



**MEDICIÓN Y ANÁLISIS DEL EFECTO DE ARMÓNICAS Y TRANSITORIOS SOBRE
BANCOS DE CAPACITORES EN EL SISTEMA ELÉCTRICO DE ENERSA
(ARGENTINA).**

P. E. Issouribehere*

**J. M. Martínez Fayó **
F. Issouribehere***

G. A. Barbera*

*** IITREE-LAT FI-UNLP (Instituto de Investigaciones Tecnológicas para Redes y Equipos Eléctricos-Laboratorio de Alta Tensión – Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de La Plata)**

**** ENERSA (Energía de Entre Ríos S.A.)**

RESUMEN

El trabajo tiene como base el análisis de las mediciones de armónicas y transitorios en distintas subestaciones AT/MT de la Empresa de distribución de energía eléctrica ENERSA de Argentina.

En esta empresa se ha ejecutado una ampliación de la compensación *shunt* existente con el propósito de controlar el nivel de tensión en diversos nodos de la red de subtransmisión en 132 kV, y como solución más económica para aumentar su capacidad de transporte en condiciones de emergencia.

Dado que este tipo de instalaciones influye sobre el nivel de perturbaciones en la red, y por ende en la Calidad del Servicio eléctrico público y en la solicitud del equipamiento propio, fue necesario prever sus efectos a nivel de proyecto. Por esta razón, se efectuaron mediciones sobre los bancos de capacitores de MT previamente instalados, con el objeto de enmarcar la situación preexistente y obtener datos para el diseño de las nuevas instalaciones.

Aquí se presentan los resultados de las mediciones de distorsión armónica tanto en la corriente como en la tensión en cada uno de los sitios bajo distintas condiciones de funcionamiento, esto es con y sin los bancos de compensación en servicio. En cuanto a transitorios, se presentan los oscilogramas de tensión y corriente capturados durante la conexión y desconexión de los bancos. A partir de estos oscilogramas, se analiza la solicitud de los bancos bajo estas circunstancias de operación. Adicionalmente se analiza la solicitud de los interruptores existentes ante dichos transitorios.

Finalmente, en el artículo se concluye acerca del efecto de los bancos existentes sobre la calidad de onda de la tensión hacia la red de distribución en cada una de las estaciones transformadoras y sobre su propia solicitud por parte de estos mismos fenómenos.

PALABRAS-CLAVE

Armónicas – Banco de capacitores – Magnificación – Perturbaciones – Solicitud – Transitorios.

1. INTRODUCCIÓN

La inclusión de bancos de capacitores en un sistema eléctrico provee importantes beneficios, como son la compensación del factor de potencia y el soporte de tensión. Sin embargo, los bancos de capacitores modifican el contenido armónico de tensiones y corrientes en la red, y su operación da lugar a transitorios de tensión y corriente que pueden sobresolicitar al resto del equipamiento de la red. Atendiendo a esto, se efectuaron mediciones sobre los bancos de capacitores de MT actualmente instalados para inferir luego el efecto de las nuevas instalaciones proyectadas.

Los registros obtenidos previamente a las obras de ampliación de energía reactiva son de vital importancia, puesto que a partir de ellos es posible:

- Documentar el grado de contaminación actual armónica presente en cada una de las estaciones.
- Verificar las solicitaciones por contaminación armónica y por los transitorios de conexión y desconexión de los bancos existentes.
- Analizar la dependencia del contenido armónico presente en las distintas estaciones en función del estado del o los bancos.
- Obtener la información de campo necesaria para la determinación de modelos de simulación realistas a emplear en futuros estudios eléctricos.

Los resultados obtenidos en las mediciones de armónicas de la tensión son comparados con los niveles de referencia existentes en la normativa nacional (Res. ENRE 184/00 [1]), con el propósito de determinar su cumplimiento por parte de la Distribuidora. Luego, se evalúa la solicitación de los bancos existentes por presencia de armónicas comparando los niveles medidos con los estándares internacionales sobre capacitores shunt (IEC-60871-1 [2]). En cuanto a los transitorios de conexión y desconexión, se presentan los oscilogramas de tensión y corriente capturados durante la conexión y desconexión de los bancos. A partir de estos oscilogramas, se analiza la solicitación de los bancos bajo estas circunstancias de operación. Se comparan los resultados obtenidos con lo recomendado en las normas internacionales referidas al tema [2]. En uno de los casos analizados, se calcula a partir de la corriente de conexión el factor de pérdidas de la red aguas arriba del banco. Este factor resulta de fundamental importancia para el estudio de las resonancias armónicas desde un punto de vista práctico y es empleado en los modelos de simulación de sistemas eléctricos.

2. MEDICIONES EN ET PARANÁ OESTE

La ET Paraná Oeste cuenta con dos transformadores, tal como puede observarse en el diagrama unifilar de la Figura 1. Cuenta además con dos bancos de capacitores de 4,8 MVar cada uno, instalados directamente en ambas barras de 13,2 kV.

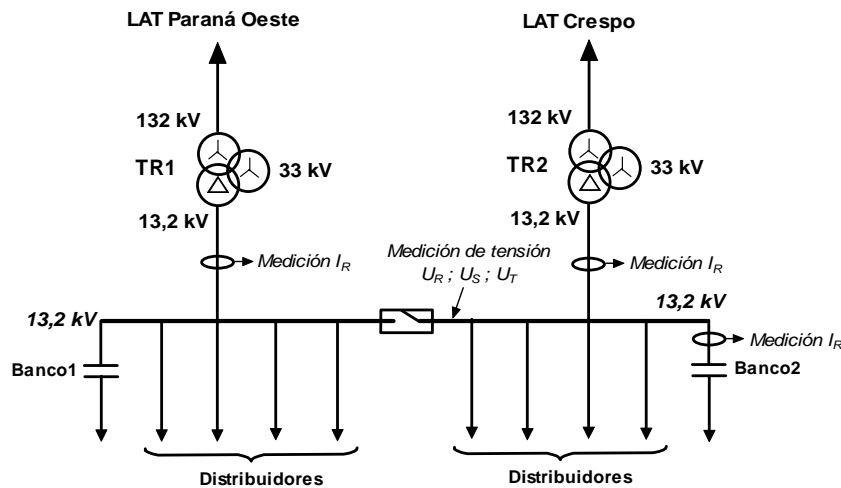


Figura 1. Diagrama unifilar de la estación y puntos de medición.

2.1 Mediciones de armónicas en ET Paraná Oeste

Los resultados obtenidos de la medición normalizada de distorsión armónica de tensión en las barras de 13,2 kV se muestran en la Figura 2 y la Figura 3. En la Tabla I se presenta la comparación de los valores medidos con los límites impuestos por la Res. 184/00 del ENRE [1].

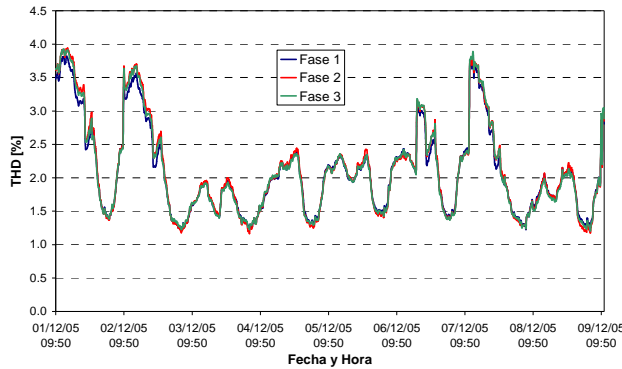


Figura 2. Perfil de THD en las tres fases de tensión.

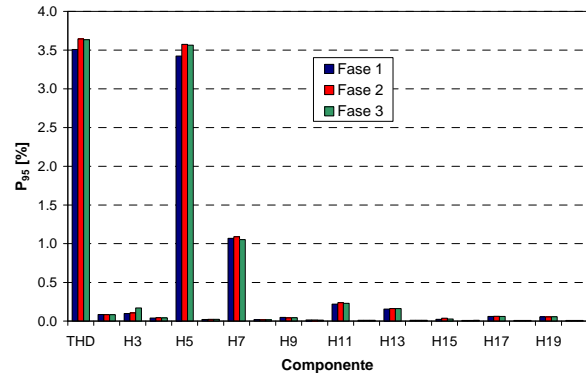


Figura 3. Armónicas individuales en las tres fases de tensión.

Tabla I. Resumen de Distorsión Armónica de la Tensión en Barras de 13,2 kV. Paraná Oeste.

	THD	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13
Límites ENRE	8	2	5	1	6	0.5	5	0.5	1.5	0.5	3.5	0.2	3
Medio	2.12	0.06	0.08	0.04	1.92	0.02	0.80	0.01	0.03	0.01	0.12	0.01	0.10
P95	3.64	0.08	0.11	0.04	3.57	0.02	1.09	0.02	0.04	0.01	0.24	0.01	0.16
Máximo	3.94	0.12	0.19	0.25	3.87	0.39	1.26	0.09	0.06	0.05	0.28	0.04	0.18

De los resultados presentados en la Tabla I se concluye que las armónicas individuales de tensión y la distorsión armónica total se encuentran por debajo de los límites impuestos por [1].

Los resultados obtenidos de la medición normalizada de distorsión armónica de corriente en los secundarios de los transformadores se muestran en la Figura 4 y la Figura 5. En la Tabla II se presenta un resumen de los valores medidos.

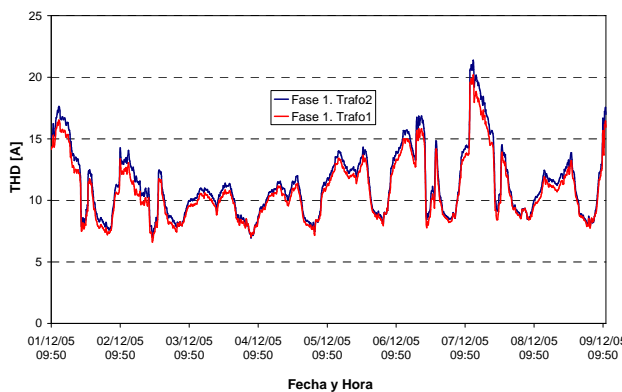


Figura 4. Perfil de THD en la corriente de los secundarios de los transformadores.

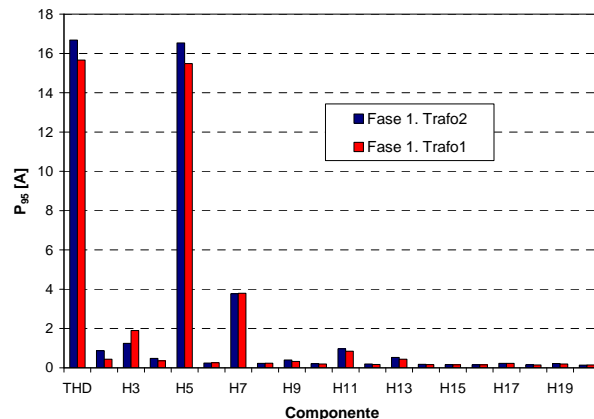


Figura 5. Armónicas individuales en la corriente de los secundarios de los transformadores.

Tabla II. Resumen de Distorsión Armónica de la corriente en los secundarios de los transformadores.

	THD	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13
Medio	11.34	0.71	0.81	0.34	10.92	0.18	2.21	0.15	0.24	0.15	0.71	0.14	0.29
P95	16.68	0.86	1.24	0.48	16.54	0.24	3.77	0.23	0.40	0.21	0.97	0.19	0.52
Máximo	21.37	1.37	1.59	1.20	21.26	1.48	4.65	0.64	0.48	0.27	1.21	0.25	0.65

Se realizaron mediciones de distorsión armónica de corriente en uno de los bancos de compensación. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 6 y la Figura 7. En la Tabla III se comparan los valores medidos con los límites impuestos por la Norma Internacional de Capacitores *Shunt* IEC 60871-1 [2].

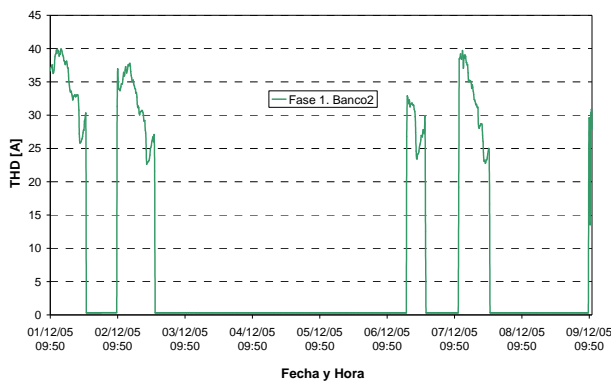


Figura 6. Perfil de THD en la corriente del banco.

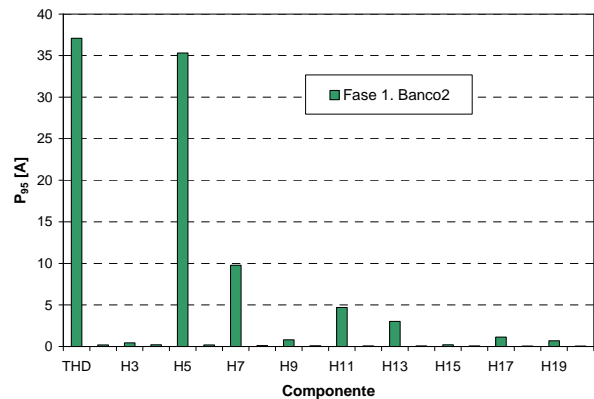


Figura 7. Armónicas individuales de corriente en el banco de compensación.

Tabla III. Solicitud armónica en el banco de compensación.

Variable	Nominal	H1	H5	H7	H11	H13	Valores Eficaces	Valor Total ref. a nominal (%)	Límites IEC 60871 (%)
Uh (V eficaz)	7967.4	8020.4	471.3	145.2	31.7	21.1	8036	101	110
Ih (A eficaz)	200.8	203.9	35.3	9.8	4.7	3	207.3	103	130

La sobrecarga por armónicas en el banco se encuentra por debajo de los límites impuestos por [2].

2.2 Mediciones de Transitorios en ET Paraná Oeste

Las pruebas consistieron en la energización y desenergización de uno de los bancos de capacitores de 4,8 MVar ubicados en la barra de 13,2 kV de la ET Paraná Oeste. Los resultados obtenidos para la maniobra de energización del banco de compensación se muestran en la Figura 8 y la Figura 9.

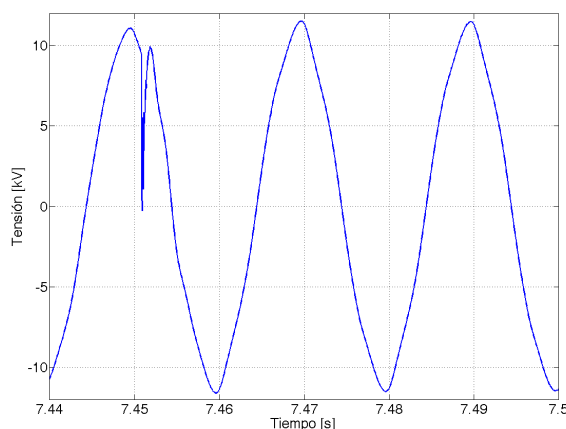


Figura 8. Tensión fase-neutro en la barra de 13,2 kV.

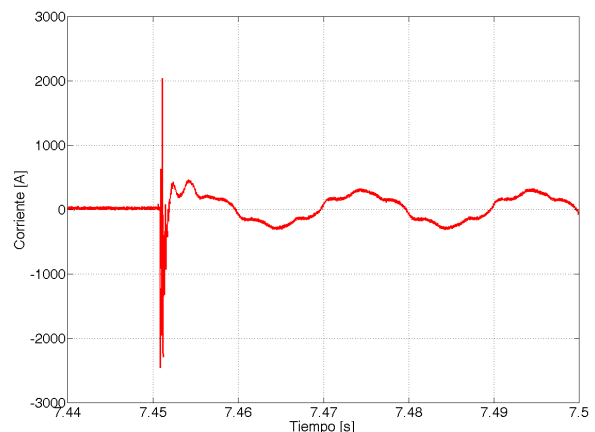


Figura 9. Corriente de inserción del banco.

Los resultados obtenidos para la maniobra de desenergización del banco de capacitores se muestran en la Figura 10 y la Figura 11.

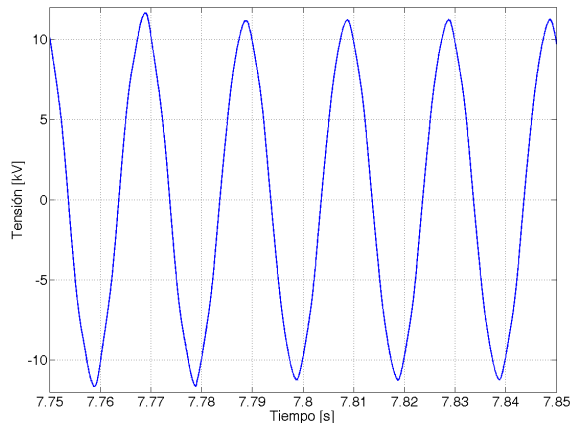


Figura 10. Tensión fase-neutro en la barra de 13,2 kV.

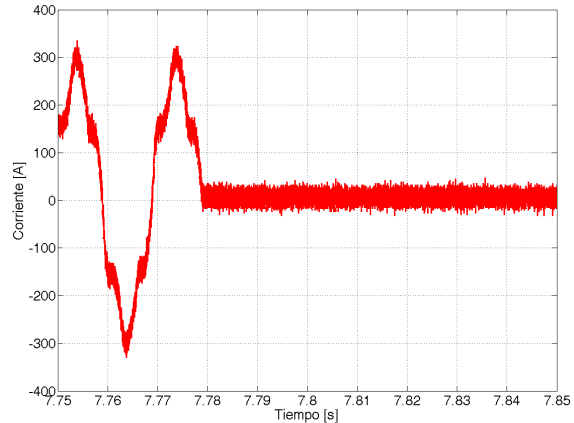


Figura 11. Corriente de desconexión del banco.

En la Tabla IV se presentan los resultados obtenidos en el transitorio de conexión del banco de capacitores y los valores máximos establecidos para la corriente y frecuencia de la corriente de inserción según [2].

Tabla IV. Valor cresta y frecuencia de la corriente de inserción del banco.

ET	Banco [MVar]	S _{cc} MVA	I _{nom} (A)	I _{max} = 100*I _{nom} (kA)	I _s (kA)	I _s /I _{nom}	f (Hz)
Paraná Oeste	4.8	150	201	20.1	2.45	12.2	5000

3. MEDICIONES EN ET CRESPO

La ET Crespo cuenta con dos transformadores, tal como puede observarse en el diagrama unifilar de la Figura 12. La ET cuenta además con dos bancos de capacitores de 4,8 MVar cada uno, conectados en los terciarios de 13,2 kV de cada uno de los transformadores. Todos los distribuidores que emergen de la ET son en 33 kV. Las dos barras de 13,2 kV de la ET se encuentran desacopladas. Se presentan en este caso las mediciones realizadas en el transformador 1 y en el banco de compensación 1.

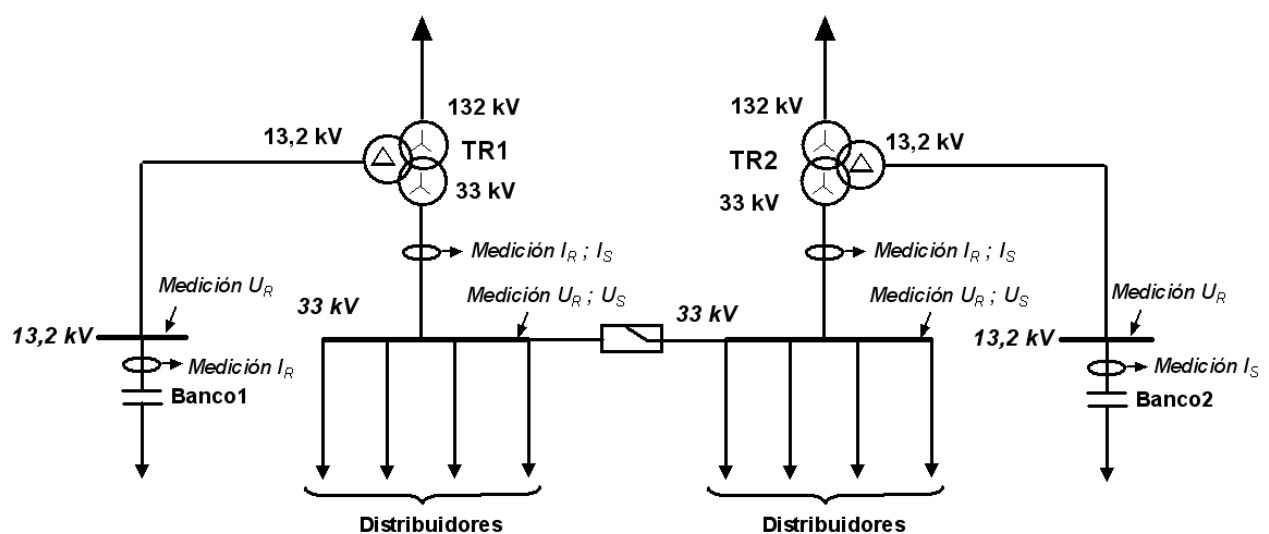


Figura 12. Diagrama unifilar de la estación y puntos de medición.

3.1 Mediciones de armónicas en ET Crespo

Los resultados obtenidos de la medición normalizada de distorsión armónica de tensión en las barras de 33 kV y de corriente en el secundario del transformador 1 se muestran en la Figura 13 y la Figura 14 respectivamente. En la Tabla V se presenta la comparación de los valores de distorsión de tensión medidos con los límites impuestos por la Res. 184/00 del ENRE [1], y en la Tabla VI se presentan los valores de distorsión de corriente.

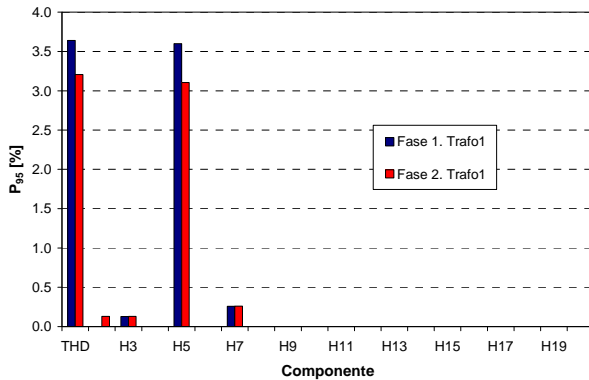


Figura 13. Armónicas individuales de tensión en 33 kV.

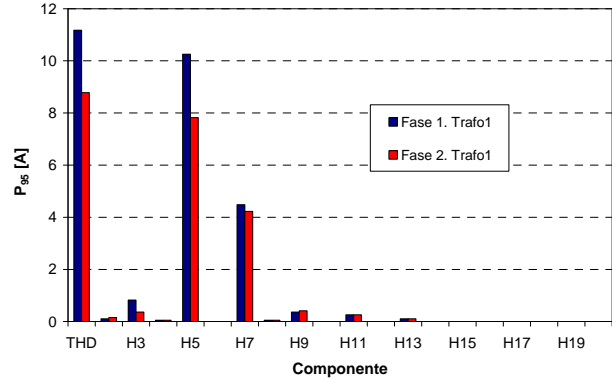


Figura 14. Armónicas individuales de corriente en 33 kV.

Tabla V. Distorsión de tensión en 33 kV.

	THD	H2	H3	H4	H5	H6	H7
Límites ENRE	8	2	5	1	6	0.5	5
Medio	2.51	0.00	0.01	0.00	2.43	0.00	0.18
P95	3.64	0.00	0.13	0.00	3.60	0.00	0.26
Máximo	6.54	0.26	0.78	0.00	6.47	0.00	0.52

Tabla VI. Distorsión de corriente en 33 kV.

	THD	H2	H3	H4	H5	H6	H7
Medio	7.47	0.06	0.65	0.01	6.71	0.00	3.09
P95	11.17	0.10	0.83	0.05	10.26	0.00	4.49
Máximo	18.67	0.21	0.98	0.10	16.88	0.05	5.02

Los resultados de las mediciones de tensiones y corrientes armónicas en el banco de compensación 1 se muestran en la Figura 15 y la Figura 16.

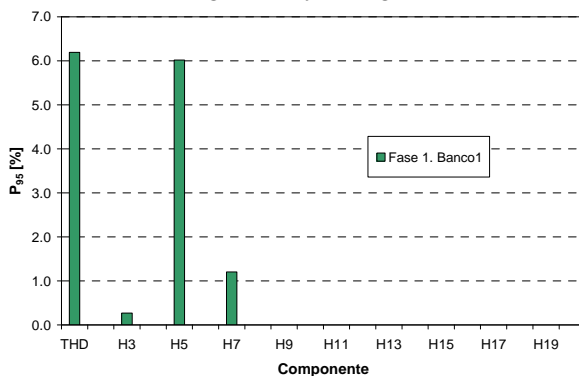


Figura 15. Armónicas de tensión en el banco.

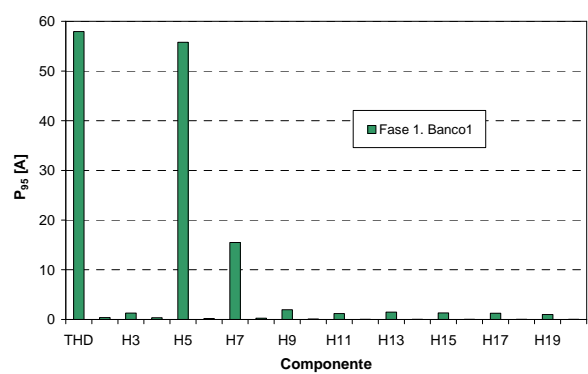


Figura 16. Armónicas de corriente en el banco.

Los resultados de la medición de armónicas en el banco de compensación se presentan en la Tabla VII.

Tabla VII. Solicitud armónica en el banco de compensación 1.

Variable	Nominal	H1	H5	H7	H11	H13	Valores Eficaces	Valor Total ref. a nominal (%)	Límites IEC 60871 (%)
Uh (V eficaz)	7967.4	7841	794.6	158.4	26.4	13.2	7882	100	110
Ih (A eficaz)	200.8	191.3	55.8	15.5	1.2	1.5	200	100	130

La sobrecarga por armónicas en el banco se encuentra por debajo de los límites impuestos por [2].

3.2 Mediciones de Transitorios en ET Crespo

Los resultados obtenidos para la maniobra de energización del banco de compensación se muestran en la Figura 17 y la Figura 18.

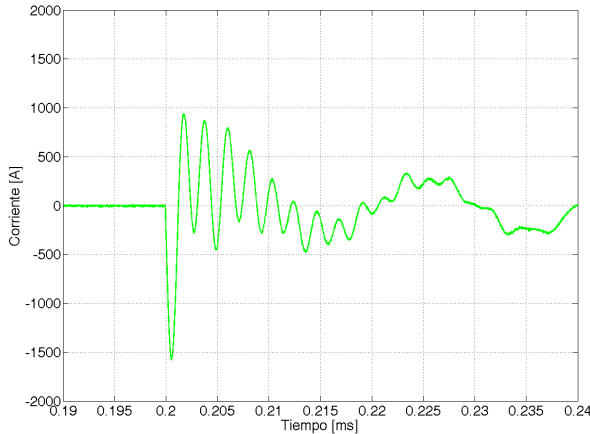


Figura 17. Corriente de inserción del banco.

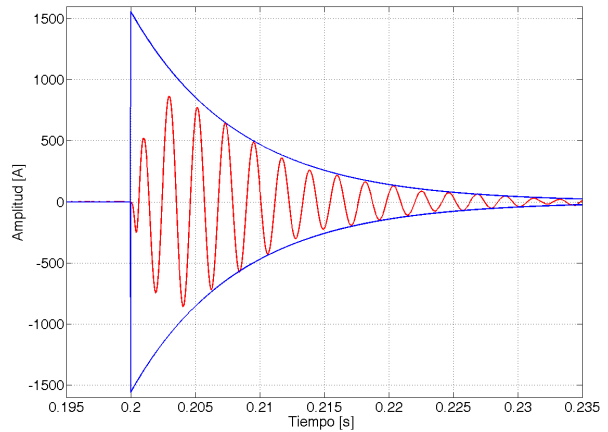


Figura 18. Corriente de Inserción del banco, sin tener en cuenta la componente de frecuencia industrial.

Los valores esperables de corriente cresta y frecuencia de la misma para la energización del banco de compensación 1, dependen de la potencia de cortocircuito de la ET, y pueden ser estimados con las fórmulas aproximadas, indicadas en las normas IEC 60871-1, y que se reproducen en la Tabla VIII.

Tabla VIII. Comparación de los valores calculados y medidos de la corriente de inserción.

IEC 60871-1	Valores calculados	Valores medidos
$I_s = I_n \sqrt{\frac{2S_{cc}}{Q}}$ [A]	1640	1580
$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0C}}$ [Hz]	302	455

Donde:

$I_n = 201$ A es la corriente nominal del banco de compensación; $S_{cc} = 160$ MVA es la potencia de cortocircuito en la barra de 13.2 kV de la ET; $Q = 4.8$ MVAR es la potencia reactiva nominal del banco de compensación; $L_0 = 3.47$ mH es la inductancia que se obtiene de la potencia de cortocircuito de la red a tensión nominal; $C = 80.23$ μ F es la capacidad nominal del banco de compensación

3.3 Determinación del Factor de mérito Q del circuito

Para obtener el factor de mérito Q del circuito se analiza la corriente durante la energización del banco de compensación y se filtran las componentes de 50 y 250 Hz. En la Figura 18 se observa la nueva forma de onda de corriente y se muestra la forma en que se evalúa el factor Q correspondiente la oscilación registrada. A partir del instante ($t=0.2$) se produce un transitorio oscilatorio de pulsación ω_0 , que puede expresarse en forma general como:

$i(t) = I_{\max} \text{sen}(\omega_0 t) e^{-kt}$, siendo $1/k$ el tiempo en que la amplitud de la oscilación de pulsación ω_0 tarda en disminuir al valor $1/e$ (36,8%) de la amplitud inicial. Esta expresión se corresponde con la corriente de un circuito RLC :

$$i(t) = I_{\max} \text{sen}\left(\omega_0 \sqrt{1-\xi^2} t\right) e^{-\xi\omega_0 t} \quad \text{con} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{y} \quad \xi = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$$

Por otra parte, para una combinación serie RLC , el Q del circuito resulta:



$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \frac{L}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{2\xi}$$

A partir de las expresiones mencionadas, puede encontrarse una relación para determinar el factor Q .

$$k t = \xi \omega_0 t = \frac{1}{2Q} \omega_0 t = \frac{1}{2Q} \frac{2\pi}{T_0} t$$

Si el tiempo en que la amplitud de la oscilación tarda en disminuir $1/e$ veces la amplitud inicial se mide en períodos T_0 de la oscilación, es decir:

$$\frac{1}{k} = N T_0 \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{N T_0} = \frac{1}{Q} \frac{\pi}{T_0} \quad \Rightarrow \quad Q = N\pi$$

Donde N es el número de períodos en que la amplitud de la oscilación se reduce 36,8% de su valor inicial. Con este procedimiento, y a partir de los resultados de las mediciones, se obtiene:

$$\tau = 7.873ms \quad \Rightarrow \quad Q = \frac{\omega_0 \tau}{2} = 11 \quad \Rightarrow \quad R = \frac{\omega_0 L}{Q} = 0.90 \Omega$$

4. CONCLUSIONES

Al comparar los resultados de las mediciones de armónicas en la red de 13,2 kV con los límites impuestos se encuentra un cumplimiento holgado de las Normas, con un margen de reserva del orden del 50% en la capacidad de absorción de armónicas por parte de la red, por cual se prevé que las ampliaciones de compensación no requerirán medidas de mitigación (a confirmar por los respectivos estudios).

De igual manera, los resultados de mediciones de armónicas en los bancos de compensación existentes indican la compatibilización actual entre la contaminación existente en la red y sus especificaciones constructivas, resultados que sirven – adecuadamente extrapolados - al dimensionamiento de la ampliación prevista.

Como contribución de estas mediciones a la etapa de estudios y diseño posterior se destaca el aporte realizado para obtener, a partir de las mediciones de la corriente de inserción del banco de compensación, el factor de mérito Q del circuito. La estimación del factor Q permite, a su vez, obtener el valor de la resistencia equivalente vista desde el banco de compensación hacia la red a las frecuencias armónicas. Conocer el valor aproximado de la resistencia es de fundamental importancia para el ajuste de los modelos utilizados para los estudios de armónicas y transitorios de la ampliación de la compensación, particularmente en condiciones de magnificación en las proximidades de resonancia.

Los resultados de las mediciones de los transitorios de conexión y desconexión de los bancos de compensación permiten descartar fenómenos anormales – reencendidos de arco, p.e -, lo que habilita para la etapa de estudios la utilización de fórmulas/ modelos simplificados y ya validados. También dan apoyatura a la correcta selección del equipamiento de maniobra de los nuevos bancos y los ajustes de protecciones.

5. REFERENCIAS

- [1] “Resolución ENRE 184/00: “Base Metodológica para el Control de la Calidad del Producto Técnico. Etapa 2”
- [2] IEC 60871-1 *Shunt capacitors for a.c. power systems having a rated voltage above 1000 V.*