

Metodología para Determinar los Modos de Vibración del Modelo Numérico de un CTC dentro de la Señal del Conmutador bajo Operación

E. Rivas^{1,2}, E. Laniado¹

¹Universidad Carlos III de Madrid- España,

²Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Bogota-Colombia

¹elaniado@ing.uc3m.es, ²erivas@udisdistrital.edu.co

Resumen

Se modela el conmutador de un cambiador de tomas en carga CTC en español o OLTC, por sus siglas en inglés "On load Tap Changer". Se ha modelado en tres dimensiones por medio de un software comercial llamado Solid-Work™ para calcular las frecuencias de resonancia de sus modos propios de vibración por cada eje de coordenada. El cálculo de estos modos se realizó bajo el método de los elementos finitos (MEF) con 6 grados de libertad en cada nodo (gdl), en un software comercial de código Algor™. Se analizaron datos de desplazamiento en señales de vibración, adquiridos experimentalmente de un CTC en funcionamiento, estas señales de vibración fueron tomadas con un acelerómetro Mono-Axial, en el momento de realizar un cambio de toma. Las señales experimentales son analizadas en frecuencia con aplicación de la transformada Wavelet y la transformada rápida de Fourier. Las señales experimentales analizadas se comparan con las frecuencias de los modos para conocer la implicación en la señal de vibración.

Palabras clave: CTC, selector, conmutador, cambio de toma, modos de vibración, frecuencias, MEF.

ABSTRACT

It is modeled a tap-changer in CTC in Spanish or OLTC, load by English switch "On load Tap Changer". Modeled in three dimensions in commercial software called Solid - Work™ to calculate their own vibration modes resonance frequencies for each coordinate axis. The calculation of these modes was conducted under the finite elements (MEF) with 6 degrees of freedom on each node (gdl) method in a commercial software code Algor™. Experimentally acquired a CTC running displacement vibration signals data were analyzed, these vibration signals were taken with an accelerometer Mono-Axial, at the time of making a change of decision-making. Experimental signals are analyzed in frequency with implementation of the transformed Wavelet and the fast Fourier transform. Analyzed experimental signals are compared with modes frequencies for involvement in the signal of vibration.

Key words: OLTC, selector, conmutador, change of tap, manners of vibration, frequencies.

1. Introducción

Un cambiador de tomas en carga (CTC en español o OLTC en inglés "On Load Tap Changer") es la única parte con movimiento en un transformador [1]. Su función es realizar la operación de cambio de una toma a otra del devanado de regulación, en respuesta a un cambio de tensión en la red debido a variaciones de la carga. La misión del CTC es mantener constante la tensión de salida del transformador modificando el número de espiras en uno de los devanados sin la interrupción de la corriente de la carga.

El CTC está sometido a unos esfuerzos mecánicos y eventos eléctricos importantes. Por ello, el CTC es uno de los elementos del transformador con un mayor índice de fallos. De acuerdo a una encuesta internacional, se analiza que el 40% de los fallos del transformador se producen en el CTC [2]. El estado de algunos de los elementos del cambiador (resistencias de conmutación, contactos, etc.) puede ser evaluado mediante inspecciones periódicas. Sin embargo, estas inspecciones requieren tener el transformador en descargo, es decir fuera de servicio, un tiempo relativamente

prolongado; esto supone un gasto considerable y requiere de un equipo de técnicos y operarios calificados. Además, algunas de las partes de un CTC (contactos del selector, preselector, etc.) no pueden ser inspeccionadas debido a su localización dentro de la cuba del transformador.

El modelado del conmutador del CTC se realizó guardando las dimensiones reales en el software Solid-Work™ y el cálculo por simulación se ejecutó con el software comercial de análisis bajo el método de los elementos finitos Algor™. Las frecuencias de los modos propios se compararon con las frecuencias de vibración obtenidas a partir de señales de vibraciones reales de un CTC en buen estado, las cuales se han pre-procesado aplicándole transformada de Hilbert [3] para hallar la envolvente de la señal de vibración, con el fin de aminorar las fluctuaciones de la señal. Posteriormente, se aplicó transformada de Wavelet discreta [4], con el fin de determinar identificadores de diagnóstico como son el número de impulsos de vibración, la amplitud, el tiempo entre impulsos y los rangos de frecuencia en que se encuentran esos impulsos. Se corroboró el rango de frecuencias aplicando transformada rápida de Fourier a la señal de vibración [5].

Existen pocos trabajos que investigan los niveles de aportación de los modos de una maquinaria compleja a las señales de vibración experimental. Gao [6] genera modelos analíticos para calcular los modos de vibración con un rango pequeño de incertidumbre con sistemas mecánicos de pocos grados de libertad o de poca complejidad. Moore [7] utiliza un algoritmo de valoración con parámetros de la señal en el dominio del tiempo, señalándolos como indicadores de las magnitudes modales en frecuencia, provocados por la excitación del funcionamiento del sistema, identificando las fuente de vibración generadas a causa de ruidos, o excitaciones periódicas de agentes externos.

En este trabajo, se identifican las frecuencias de los modos de vibración dentro del análisis de la señal de vibración adquirida por medios experimentales, como frecuencias propias del sistema.

2. Estructura general de un CTC

La estructura básica de un CTC (Fig.1) consta de los siguientes elementos [8]

1. Armario de accionamiento y mando
2. Mecanismo de transmisión
3. Selector de tomas (Selector Switch)
4. Cabeza del regulador
5. Conmutador o ruptor (Diverter Switch)

1. Armario de accionamiento y mando: Está situado en uno de los laterales exteriores del transformador, contiene los elementos de mando y maniobra del CTC (contactores de arranque del motor, pulsadores de mando, motor eléctrico, etc.).

2. Mecanismo de transmisión: Para realizar cambios de una toma a otra, el CTC es movido por un mecanismo de accionamiento motorizado, a través de los ejes de transmisión vertical y horizontal y cajas de reenvío en ángulo, al cual se le denomina mecanismo de transmisión. Un funcionamiento anómalo de cualquiera de los elementos de la transmisión puede provocar una desregulación, es decir una situación en la que la posición real del CTC no corresponde con la posición indicada en el armario de mando.

3. Selector de tomas: selecciona la próxima toma. Puede contener un preselector o inversor el cual conecta el devanado principal con el devanado de regulación de forma aditiva o de forma sustractiva, permitiendo con ello duplicar las n posiciones.

4. Cabeza del CTC: En su interior se encuentra los mecanismos acumuladores de energía y el accionamiento del selector.

5. Conmutador o ruptor: Realiza la conmutación, es decir pasa de una toma a otra sin interrumpir el servicio, para ello utiliza unas resistencias transitorias que limitan la corriente cuando éste opera cortocircuitando dos tomas temporalmente durante el cambio. El conmutador está inmerso en un depósito de aceite el cual es independiente de la cuba del transformador.



Fig. 1: Estructura básica de un CTC

2.1. Señales de Vibración de un CTC

La señal de vibración del CTC (Fig. 2) al realizar un cambio de toma han sido registradas mediante un acelerómetro colocado en la cabeza del conmutador, calculando las vibraciones verticales (eje y).

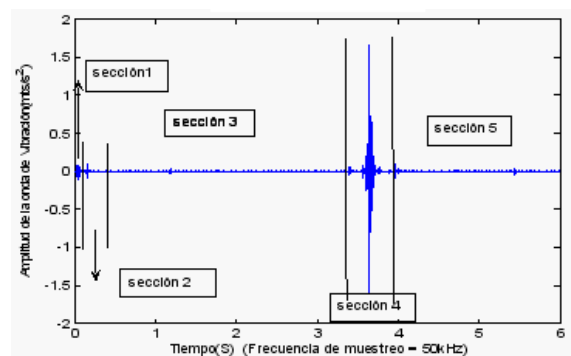


Fig. 2: Señal de vibración en un cambio de toma

1. Arranque del motor de accionamiento.
2. Operación de los contactos auxiliares del armario de control
3. Cambio de tomas (conecta la posición de operación seleccionada)
4. Proceso de conmutación
5. Parada del accionamiento a motor

3. Tratamiento de la señal de Vibración

La fig. 3 muestra el tratamiento realizado a la señal de vibración del CTC con el propósito de obtener indicadores adecuados para la evaluación del estado del mismo.

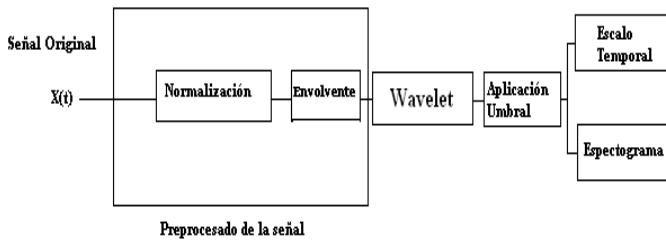


Fig. 3: Tratamiento de la señal de vibración

3.1. Normalización:

Cuando se repite un cambio de toma entre dos tomas correlativas, el registro de vibración obtenido no es idéntico presentándose grandes diferencias entre amplitudes y tiempos entre impulsos de vibración. Por esta razón es necesario normalizar las señales usando el valor RMS para propósitos de comparación [9].

$$x = \frac{x_0}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [x_0 [i]]^2}} \quad (1)$$

Donde x es la señal normalizada, x₀ es la señal original y N es el número total de muestras de x₀.

3.2. Envolvente:

Una vez que la señal ha sido previamente normalizada, se obtiene la envolvente aplicando transformada de Hilbert [3]. La envolvente es usada como pre-procesamiento de la descomposición Wavelet.

La señal analítica correspondiente a la señal real x(t) es definida como x(t) + jx̄(t), donde la parte real de la señal analítica es la señal original y la parte imaginaria x̄(t) es la transformada de Hilbert de x(t). La magnitud de esta señal analítica compleja u(t) forma la señal envolvente, la cual es siempre una función positiva definida como

$$u(t) = \sqrt{x(t) + j\bar{x}(t)} \quad (2)$$

3.3. Transformada Wavelet

La transformada de Wavelet (WT) es una función matemática, generada a partir de la traslación y el cambio de escala de funciones bases de energía finita, denominadas Wavelet madre [7].

El factor de traslación se encarga de asignar la información contenida en la Wavelet en un instante de tiempo específico, mientras el factor de escala puede comprimir o dilatar la Wavelet, como se muestra en la Fig. 4.

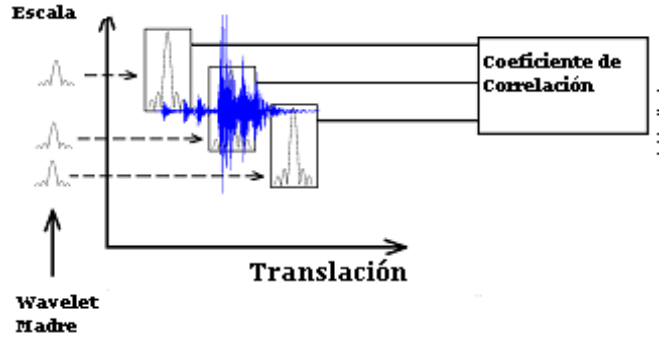


Fig. 4: Proceso de transformada de Wavelet

WT no puede evaluarse de una manera práctica utilizando ecuaciones analíticas, integrales, etc. Por lo tanto, es necesario discretizar WT, y realizar un análisis multi-resolución, el cual consiste en la aplicación de filtros recursivos para calcular la descomposición wavelet.

Transformada discreta de Wavelet (DWT) se utiliza para descomponer una señal, a través de dos tipos de filtros (paso bajo y paso alto). El número de veces que la señal es filtrada es determinado por el nivel de descomposición aplicado. De cada nivel de descomposición se obtienen los coeficientes de aproximación y de detalle de la señal.

La transformada discreta de Wavelet de una señal f(t) es dada por:

$$C[j, k] = \sum_{n \in Z} f[n] \psi_{j,k}[n] \quad (j, k) \in Z^2$$

j es el nivel de descomposición and k es el factor de traslación. (j, k) es la Wavelet madre definida como:

$$\psi_{j,k}[n] = 2^{-\frac{j}{2}} \psi[2^{-j}n - k], \quad (j, k) \in Z^2$$

La DWT analiza la señal en diferentes bandas de frecuencia, con diferentes resoluciones, separando la señal en coeficientes de aproximación a_j[n] y coeficientes de detalle d_j[n]. Los primeros dan una idea general de la señal y los segundos contienen las singularidades de la señal. La DWT está dada por:

$$DWTf(t) = \sum_{-\infty}^j d_j[n] + \sum_{n \in Z} a_j[n] \psi_{j_n} \quad j \in Z \quad (5)$$

a_j[n] : Coeficientes de Aproximación

d_j[n] : Coeficientes de Detalle

ψ_{j_n} : Función de escala

Este proceso de descomposición de señales (d_j) se aplica a la señal realizando 5 niveles de descomposición para obtener una mayor precisión, aunque con 3 niveles ya es un grado de descomposición suficiente para esta señal. (Fig. 5).

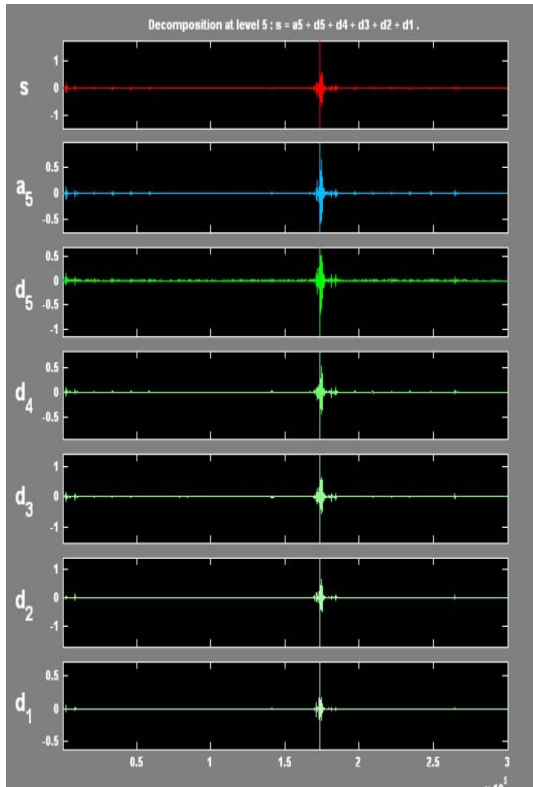


Fig. 5: Descomposición de la señal

La descomposición de esta señal (s) viene dada por:

$$s = a_5 + d_5 + d_4 + d_3 + d_2 + d_1 \tag{6}$$

Donde:

- ai = Nivel de aproximación del nivel i
- di = Nivel de detalle del nivel i

Aplicando la transformada inversa DWT y suavizando la señal mediante spline se obtienen la amplitud, la ubicación temporal y la banda de frecuencia a donde se encuentran ubicados los impulsos de la señal de vibración (Fig. 6)

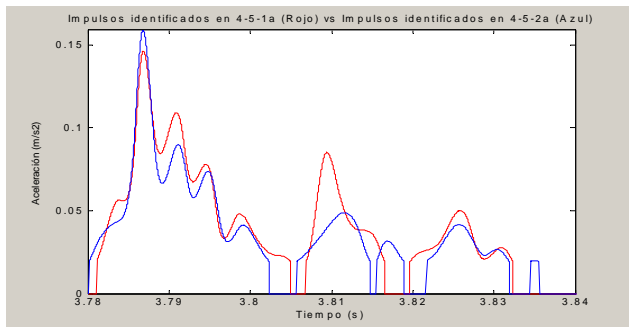


Fig. 6: Impulsos de la señal de vibración

Tabla 1: Ubicación y amplitud de los impulsos de la señal

IMPULSOS DETECTADOS SEÑAL (Roja)		
	Ubicación (s)	Amplitud (m/s ²)
Impulso 1	3,78684	0,1463021
Impulso 2	3,80944	0,085213
Impulso 3	3,8259	0,0500932
IMPULSOS DETECTADOS SEÑAL (Azul)		
	Ubicación (s)	Amplitud (m/s ²)
Impulso 1	3,78684	0,1581312
Impulso 2	3,81164	0,0542687
Impulso 3	3,82576	0,0471563

Para los tres impulsos detectados se obtienen sus respectivas frecuencias (Tabla 2) los cuales se encuentran ubicados en el rango de 0 - 6250 Hz, que corresponde al tercer nivel de descomposición de la señal de vibración.

Tabla 2: Frecuencias de la señal de vibración

IMPULSO	F1	F2	F3
1	552.427 Hz	3716.27 Hz	4419.417 Hz
2	602.426 Hz	3716.27 Hz	4052.62 Hz
3	444.839 Hz	3558 Hz	4052.62 Hz

La Tabla 3 ilustra los rangos de frecuencias al aplicar este procedimiento a un conjunto de 72 señales.

Tabla 3: Frecuencias del conmutador mediante DWT

Frecuencias del conmutador mediante DWT				
	0-1500 Hz	1500-3000 HZ	3000-4500 Hz	4500-7000 Hz
amplitud	391	1563	3125	5257
	445	1858	3558	6250
	552	2210	3716	
	602	2628	4052	
	781		4419	
	929			
	1105			
	1314			

Para corroborar los resultados frecuenciales se aplicó Transformada Rápida de Fourier (FFT) obteniendo los resultados que se muestran en la Fig. 7 y Tabla 4.

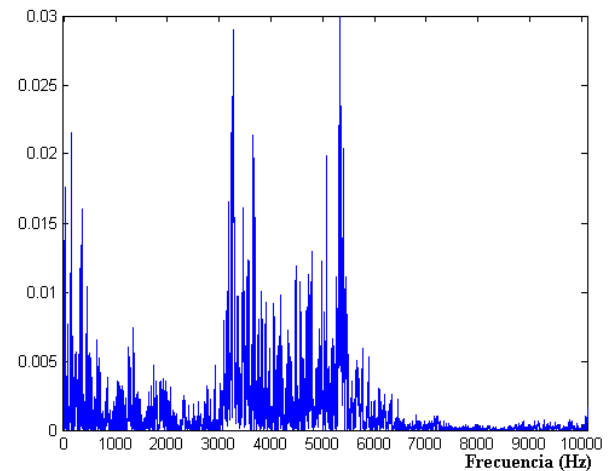


Fig. 7: FFT de un cambio de toma.

Tabla 4: Frecuencias del conmutador mediante FFT

Frecuencias del conmutador mediante FFT					
Intervalos					
	0-500	3.100-3.700	4.400-4.800	4.900-5.100	5.200-5.500
amplitud	0,2	3.179,3	4.480,8	4.978,6	5.255,6
	24,3	3.240,8	4.561,5	5.073,0	5.300,8
	136,1	3.267,3	4.735,2		5.308,4
	144,5	3.283,3	4.781,3		5.317,2
	149,5	3.455,0	4.788,9		5.337,2
	298,8	3.472,0			5.372,0
	323,0	3.535,5			5.394,5
	335,3	3.568,3			5.402,0
	347,2	3.653,1			5.410,3
	442,7	3.683,3			5.455,5

Dado que DWT es capaz de determinar el rango de frecuencias en el que se encuentran los impulsos sin perder resolución temporal, se trabajó con los resultados arrojados por esta.

4. Modelado del conmutador

Se ha modelado el conmutador del CTC en SolidWorks™, para ello se ha dividido en 3 secciones para facilitar su simulación y posterior análisis;- cilindro soporte (Fig. 8), acumulador de energía (Fig. 9) y disco de contactos móviles (Fig. 10). Se ha unificado dentro de la masa total del conmutador las tuercas, tornillos, elementos de apriete para calcular los modos guardando el siguiente criterio para un modelos con un solo grado de libertad.

$$F_n = 1 / (2\pi) * (k/m)^{1/2} \quad (7)$$

Al involucrar todos los pequeños elementos a la masa del sistema, genera que las frecuencias de los modos sean más exactas.



Fig. 7: Cilindro soporte con cabeza de CTC

En la figura 7, se muestra el cilindro soporte de la cabeza del CTC, optimizado y preparado para ser importado al software de cálculo a base del método de los elementos finitos Algor™. Estos modelos tan complejos deben ser optimizados para poder disminuir el número de elementos que conforman la malla para ser calculados, ya que son modelos cuyo estudio es necesario ejecutarlos en 3D, y por tener esa condición se aumenta de forma exponencial el número de elementos.

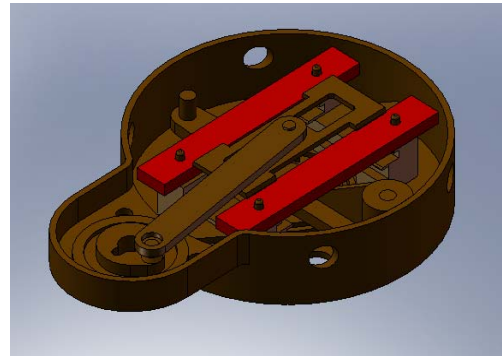


Fig. 8: Acumulador de energía

La figura 8 muestra el acumulador de energía, en que se han restado algunas pequeñas piezas para su optimización, pero sus masas se suman para generar un cálculo de los modos de vibración más confiable.

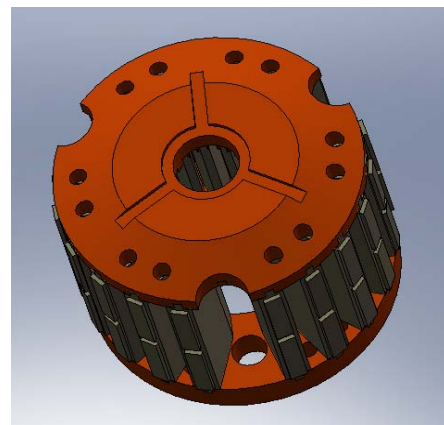


Fig. 9: Disco de contactos móviles

La figura 9 muestra el disco de contacto móviles, es el último elemento modelado en Solid-Work™ para el análisis, optimizado y preparado para ser importado a Algor™

5. Simulación y análisis modal del conmutador

Con el fin de determinar cuál es la mejor condición de contorno para hallar las frecuencias o modos de vibración a las que se encuentra sometido el conmutador, se han realizado dos tipos de simulaciones mediante el programa Algor™:

- a) Sin fijar las bases del conjunto
- b) Fijando las dos bases del cilindro

Se han contrastado los diferentes modos de vibración vs las frecuencias como cuerpo con condiciones de contorno libre (sin condiciones de empotramiento) y fijando las bases (Fig. 10)

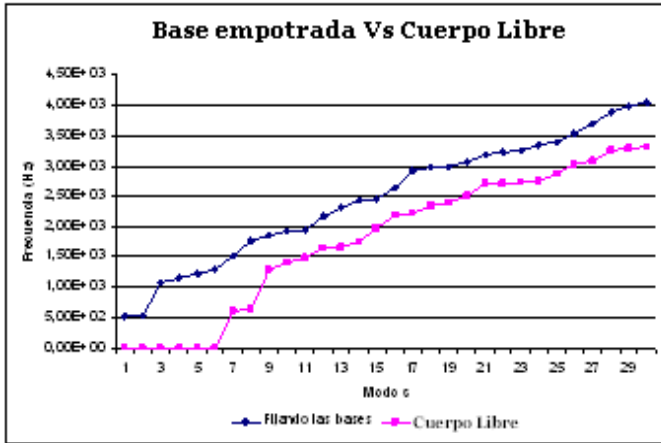


Fig. 10: Frecuencias naturales para las condiciones de contorno

En la figura 10, se muestra la comparación del modelo numérico del conmutador con empotramiento en su base inferior y sin empotrar (cuerpo libre) y se deduce que las frecuencias experimentales son coincidentes con las frecuencias teóricas de los resultados de los distintos modos del modelo de la base empotrada, por lo que la condición de contorno del conmutador es un factor determinante. Por ende, en el proceso de simulación se ha considerado fijas las bases para ser comparadas con las frecuencias del modelo experimental.

Para el cilindro soporte, acumulador de energía y disco de contactos móviles se calcularon 70, 70 y 150 modos de vibración con sus frecuencias respectivamente que abarcan en cada uno de los casos más del 90% de disposición de masa, los resultados obtenidos se presenta a continuación. Para este estudio la masa modal estará definida por la rigidez y geometría del sistema.

5.1. Cilindro soporte

En la tabla 5, correspondiente a la figura 11, se muestran los modos más significativos (con mayor desplazamiento modal en el eje y). Estos modos son los de mayor captación de energía.

Tabla 5: Modos más significativos para el cilindro

Cilindro soporte				
MODO	FRECUENCIA (Hz)	MASA MODAL (%)		
		EJE X	EJE Y	EJE Z
4	1,16E+03	0,92	2,36	1,07
6	1,30E+03	1,64	4,23	1,82
7	1,52E+03	0,02	38	0,02
12	2,17E+03	0,28	33,7	0,22
62	5,79E+03	0,03	2,30	0,04

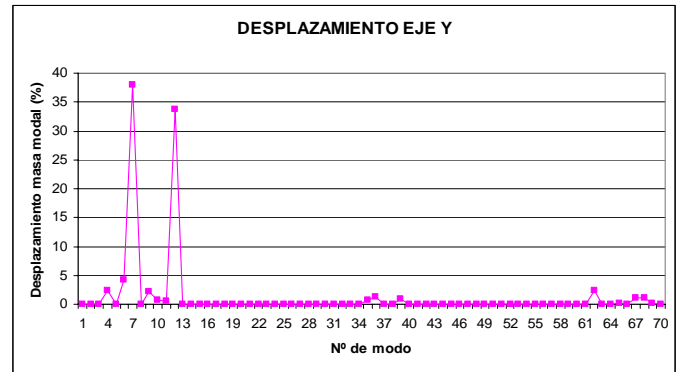


Fig. 11: Porcentaje de masa desplazada en el eje Y

En la Fig. 12 y 13, se muestran los modos 7 y 12, que involucran para el movimiento del modo la mayor proporción de masa y de energía.

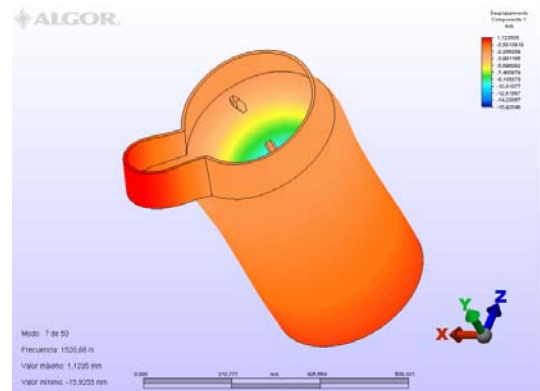


Fig. 12: Desplazamiento de masa modal modo 7

En la figura 12, se muestra el cilindro con un modo de vibración que depende todo el movimiento sobre el eje vertical (Y). Este es uno de los elementos que hace parte del conmutador más importante durante el análisis de la señal experimental, ya que recibe el impacto del cambio del cambio de toma.

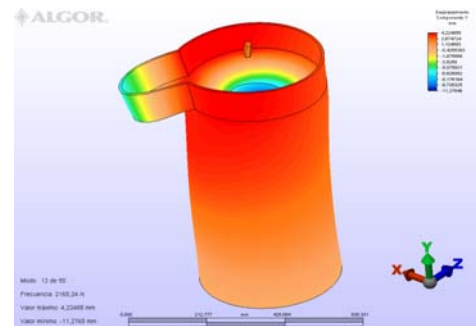


Fig. 13: Desplazamiento de masa modal 12

5.2. Acumulador de energía

El modo con mayor desplazamiento de masa modal es el modo 1 (Tabla 6), los demás modos tienen un desplazamiento casi nulo (Fig.14).

Tabla 6: Modo 1 más significativos para el acumulador

Acumulador de energía				
MODO	FRECUENCIA (Hz)	MASA MODAL (%)		
		EJE X	EJE Y	EJE Z
1	1,10E+03	0.00	5.34	0.04

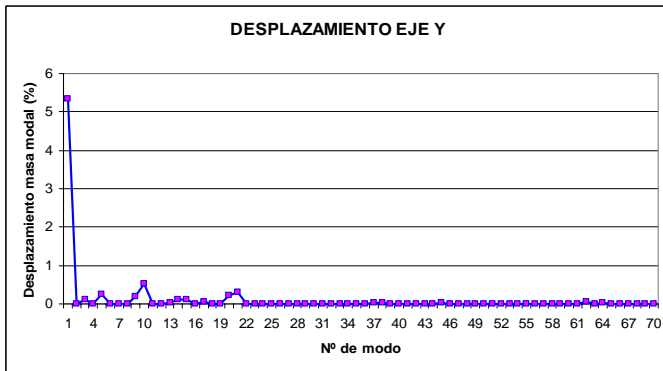


Fig. 14: Porcentaje de masa desplazada en acumulador de energía

El desplazamiento de masa modal del modo 1 se ilustra en la Fig. 15.

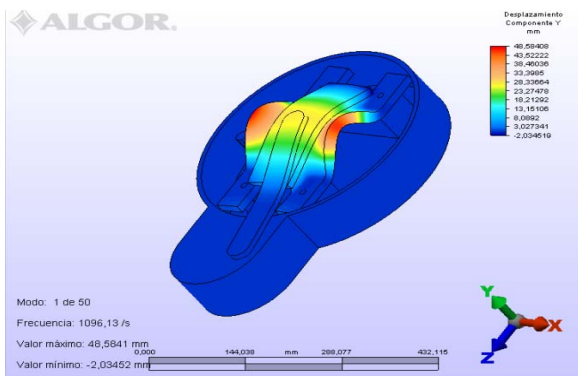


Fig. 15: Desplazamiento de masa modal modo 1 del acumulador de energía

5.3. Disco de contactos móviles

Para este elemento entre los modos 60 y 73 se llega casi al 100% del desplazamiento modal (Fig.16), Tabla 7

Tabla 7: Modos más significativos para el disco de contactos móviles

MODO	FRECUENCIA (Hz)	MASA MODAL (%)		
		EJE X	EJE Y	EJE Z
		60	2,12E+03	0.00
73	2,34E+03	0.00	73.27	

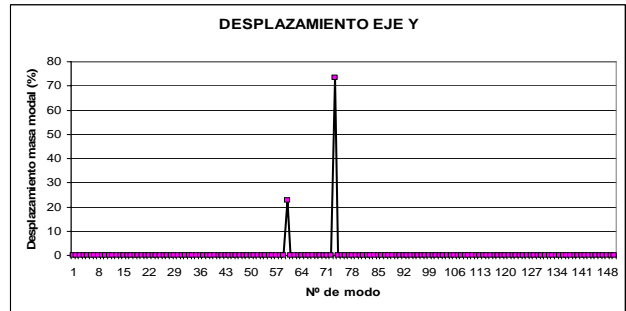


Fig. 16: Porcentaje de masa desplazada en el eje Y

El desplazamiento de masa modal de estos modos se muestra en las Fig. 17 y 18.

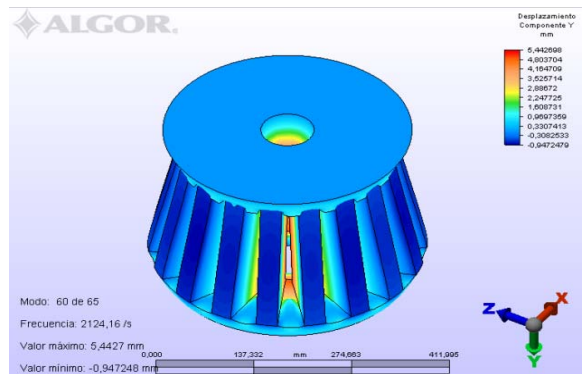


Fig. 17: Desplazamiento de masa modal modo 60

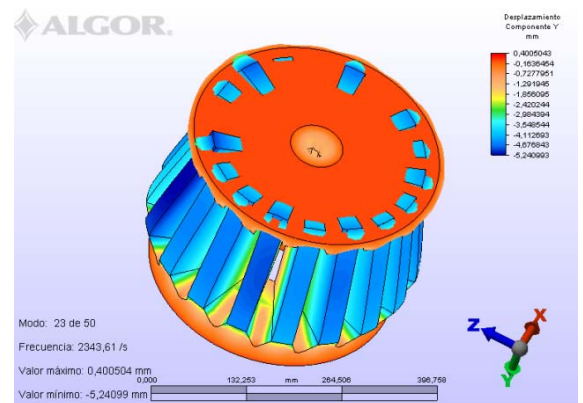


Fig. 18: Desplazamiento de masa modal modo 73

6. Correlación: Frecuencias de Operación – Frecuencias Naturales

Para el cilindro (Fig.19), el acumulador de energía (Fig.20) y disco de contactos móviles (Fig. 21) se han correlacionado las frecuencias naturales más próximas a las frecuencias de operación del CTC. Estas frecuencias naturales no revisten peligro para la el conmutador, dado que tienen un desplazamiento modal nulo o casi nulo.

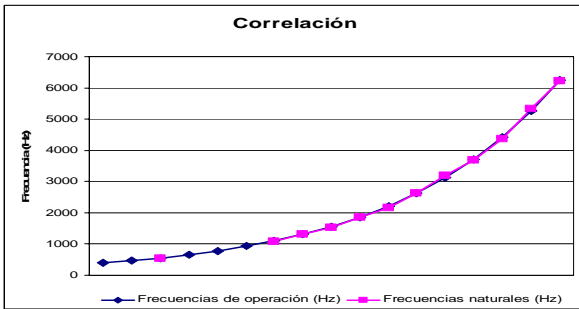


Fig. 19: Correlación de frecuencias del cilindro soporte

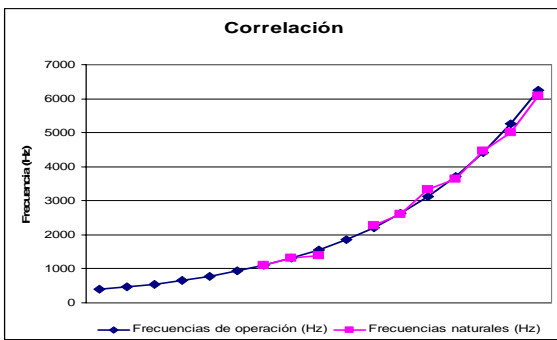


Fig. 20: Correlación de frecuencias del acumulador

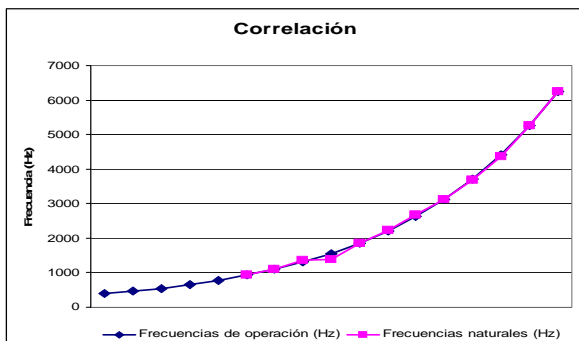


Fig. 21: Correlación de frecuencias del disco de contactos móviles

Para el cilindro (Fig.22, Tabla 8), el acumulador de energía (Fig.23, Tabla 9) y disco de contactos móviles (Fig. 24, Tabla 10) se correlacionaron las frecuencias (frecuencias de operación versus frecuencias naturales), las cuales producen grandes desplazamientos en el conmutador. Si éste opera durante cierto tiempo a esta frecuencia, se puede producir el fenómeno de resonancia, siempre y cuando el desplazamiento

de la vibración esté orientado en la dirección y sentido que de la frecuencia natural calculada.

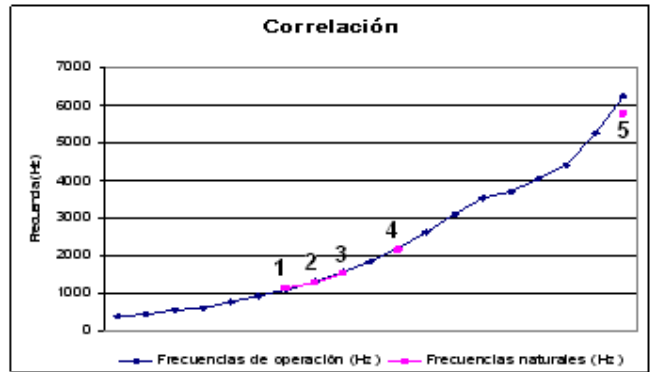


Fig. 21: Correlación de frecuencias del cilindro.

Tabla 8: Correlación de frecuencias cilindro soporte

	Frecuencia Operación(Hz)	Frecuencia Natural(Hz)	Rango Frecuencia (Hz).
1	1104.854	1160	0-1500
2	1313.9	1300	0-1500
3	1562.5	1520	1500-3000
4	2209.708	2170	1500-3000
5	6250	5790	4500-7000

La frecuencia natural que más se aproxima a la de operación es la de 1300 Hz, perteneciente al modo 6 (1300 Hz, 4.23 %).

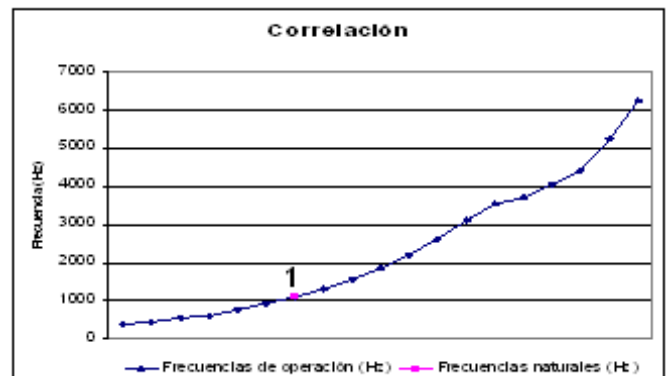


Fig. 23: Correlación de frecuencias acumulador de energía

Tabla 9: Frecuencias coincidentes acumulador de energía

	Frecuencia de Operación(Hz)	Frecuencia Natural(Hz)	Rango Frecuencia(Hz)
1	1104.854	1100	0-1500 Hz

La frecuencia natural de 1100 Hz (Tabla 9) corresponde al modo 1 con un desplazamiento de 5.34%.

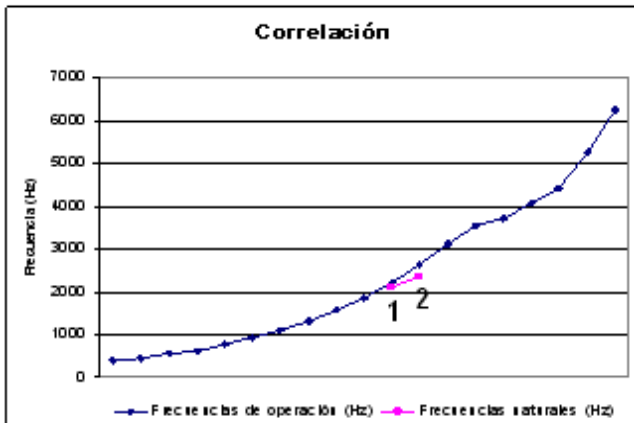


Fig. 24: Correlación de frecuencias disco de contactos móviles

Tabla 10: Frecuencias coincidentes disco contactos móviles

	F. Operación	F. Natural	Tramo
1	1104.854	1160	0-1500 Hz
2	1313.9	1300	0-1500 Hz

Para el disco de contactos móviles, las frecuencias naturales están ligeramente lejos de las frecuencias de operación del conmutador, por lo que en este caso no habría peligro de producirse la resonancia.

7. Conclusiones

- Los modos de frecuencia no se logran obtener de forma exacta en un sistema dinámico, con lo cual los modos propios de vibración del CTC se podrán identificar dentro de un rango de frecuencia en la señal de vibración adquirida experimentalmente. Una vez identificado el intervalo de frecuencias de modos de vibración de la señal, se puede detectar la aparición de un defecto, anomalía o avería cuando al comparar dos firmas de vibraciones, la amplitud asociada a la frecuencia de una de las firmas aumente o cambie de manera abrupta en el intervalo de frecuencias que la contiene.
- En este trabajo se ha realizado una primera aproximación, utilizando los modos naturales de vibración como medidas de frecuencia para un sistema en buen estado, si durante su funcionamiento se detecta un cambio de frecuencia, se interpretará como falla.
- La condición de contorno elegida durante la simulación no es un factor determinante en el análisis, ya que los valores de frecuencias obtenidos para los distintos casos de condiciones de contorno son casi iguales, variando únicamente en el número de modo que contiene esa frecuencia, que varía debido a la distinta fijación de las piezas.

- En los modos de vibración cuyas frecuencias naturales están muy próximas a las de operación, al presentar un desplazamiento en el eje y nulo o casi nulo y por lo tanto no acumularían energía, no causarían ningún peligro en el funcionamiento de cada uno de los componentes del conmutador.

- Para el conmutador los modos con gran desplazamiento modal donde la frecuencia natural se aproxima a la de operación es la de 1300 Hz, perteneciente al modo 6 (1300 Hz, 4.23 %) correspondiente al cilindro soporte y el modo 1 del acumulador de energía (1100 Hz, 5.34%). Durante la operación de cambio de toma, el conmutador podría entrar en resonancia, y producirse un estado de vibración en el que el conmutador no podría evacuar la energía almacenada y el material se colapsaría.

8. Bibliografía

- [1] Bengtsson, C. "Status and trends in transformer monitoring" *IEEE Trans. Power Delivery* 11, no 3, 1996, pp. 1379- 1384.
- [2] CIGRE SC 12 WG 12.05; "An International Survey on Failures in Large Power Transformers in Service" *ELECTRA*: 88, 1983, pp. 21-47.
- [3] Bae, B. and Kim, K. A "Hilbert transform approach in source identification via multiple-input single-output modeling for correlated inputs", *Mechanical Systems and Signal Processing* 12, no 4, 1998, pp 501-513.
- [4] Chui, C. *Wavelet Analysis and its Applications*, Academic Press, Vol 1, 1992.
- [5] MATLAB™. (2006)
- [6] Gao, W. "Interval natural frequency and mode shape analysis for truss structures with interval parameters" *Finite Elements in Analysis and Design*, 42, no 6, 2006, pp. 471-477.
- [7] Moore, S., Lai, J., Shankar, K. "ARMAX modal parameter identification in the presence of unmeasured excitation—I: Theoretical background" , *Mechanical Systems and Signal Processing* 21, no 4, 2007, pp. 1601- 1615.
- [8] Rivas, R., Burgos J. C., and Garcia-Prada J.C. "Condition Assessment of Power OLTC by Vibration Analysis Using Wavelet Transform", *IEEE Transactions on Power Delivery* 24, no 2, 2009, pp. 687- 694.