

# Artículo técnico

**José Manuel Fregoso Flores**  
Ingeniero Eléctrico de Controles,  
Motores y Tableros SA -  
COMOTASA

**Francesc Fornieles**  
Responsable de Desarrollo de  
Mercados - Dpto. Marketing  
CIRCUTOR SA

## Armónicos de ranura

### en sistemas de generación eléctrica

#### Introducción

Los problemas derivados por la falta de calidad eléctrica, y más concretamente por los armónicos, suele ser suficientemente conocido por técnicos e ingenieros.

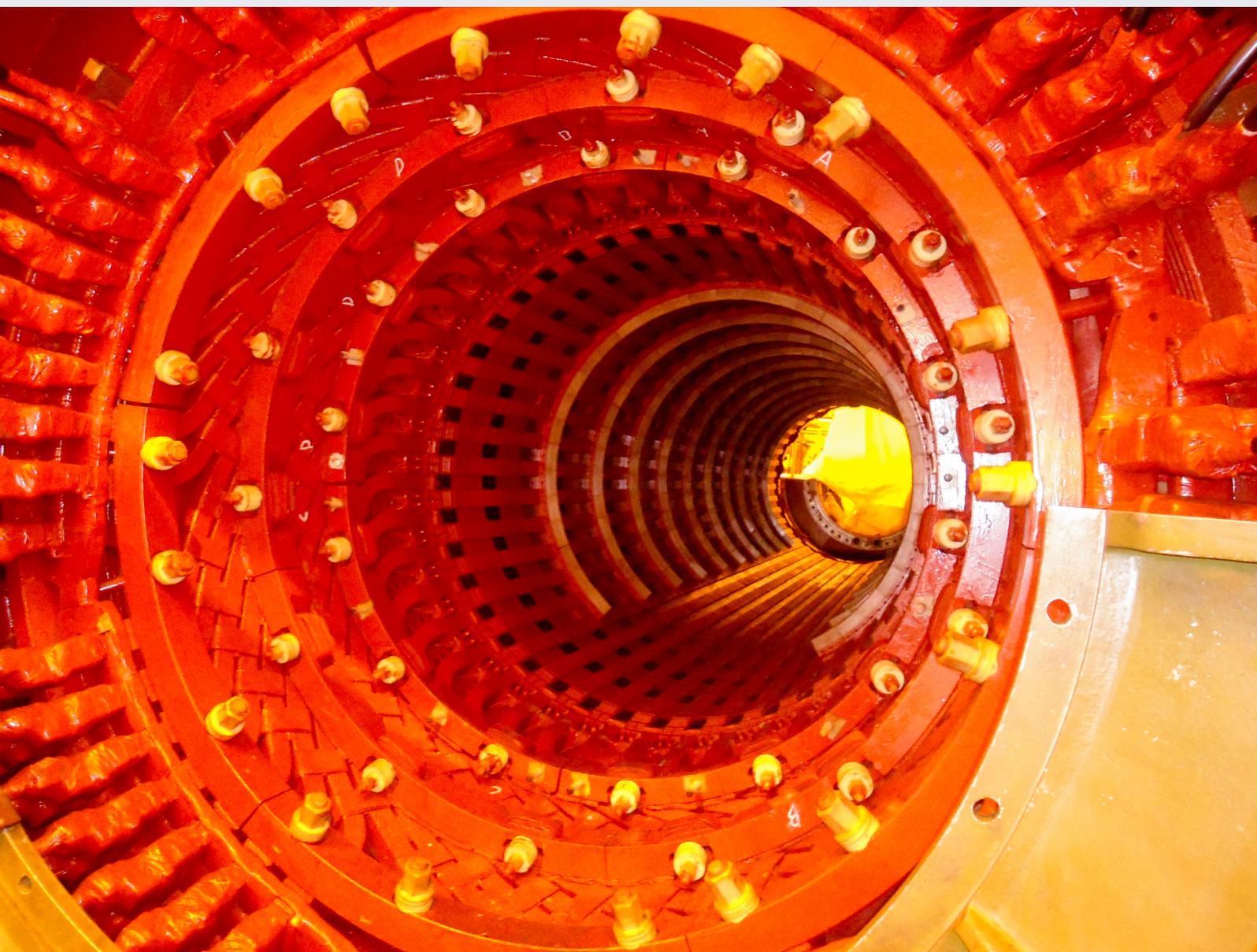
Los sistemas de filtrados se ocupan de reducir y atenuar la propia corriente armónica consumida por los receptores, pero, *¿y si el origen de calidad eléctrica proviene del sistema de generación?*

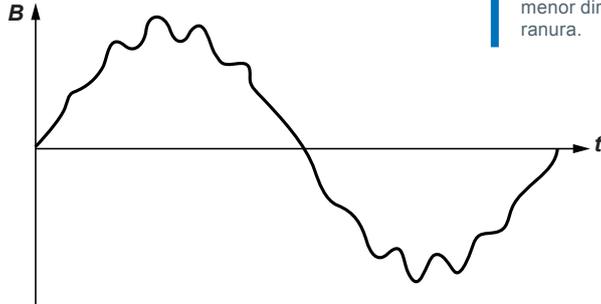
En el presente artículo veremos qué son los armónicos de ranura, y el estudio de un caso por resonancia con este tipo de armónicos generados.

#### Armónicos de ranura

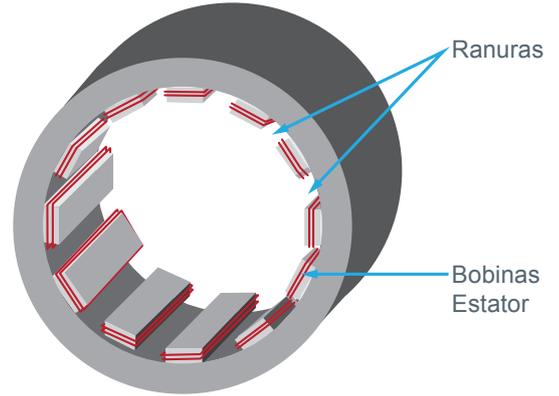
La propia construcción de los devanados de los estatores de las máquinas eléctricas giratorias de corriente alterna puede producir la aparición de componentes armónicas en tensión denominadas "armónicos de ranura".

La existencia de ranuras uniformes alrededor de la parte interna del estator causa variaciones regulares de reluctancia y de flujo a lo largo de la superficie del estator, causando la deformación de la onda de tensión.





La reluctancia de cada ranura es mayor que la superficie metálica entre ellas; por lo cual, la densidad de flujo es menor directamente sobre la ranura.



Estátor con ranuras

Los armónicos de ranura ocurren a frecuencias determinadas por el espacio que haya entre las ranuras adyacentes. El orden de las componentes viene dado por la expresión:

$$v_{ranura} = \frac{2 \cdot M \cdot S}{P} \pm 1$$

donde:

- $v_{ranura}$  = orden de componente armónico
- $S$  = número de ranuras del estator
- $P$  = número de polos de la máquina
- $M$  = número entero, normalmente igual a 1, con los que se producen los armónicos de ranura de menor frecuencia.

Los principales efectos de los armónicos de ranura son:

- Inducción de armónicos de tensión al sistema eléctrico, deformando la onda en tensión.
- Aumento de la tasa de distorsión en tensión THDU(%)
- Mayor facilidad de presentar resonancia con baterías de condensadores
- Disminución del rendimiento de motores (menor par, vibraciones, etc)
- Actuación inadecuada de dispositivos electrónicos sensibles.

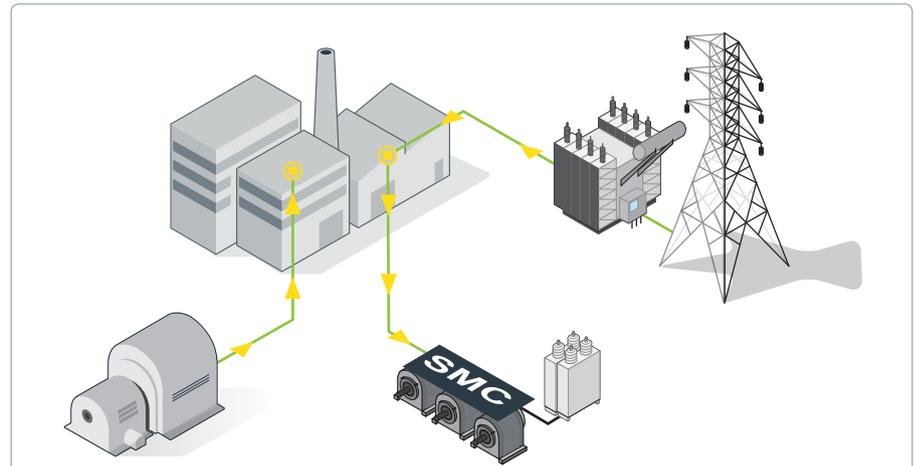
### Resonancia por armónicos de ranura

En este caso nos encontramos con una industria que disponía de una doble alimentación, formada por un generador de 6,5 MW a 4,16 kV/60Hz, y la

alimentación directa de la red eléctrica a través de una red eléctrica primaria de 69 kV a través de un transformador de 9 MVA y secundario de 4,16 kV/60 Hz. La instalación disponía de un sistema de control de motores (SMC) que estaba compensado con un condensador de 50 kvar a 4,16 kV.

Elementos de un Motor de Inducción.

La existencia de ranuras uniformes alrededor de la parte interna del estator causa variaciones regulares de reluctancia y de flujo.



### Problemas

Los problemas que presentaba la instalación eran:

- Falla reiterada del arrancador del motor SMC.
- Disparo de las protecciones y degradación de los condensadores de MT.
- Fallos en el sistema de alimentación ininterrumpida UPS en BT.
- Daños en los balastos electrónicos.
- Falsas alarmas de calentamiento en compresores, etc.

Esquema simplificado del sistema eléctrico y mediciones eléctricas

### Pruebas

Se realizaron 4 diferentes pruebas en la alimentación del motor:

- Alimentado desde la red eléctrica con y sin batería de condensadores.
- Alimentado del generador con y sin batería de condensadores.

En la **Tabla 1** muestra a manera de resumen los principales parámetros eléctricos medidos, viendo que la variación de las componentes armóni-

cas sin (Fig. 1 y 2) o con (Fig.3 y 4) batería de condensadores es prácticamente la misma, y en todo momento con niveles correctos.

**Tabla 1**

**Comparativo de parámetros eléctricos a plena carga en motor de 300 H.P., alimentado desde la red eléctrica, con y sin batería de condensadores de 50 kVAr, 4, 16 kV**

~	Condensador 50 kVAr	Tensión (V)	Demanda medida			% THD		% armónicas en tensión y corriente, fase 3									
			kW	kVAr	F.P.	V	I	3°		5°		7°		35°		37°	
								V	I	V	I	V	I	V	I	V	I
CFE	Fuera operación	4155	212	125	0.86	1.01	1.92	0.49	0.66	0.38	1.52	0.26	0.81	0.04	0.03	0.16	0.04
	En operación	4155	212	99	0.90	0.77	1.92	0.14	0.52	0.34	1.54	0.11	0.88	0.04	0.06	0.19	0.09

Fig.1

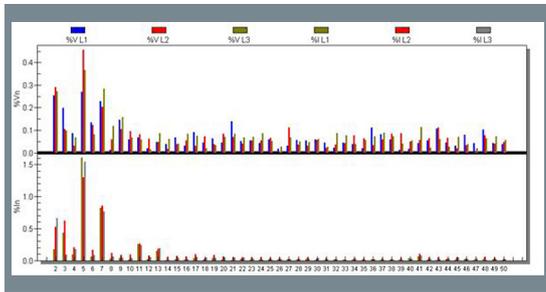
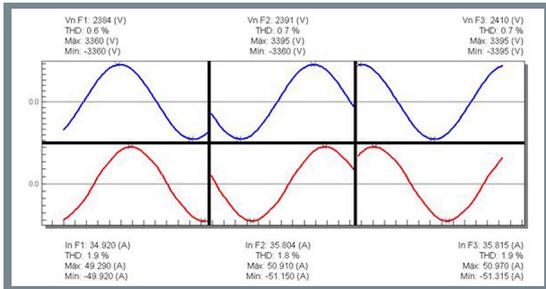


Fig.2



**Personalizadas y efectivas.**  
La baterías de condensadores (CAPACITORES) de CIRCUTOR, Són especialmente fabricadas según el tipo de soluciones que se necesitan.

Fig.3

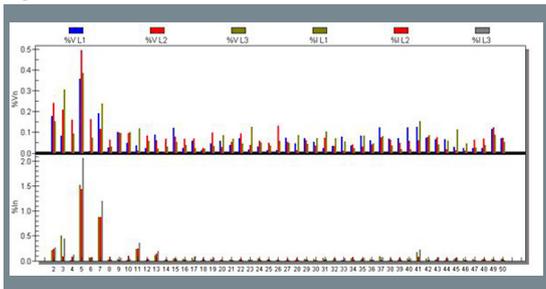
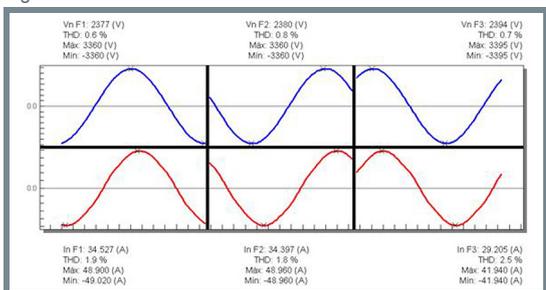


Fig.4



En la **Tabla 2** muestra el comportamiento del sistema alimentado al generador de 6,5 MW. Vemos como aparece un aumento considerable en la distorsión

en tensión cuando conectamos el condensador de 50 kvar, principalmente el aumento es producido en el armónico de orden 37.

**Tabla 2**

Comparativo de parámetros eléctricos a plena carga en motor de 300 H.P., alimentado por el generador 6,5 MW, con y sin banco de capacitores de 50 kVAr, 4, 16 V																	
~	Condensador 50 kVAr	Tensión (V)	Demanda medida			% THD		% armónicas en tensión y corriente, fase 3									
			kW	kVAr	F.P.	V	I	3°		5°		7°		35°		37°	
								V	I	V	I	V	I	V	I	V	I
G 6500 kW	Fuera operación	4155	208	123	0.86	2.96	2.53	0.42	0.11	1.89	2.05	0.80	1.42	0.30	0.02	1.26	0.04
	En operación	4155	209	97	0.90	4.60	7.20	0.46	0.10	1.74	1.08	0.91	1.18	0.49	1.38	3.96	6.49

Fig.5

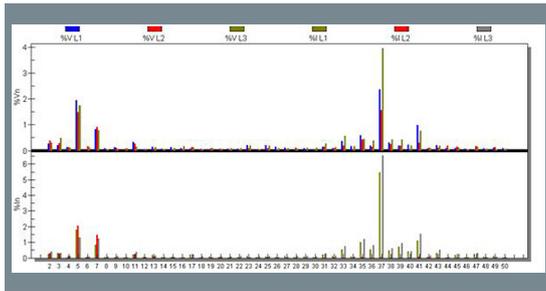


Fig.6

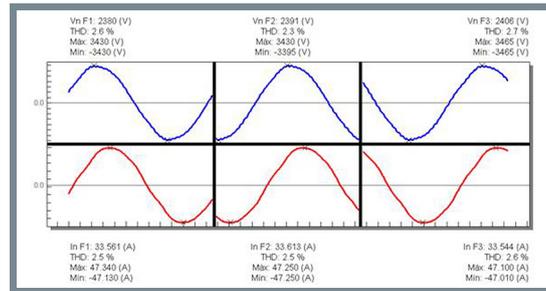


Fig.7

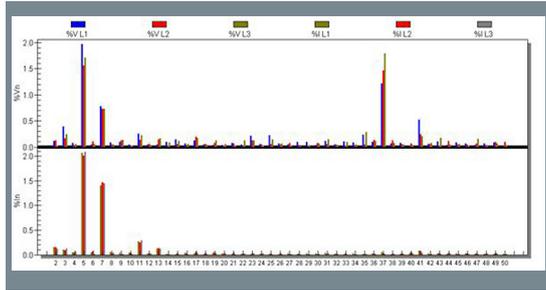
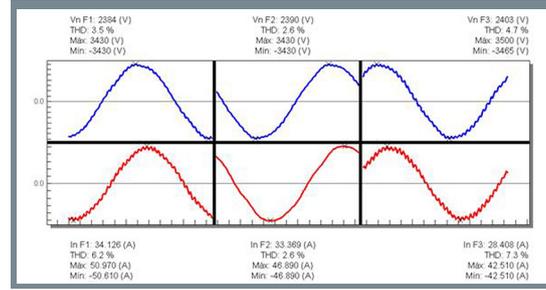


Fig.8



**Detalle del rotor y del estator de un generador.**

Normalmente tanto en el estator como en el rotor existen devanados hechos con conductores de cobre por los que circulan corrientes suministradas o cedidas a un circuito exterior que constituye el sistema eléctrico.

Fuente:  
[www.endesaeduca.com](http://www.endesaeduca.com)  
 Recursos / conceptos básicos / Los generadores

Como se puede apreciar en las (Figuras 6 y 7 sin capacitor) y (5 y 8 con capacitor), vemos que la distorsión armónica operando con el generador es mayor comparada con la distorsión que se presenta operando directamente con la red eléctrica; vemos que se presenta las componentes de orden 5ª y 37ª con amplitudes aparentemente despreciables (1.89% y 1.26% respectivamente).

Con la batería de condensadores en operación se presenta la resonancia en el armónico 37º llevando su amplitud a valores elevados (>3%). Durante la prueba se presentaron fallas, entre ellas, la falsa alarma en el control de la caldera debido a que la distorsión del voltaje se presenta en todos los circuitos alimentados por el generador.

La causa de esta resonancia se debe a la combinación de parámetros de corto circuito en el bus de 4,16 kV, 71230 kVAr, y el tamaño del condensador, 50 kVAr. En efecto la frecuencia de sintonía está dada por:

$$n = \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q}}$$

donde:

$n$  = orden armónico de resonancia  
 $S_{cc}$  = Potencia de cortocircuito disponible en el punto de conexión del banco de capacitores  
 $Q$  = Potencia efectiva del banco de capacitores

por lo tanto:

$$n = \sqrt{\frac{71230}{50}} = 37,74$$



Fig.9

$$v_{ranura} = \frac{2 \cdot M \cdot S}{P} \pm 1 = \frac{2 \cdot 1 \cdot 72}{4} \pm 1 = 35 \text{ y } 37$$

Vimos también que el generador era de 4 polos y tenía 72 ranuras en su estator por lo que aplicando la fórmula inicial tenemos que sus armónicos de ranura de más bajo orden son de orden 35 y 37, coincidiendo con la resonancia presentada en la instalación, y que comportaba los diferentes problemas subyacentes. (Fig.9)

Un aspecto interesante de esta prueba fue el hecho de que conforme la carga fue descendiendo hasta 0, la distorsión de la onda de tensión se acentuó tal como la muestra la figura con el perfil de la tasa de distorsión en tensión THD(U)% .

## Conclusiones

En este caso la medida inmediata fue dejar el condensador de 50 kVAr permanentemente fuera de operación, planteando la necesidad de utilizar una batería de condensadores con filtro de rechazo desintonizado al 7%. Sin embargo, la presencia de la 37ª armónica de tensión, al ser un problema inherente al diseño del generador, no se puede eliminar, y por lo tanto, en periodos de baja carga se ha presentado la misma falsa alarma en el control de la caldera, para lo cual se sugirió alimentar a través de un sistema UPS tipo online el control de la caldera, para de esta manera eliminar esta componente de la tensión de alimentación.

Cada vez se hace más imprescindible emplear equipos de compensación con filtros de rechazo o desintonizado debido al incremento de aplicaciones con dispositivos electrónicos y de electrónica de potencia, cuyos efectos hoy en día no podemos despreciar. La implementación de un sistema de monitorización nos facilita el diagnóstico, control y uso eficiente de la energía eléctrica, y poder detectar cualquier anomalía que presente nuestra instalación. ▀



## Bibliografía:

- "Máquinas eléctricas"  
Stephen Chapman  
Ed. McGrawHill 2ª edición.
- "Eficiencia en el uso de la energía eléctrica"  
Josep Balcells,  
Francesc Fornieles,  
Vicente Barra.  
Ed. Marcombo