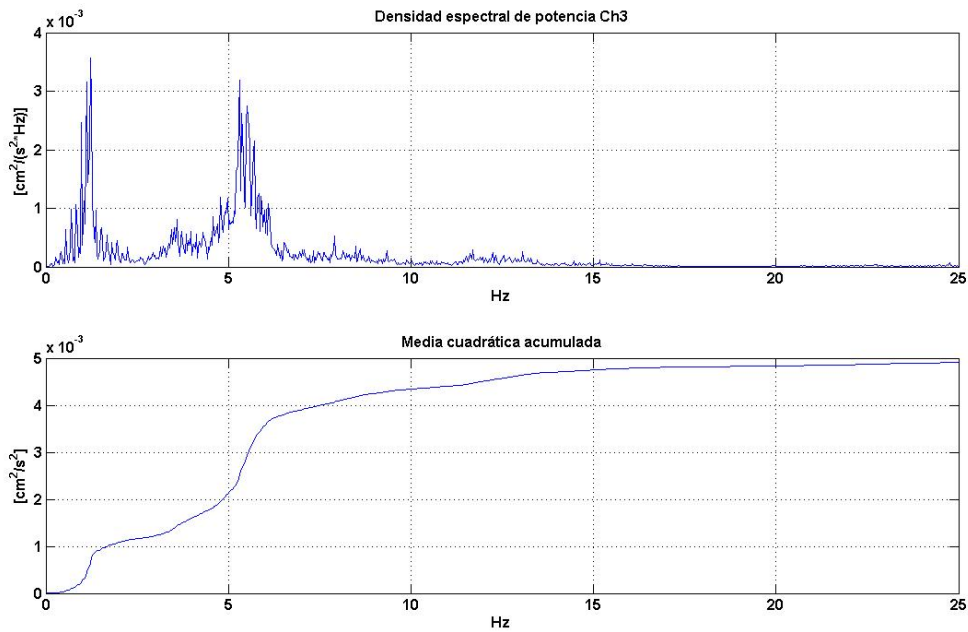


Figura 5.2. 128.- Amplitud por frecuencia Ch 3.

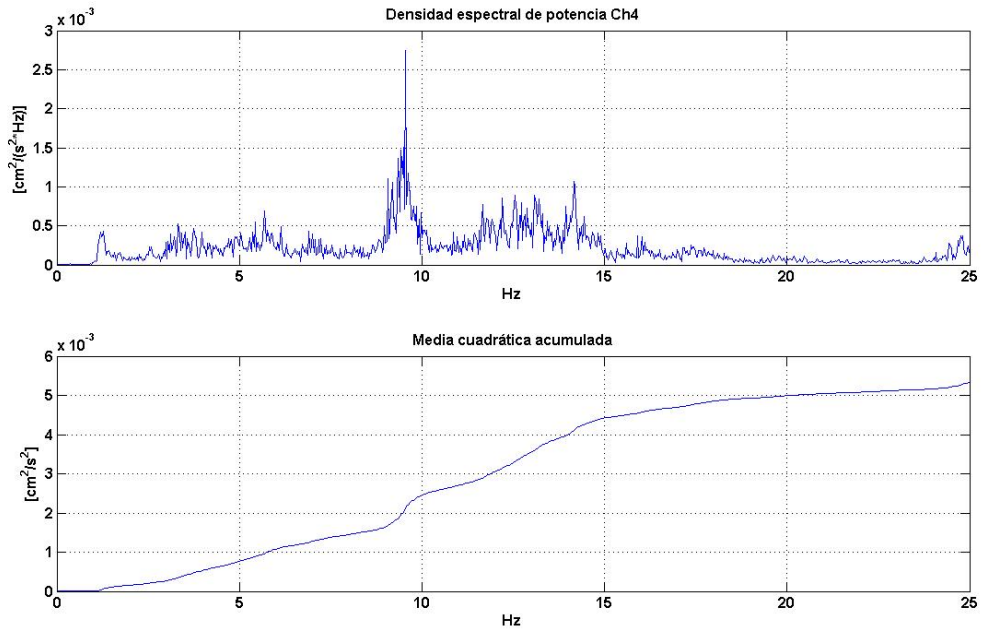


Figura 5.2. 129.- Amplitud por frecuencia Ch 4.

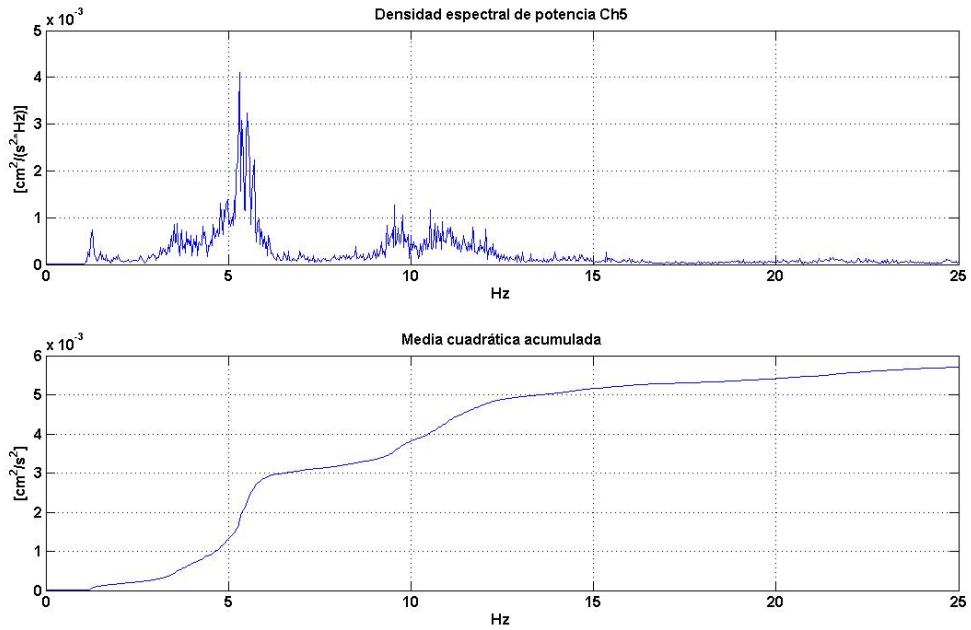


Figura 5.2. 130.- Amplitud por frecuencia Ch 5.

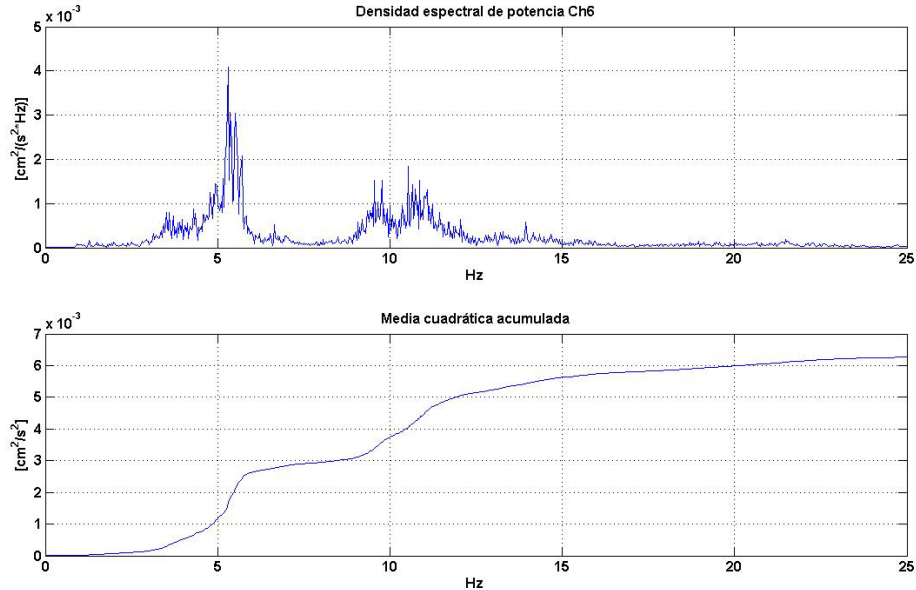


Figura 5.2. 131.- Amplitud por frecuencia Ch 6.

b.2) Edificio Oeste

Se adquirieron los datos a una tasa de 500 muestras por segundo durante 54 minutos y almacenados para su posterior procesamiento utilizando el programa de computación MatLab. El tratamiento de los registros obtenidos en este edificio se rigió por los mismos procedimientos efectuados para el edificio Este.

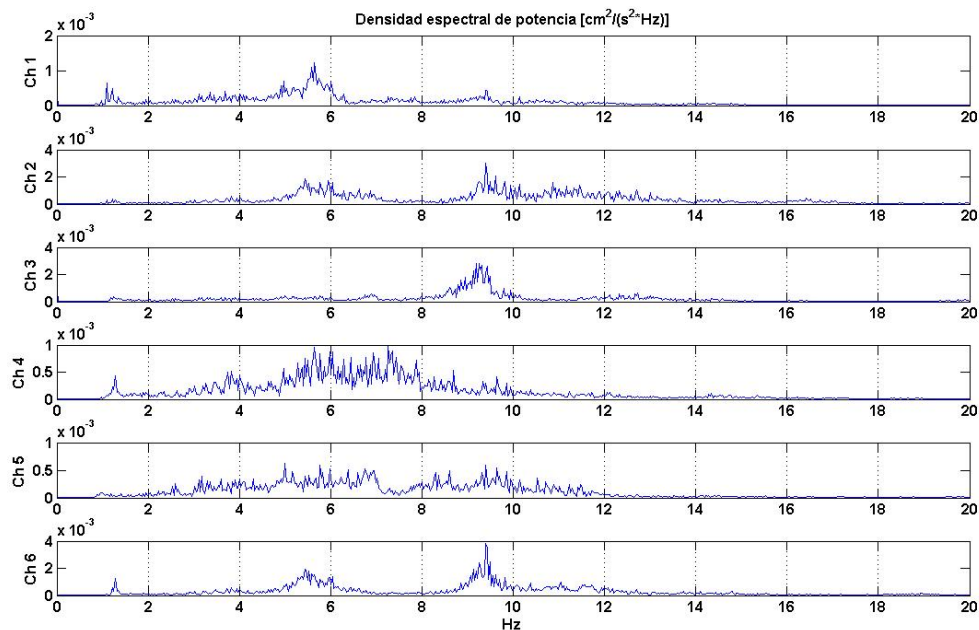


Figura 5.2. 132.- Espectros de potencia U.E. Nacional Experimental Venezuela.

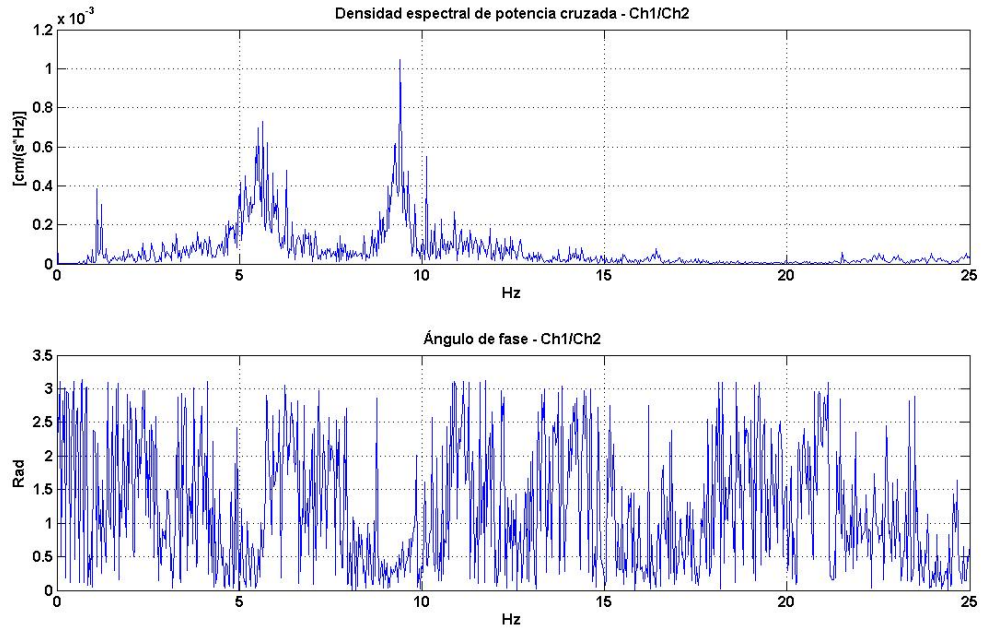


Figura 5.2. 133.- Densidad espectral cruzada Ch 1 vs Ch 2.

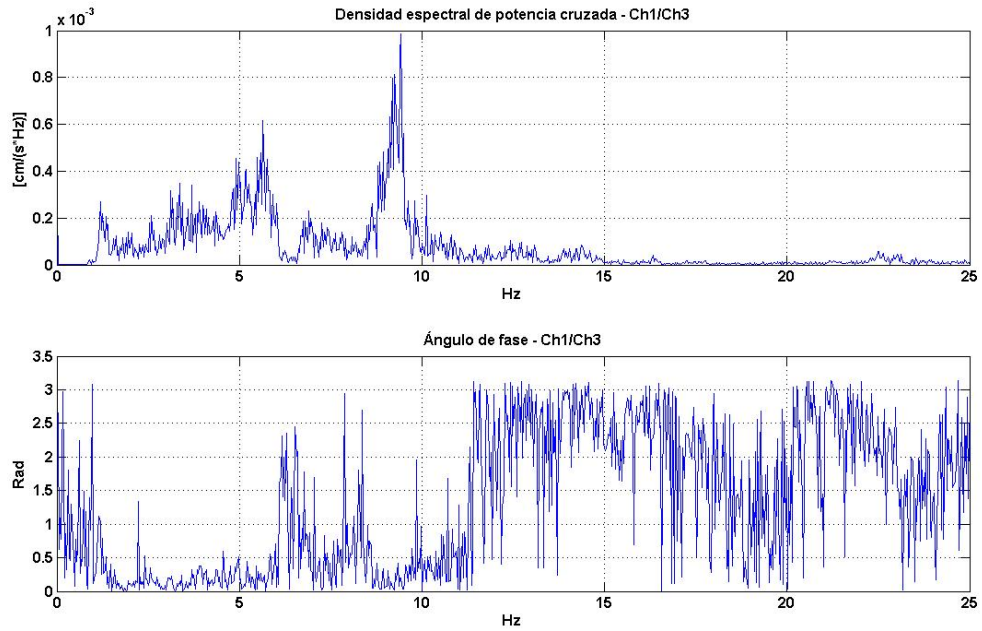


Figura 5.2. 134.- Densidad espectral cruzada Ch 1 vs Ch 3.

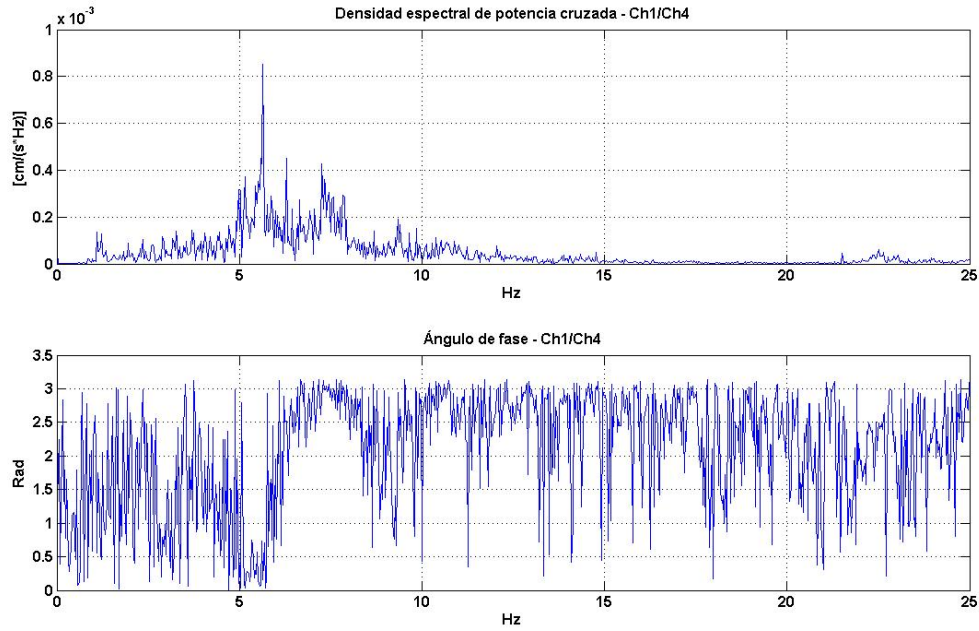


Figura 5.2. 135.- Densidad espectral cruzada Ch 1 vs Ch 4.

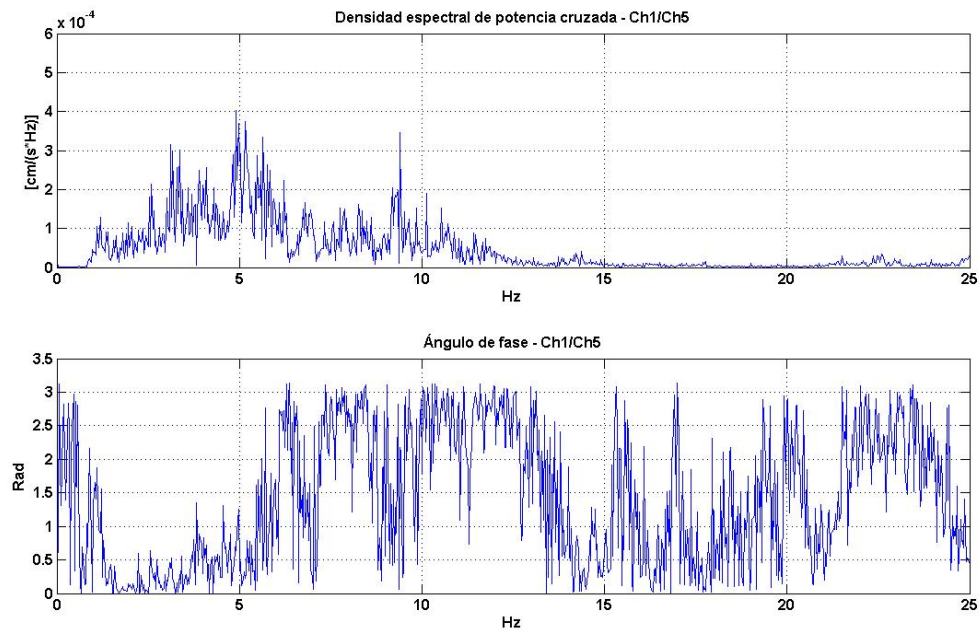


Figura 5.2. 136.- Densidad espectral cruzada Ch 1 vs Ch 5.

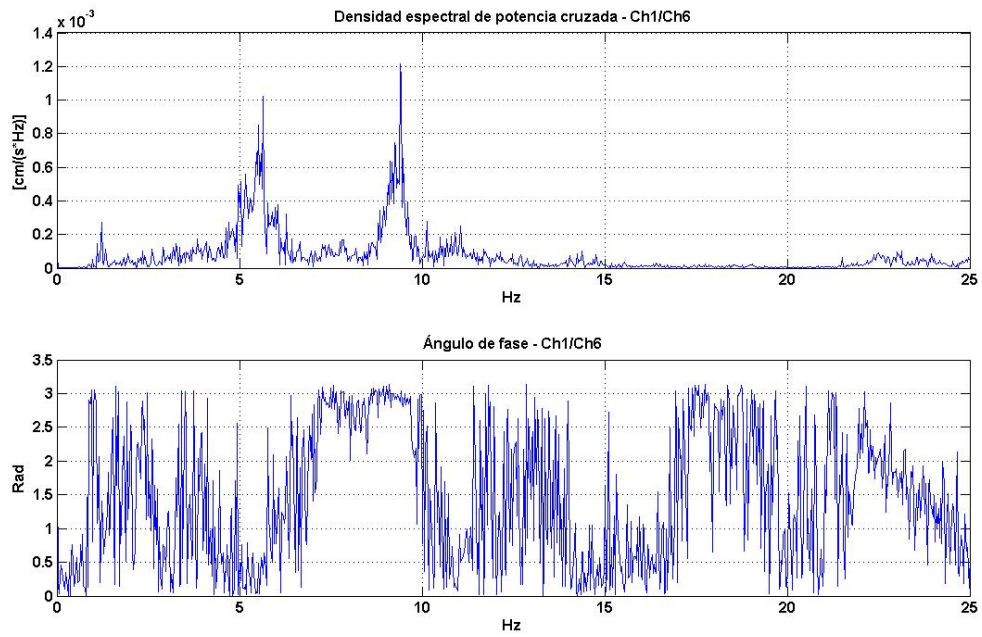


Figura 5.2. 137.- Densidad espectral cruzada Ch 1 vs Ch 6.

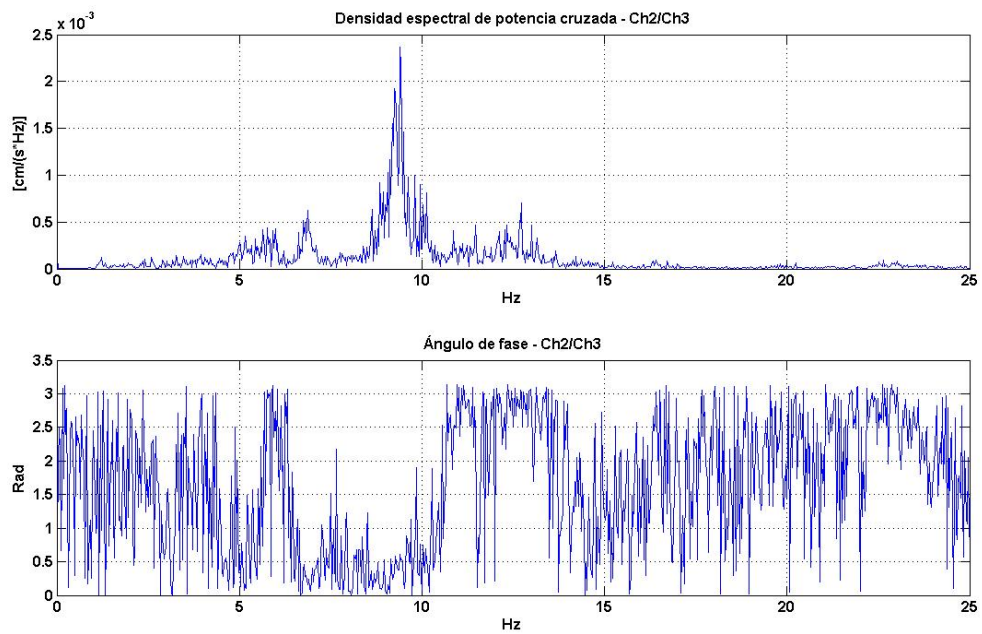


Figura 5.2. 138.- Densidad espectral cruzada Ch 2 vs Ch 3.

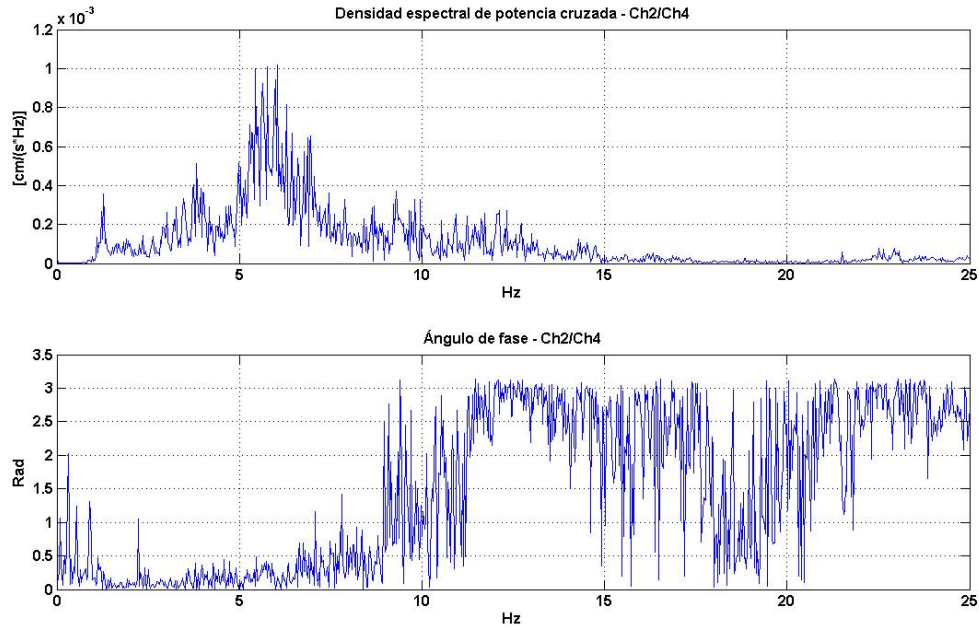


Figura 5.2. 139.- Densidad espectral cruzada Ch 2 vs Ch 4.

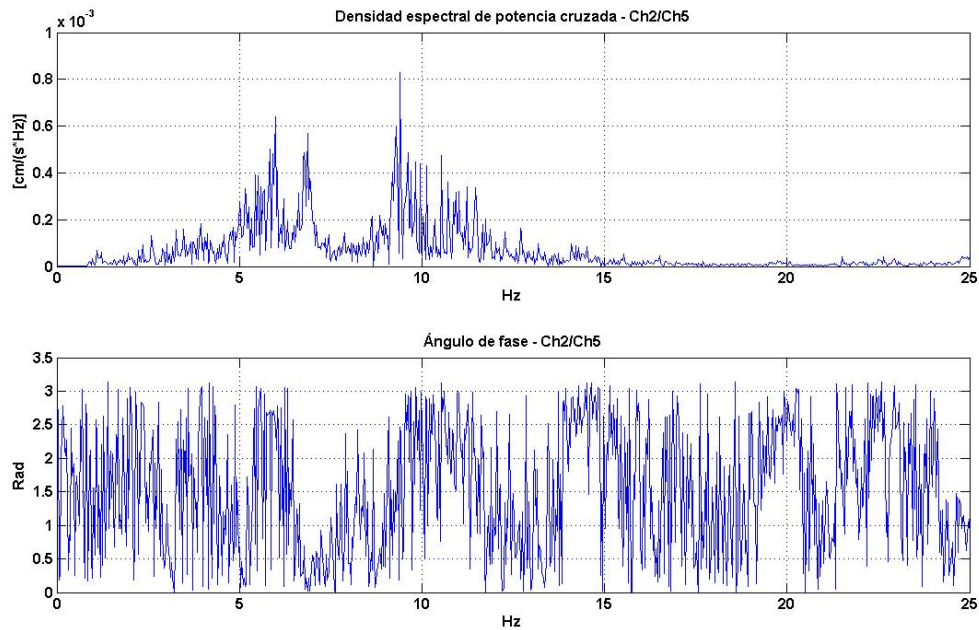


Figura 5.2. 140.- Densidad espectral cruzada Ch 2 vs Ch 5.

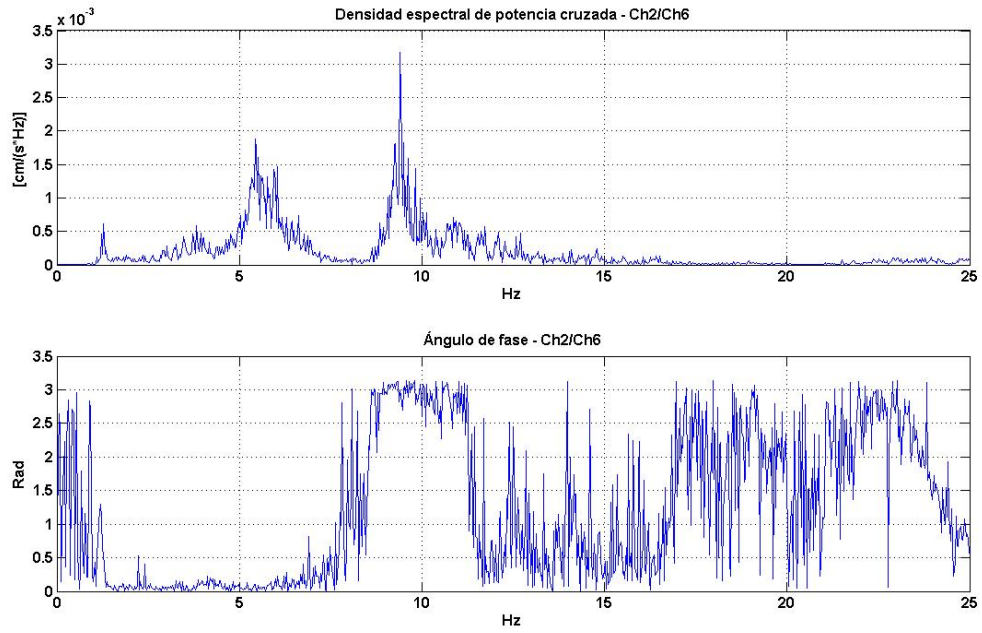


Figura 5.2. 141.- Densidad espectral cruzada Ch 2 vs Ch 6.

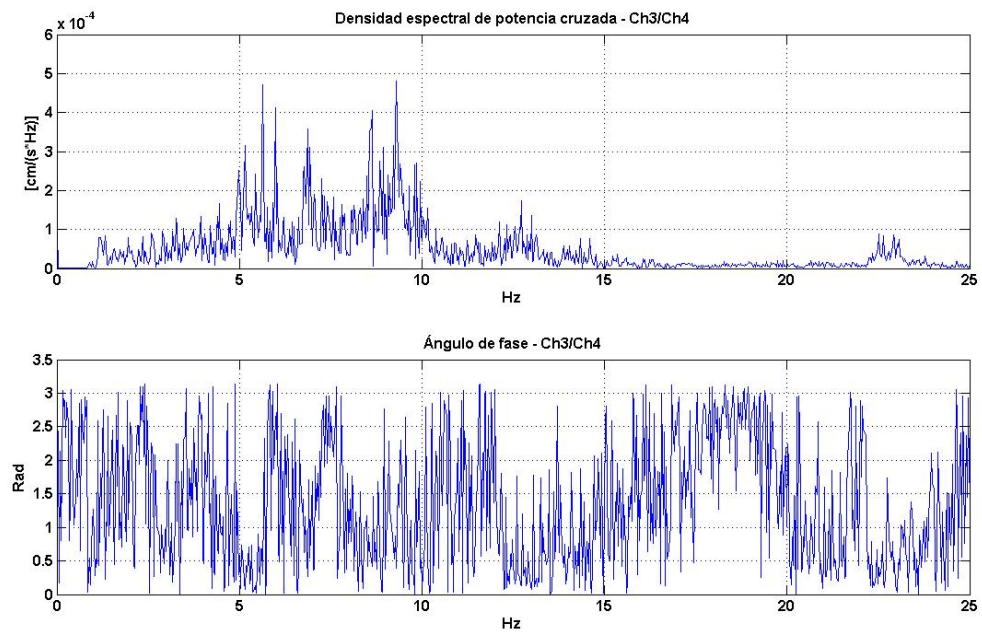


Figura 5.2. 142.- Densidad espectral cruzada Ch 3 vs Ch 4.

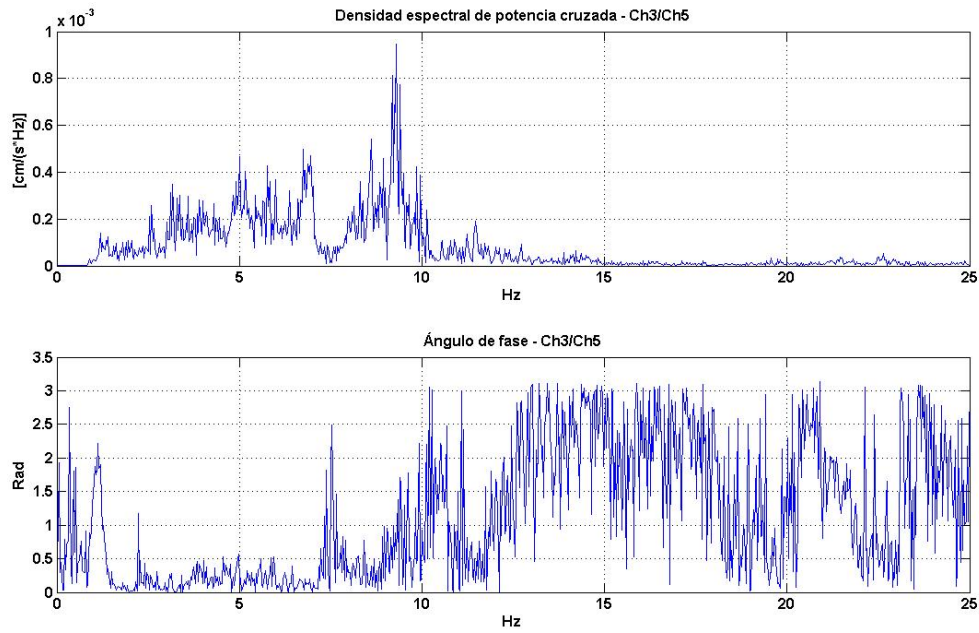


Figura 5.2. 143.- Densidad espectral cruzada Ch 3 vs Ch 5.

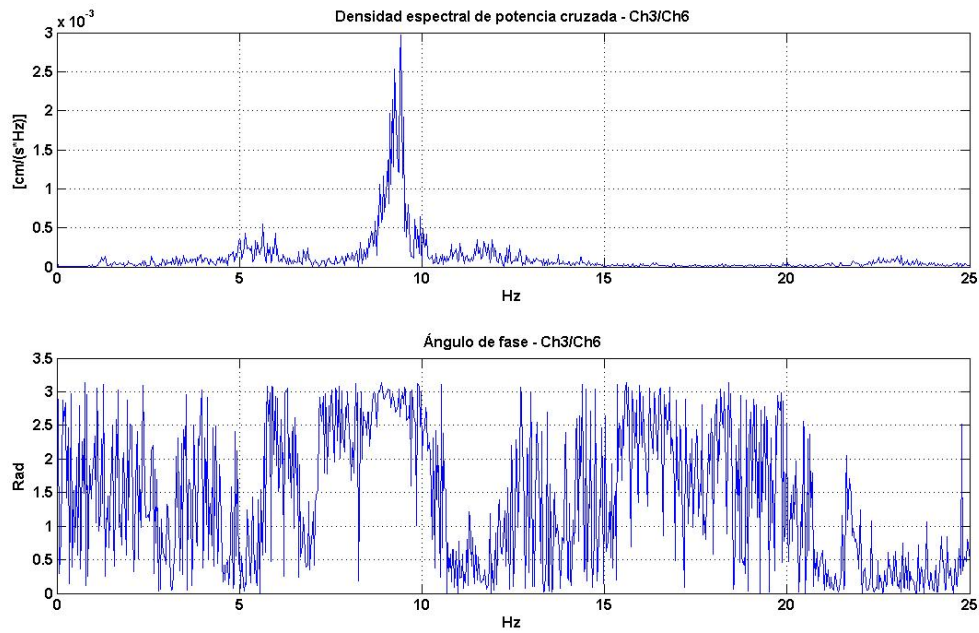


Figura 5.2. 144.- Densidad espectral cruzada Ch 3 vs Ch 6.

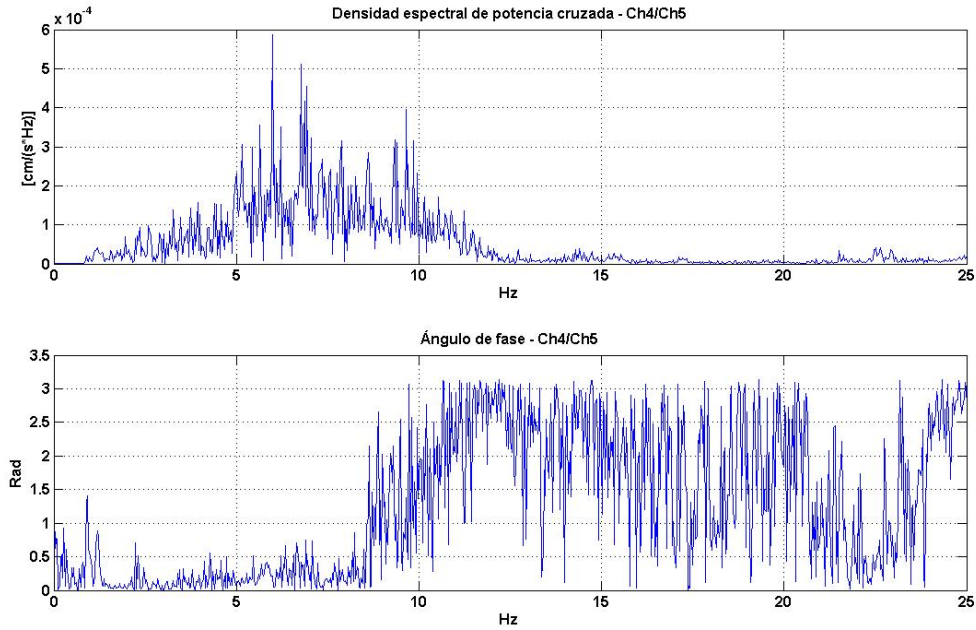


Figura 5.2. 145.- Densidad espectral cruzada Ch 4 vs Ch 5.

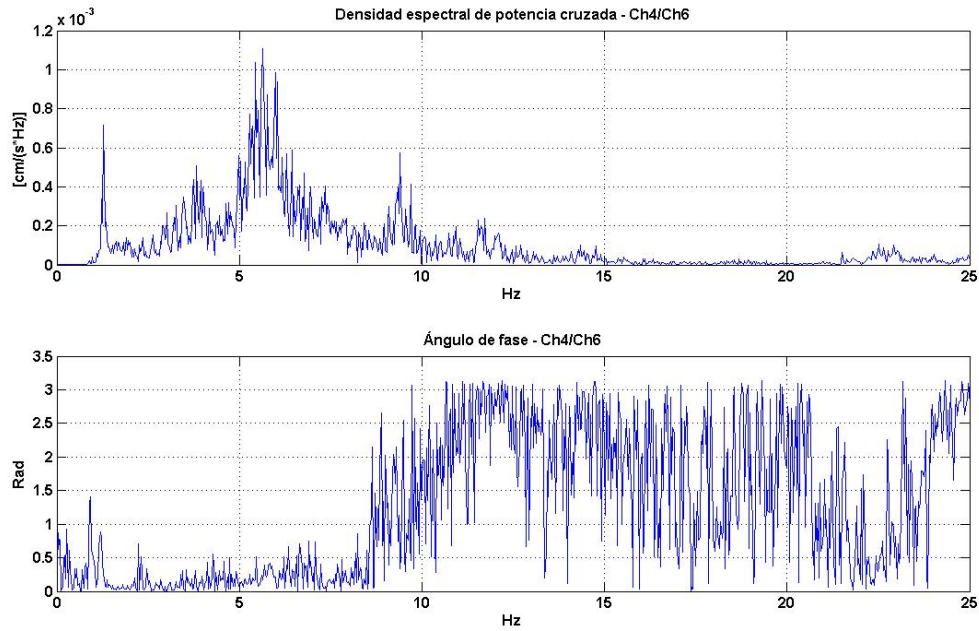


Figura 5.2. 146.- Densidad espectral cruzada Ch 4 vs Ch 6.

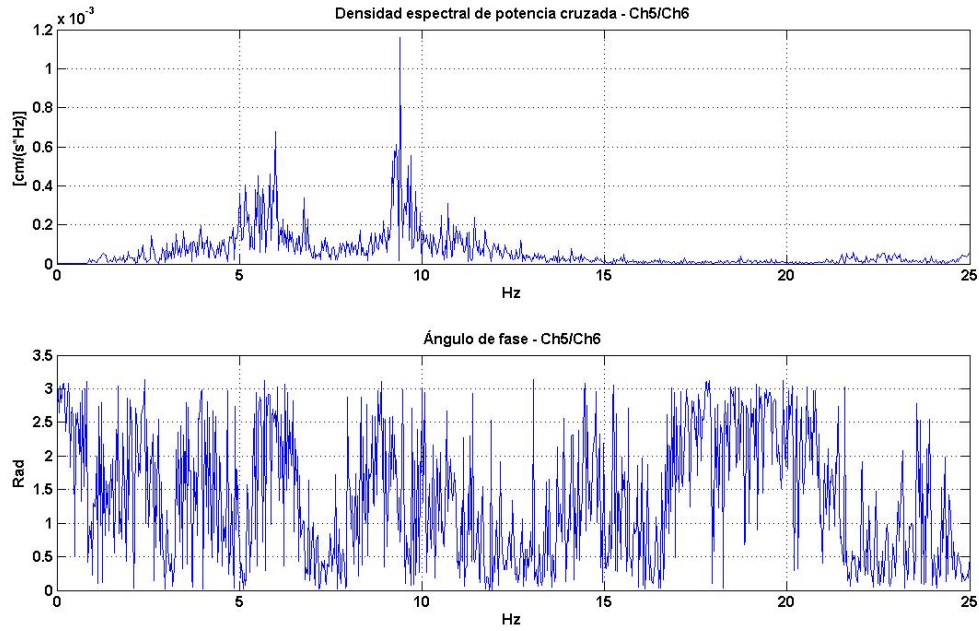


Figura 5.2. 147.- Densidad espectral cruzada Ch 5 vs Ch 6.

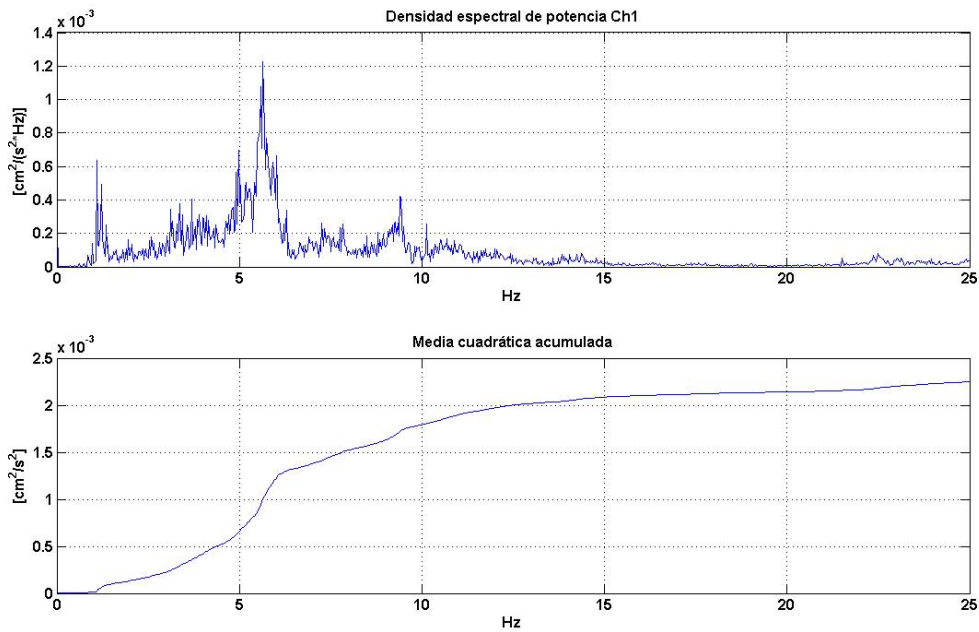


Figura 5.2. 148.- Amplitud por frecuencia Ch 1.

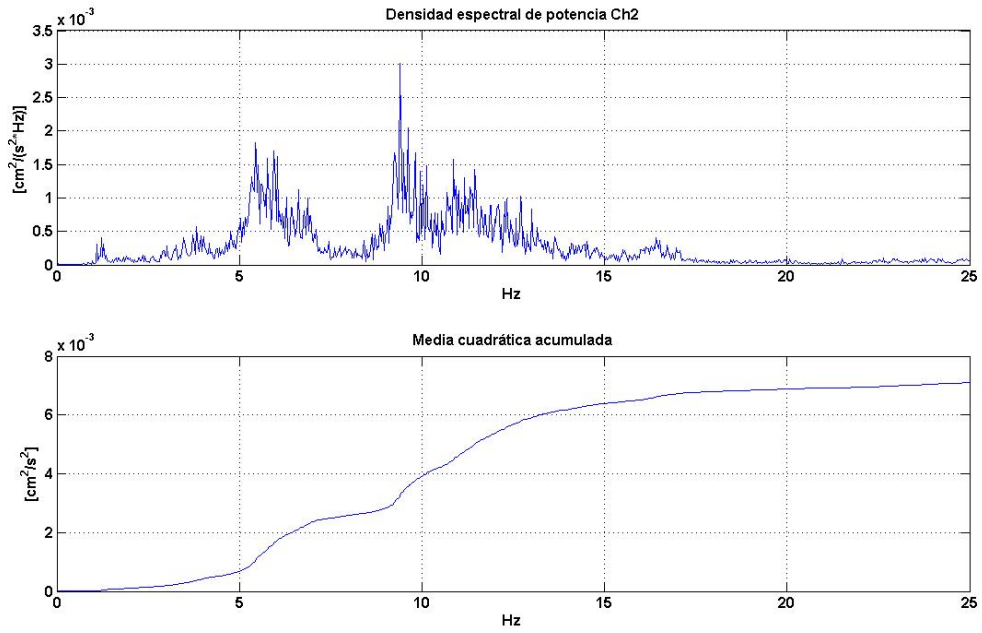


Figura 5.2. 149.- Amplitud por frecuencia Ch 2.

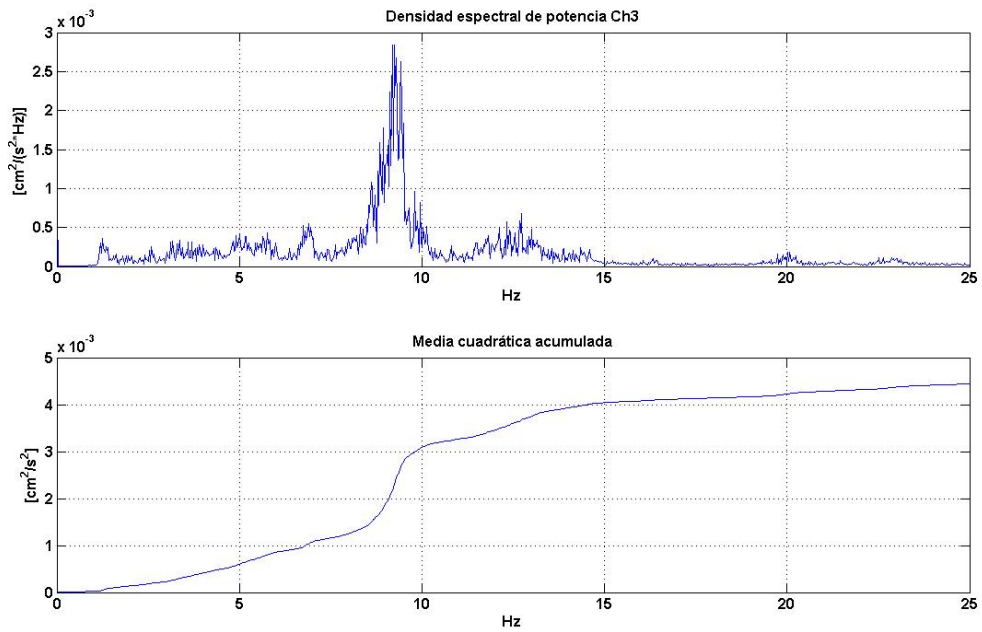


Figura 5.2. 150.- Amplitud por frecuencia Ch 3.

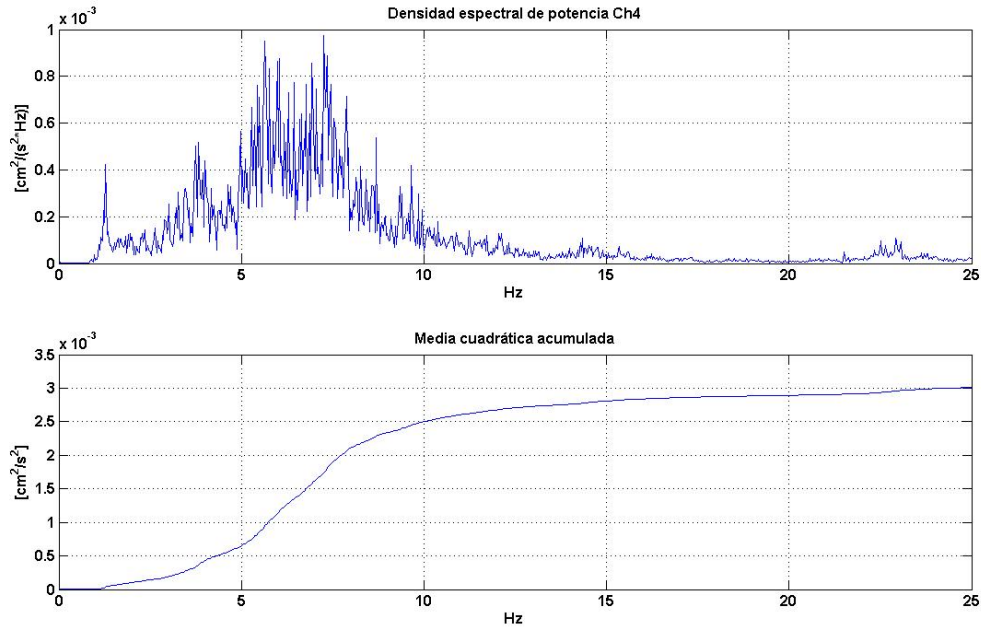


Figura 5.2. 151.- Amplitud por frecuencia Ch 4.

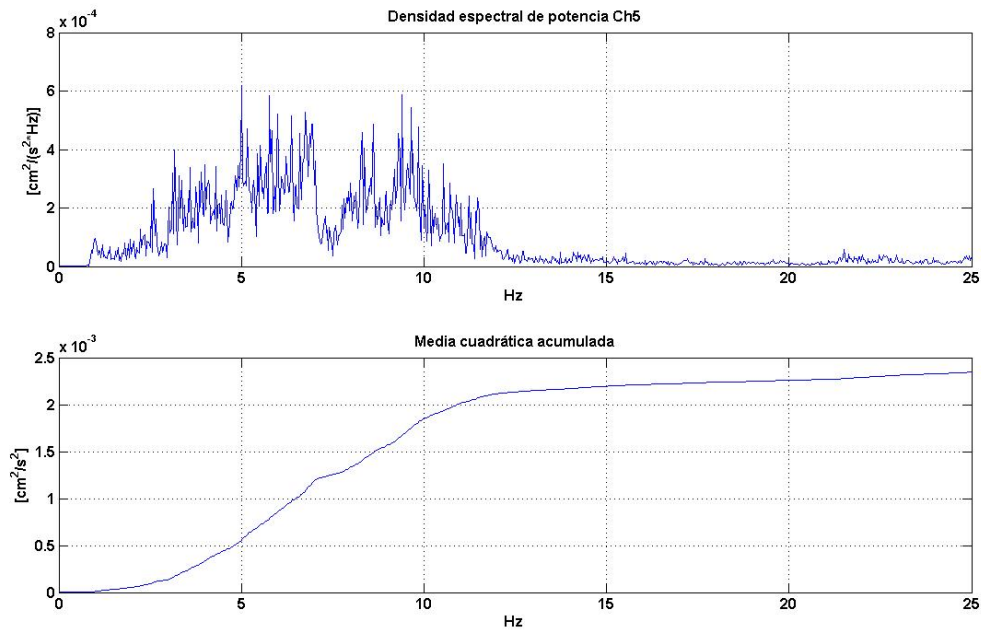


Figura 5.2. 152.- Amplitud por frecuencia Ch 5.

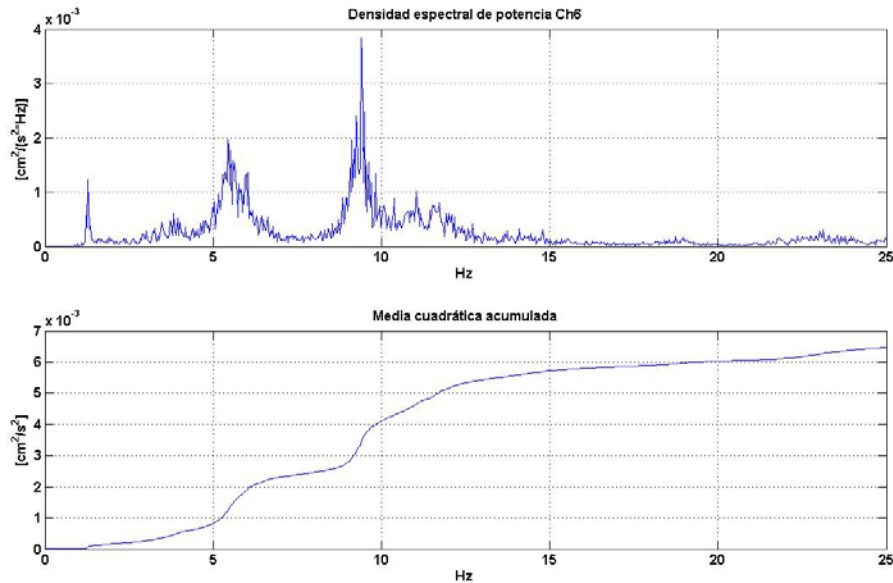


Figura 5.2. 153.- Amplitud por frecuencia Ch 6.

c) Análisis de Resultados

Se presentan los resultados del procesamiento y el análisis realizado sobre los mismos. Las siguientes tablas contienen el resumen de las frecuencias detectadas, los modos de vibración hallados y la correlación existente, representada mediante el ángulo de fase.

c.1) Edificio Este

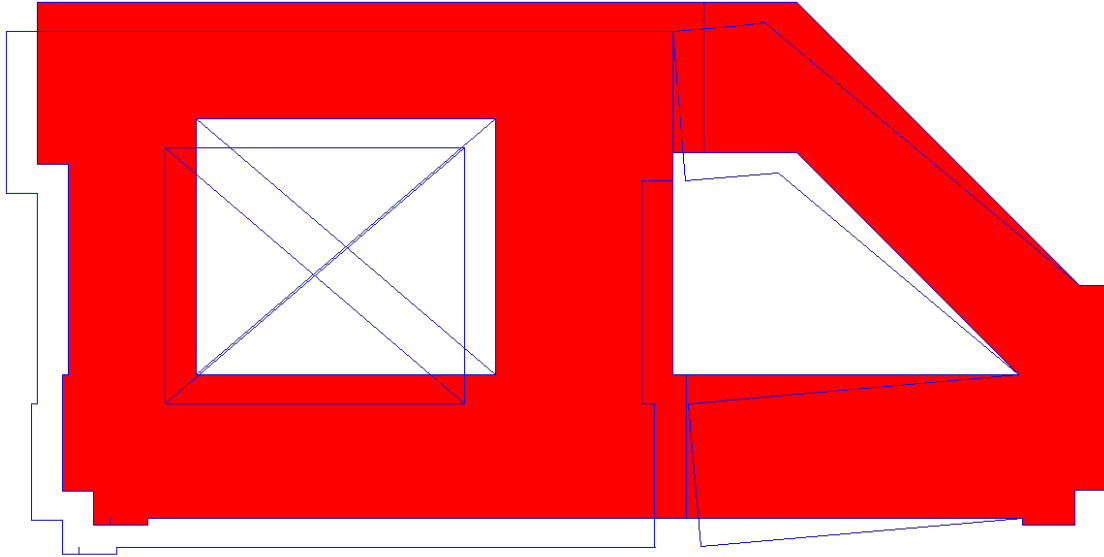
Tabla 5.2. 21.- Amplitud de velocidad de registros.

Amplitud de Movimiento			
	Sensor/Registro	Frecuencias detectadas	
		5,40	9,50
MEDIAS CUADRÁTICAS ESPECTRALES	Ch1	0.0005	0.00015
	Ch2	0.0004	0.00023
	Ch3	0.0003	0.00000
	Ch4	0.0000	0.00022
	Ch5	0.00055	0.00012
	Ch6	0.0004	0.00013
MÁXIMOS NORMALIZADOS	Ch1	0.90909	0.65217
	Ch2	0.72727	1
	Ch3	0.54545	0
	Ch4	0	0.95652
	Ch5	1	0.52174
	Ch6	0.72727	0.56522

Tabla 5.2. 22.- Análisis de correlación cruzada.

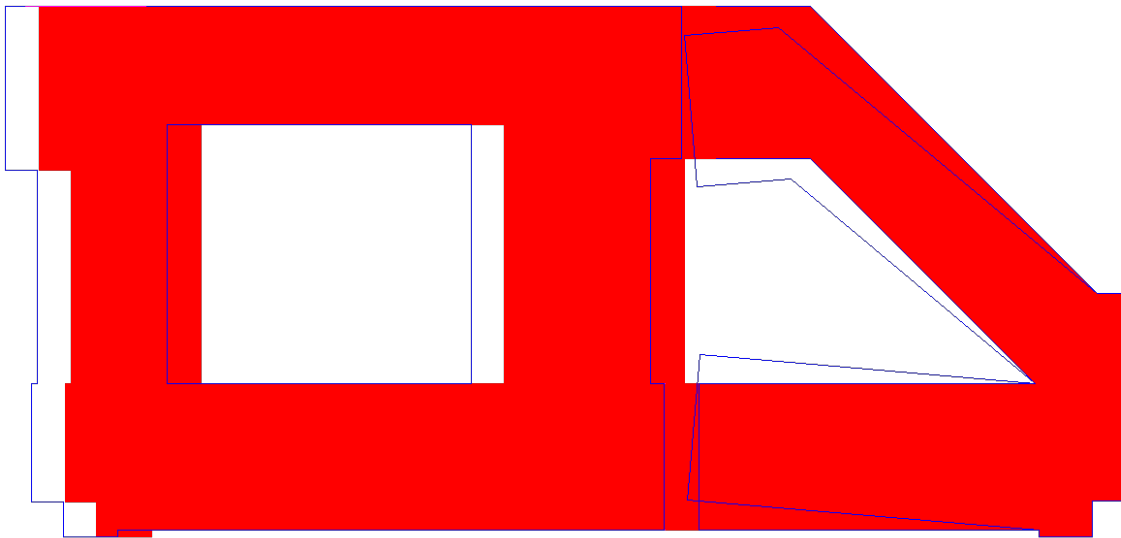
Análisis de correlación cruzada de registros				
Arreglo	Sensor/Registro	Sensor/Registro	Frecuencias detectadas	
			5,40	9,50
2	Ch1	Ch2	+	+
	Ch1	Ch3	+	
	Ch1	Ch4		+
	Ch1	Ch5	+	-
	Ch1	Ch6	+	
	Ch2	Ch3	+	-
	Ch2	Ch4	+	+
	Ch2	Ch5	+	-
	Ch2	Ch6	+	-
	Ch3	Ch4		
	Ch3	Ch5	+	
	Ch3	Ch6	+	
	Ch4	Ch5		-
	Ch4	Ch6		-
	Ch5	Ch6	+	+

**Modo de vibración
Frecuencia = 5,40 hz.**



a)

**Modo de vibración
Frecuencia = 9,50 hz.**



b)

Figura 5.2. 154.- Modos de vibración U.E.N. Experimental Venezuela (Arreglo 2).

c.2) Edificio Oeste

Tabla 5.2. 23.- Amplitud de velocidad de registros.

Amplitud de Movimiento		
	Sensor/Registro	Frecuencias detectadas
		9,40
MEDIAS CUADRÁTICA S ESPECTRALES	Ch1	0,00006
	Ch2	0,0003
	Ch3	0,00035
	Ch4	0,000045
	Ch5	0,00006
	Ch6	0,0004
MÁXIMOS NORMALIZAD OS	Ch1	0,15
	Ch2	0,75
	Ch3	0,875
	Ch4	0,1125
	Ch5	0,15
	Ch6	1

Tabla 5.2. 24.- Análisis de correlación cruzada.

Análisis de correlación cruzada de registros			
Arreglo	Sensor/Registro	Sensor/Registro	Frecuencias detectadas
			9,40
1	Ch1	Ch2	+
	Ch1	Ch3	+
	Ch1	Ch4	
	Ch1	Ch5	
	Ch1	Ch6	-
	Ch2	Ch3	+
	Ch2	Ch4	
	Ch2	Ch5	
	Ch2	Ch6	-
	Ch3	Ch4	
	Ch3	Ch5	
	Ch3	Ch6	-
	Ch4	Ch5	
	Ch4	Ch6	
	Ch5	Ch6	



Figura 5.2. 155.- Modo de vibración U.E.N. Experimental Venezuela (Arreglo 1).

d) *Conclusiones*

Después de tratamiento realizado sobre los registros obtenidos para la Unidad Educativa Nacional Experimental Venezuela, se cuenta con los siguientes resultados:

- Para el primer arreglo, realizado sobre el edificio Oeste, se halló un solo modo de vibración {9,40} hz cuya correlación sugiere la forma modal presentada en la figura 5.2.155, la cual es representativa de deformaciones propias de un diafragma flexible. Para el segundo arreglo, realizado en los edificios Este y Oeste, se hallaron dos modos de vibración {5,40; 9,50} hz, el primero de estos (5,40 hz) es traslacional, con componentes en dos direcciones ortogonales y su figura es la mostrada en la figura 5.2.154a, el segundo modo (9,50 hz) posee una forma modal que sugiere una deformada característica de un diafragma flexible (figura 5.2.154b). Esta información, sustentada en el análisis de los registros, tiene concordancia con aquella presentada en la tabla 5.2.24. La tolerancia de cálculo es del orden de +/- 0,0152 hz.
- El amortiguamiento calculado para el modo de vibración hallado con el primer arreglo, es del orden de 2,66% mientras que, para el segundo arreglo tenemos el siguiente par de valores: 4,17% en el primer modo y 2,11% en el segundo modo. Ninguno de estos valores son adecuados para ser empleados en eventuales análisis estructurales no lineales de la edificación bajo estudio, dado que estos valores son representativos de desplazamientos pequeños, pertenecientes al rango elástico.

- En vista de los resultados experimentales, se constata que los edificios interactúan entre sí, al menos para las amplitudes producidas por el ruido cultural. Esta afirmación puede corroborarse en mayor detalle, mediante la instalación de un solo arreglo con un número mayor de aparatos (en este estudio se contó con seis aparatos por arreglo) o bien mediante la instalación de dos (o más) arreglos debidamente sincronizados entre sí.

5.3.- Referencias

- NANOMETRICS SEISMOLOGICAL INC. Orion Manual. Canada. 1999.
- CHOPRA A.K. Dynamics of Structures. Prentice Hall, New Jersey. USA. 2001.
- CUNHA, A.; CAETANO, E.; MAGALHÃES, F.; MOUTINHO, C. From input-output to output-only modal identification of civil engineering structures. SAMCO Final Report 2006.
- COVENIN, Comisión Venezolana de Normas Industriales, 2001. Edificaciones sismorresistentes. COVENIN 1756:2001. Caracas.
- CRAIG R.R. Structural Dynamics. John Wiley & Sons, New York. USA. 1981.
- EL-BORGI, S.;SMAOUI, H.; CHERIF, F.; BAHLOUS, S.; GHRAIRI, A. Modal identification and finite element model updating of a reinforced concrete bridge. Emirates Journal of Engineering Research. 2004.
- GURALP SYSTEMS. CMG 40T triaxial broadband seismometer Operator's Guide. Aldermaston. England.
- HERNÁNDEZ, J.; DOMÍNGUEZ, J. Medición de Vibraciones en la Planta de Gas LL-2, Informe técnico preliminar FUNVISIS. Caracas. Venezuela. 2005.
- IOTECH, INC. DaqBook User's Manual. Copyright 2002. Cleveland. USA
- KINEMATRICS, INC. Operating Instructions Ranger SS1 Seismometer. Copyright 2001. Pasadena CA. USA.
- LÓPEZ, O.A.; GENATIOS C.; CASCANTE, G. Determinación de propiedades dinámicas de estructuras mediante técnicas experimentales. Boletín técnico IMME N° 77. Caracas. Venezuela. 1989.
- NEWLAND D. E. Random vibrations and spectral analysis. Longman Group Limited, London 1978. England.
- THE MATHWORKS, Matlab versión 7. Copyright 1984-2004
- WELCH,P. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. IBM Watson Research Center. Yorktown Heights, N.Y. 1967.