

Estudio de armónicas y compensación del reactivo en una Planta Industrial

Raúl Bianchi Lastra
IITREE-LAT
Fac. de Ingeniería-UNLP
(B1900AMF) La Plata, Argentina
rbianchi@ing.unlp.edu.ar

Fabián Corasaniti
IITREE-LAT
Fac. de Ingeniería-UNLP
(B1900AMF) La Plata, Argentina
corasani@ing.unlp.edu.ar

1. INTRODUCCIÓN.

Basándose en estudios preliminares, se ha concluido en la necesidad de instalación de filtros de compensación reactiva en la red eléctrica de 13,8 kV de una planta industrial.

La compensación total a instalar es de 24 MVAR, separados en filtros de armónicas 3^{ra}, 5^{ta} y 7^{ma} de potencias 5, 7 y 12 MVAR respectivamente.

Se considera necesario realizar entonces estudios adicionales, con el objetivo de verificar el diseño y funcionamiento de los filtros, como así también analizar flujos de armónicas, distorsiones de tensión y determinación de posibles ocurrencias de transitorios durante la operación de los mismos, que puedan solicitar excesivamente a los elementos involucrados.

Con el resultado de estos estudios, se pretende verificar el diseño preliminar de los filtros y determinar si existe alguna restricción en la operación de los mismos.

2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA RED

En la Figura A1 del Anexo I se muestra un detalle simplificado de la red a partir de su punto de conexión al sistema.

Como se puede observar en dicha figura, la red se encuentra conectada al sistema a través de dos transformadores de iguales características:

$$\begin{aligned} S_n &= 23 \text{ MVA,} \\ U_1/U_2 &= 132/13.8 \text{ kV} \\ Z_{cc} &= 10\%. \end{aligned}$$

Las líneas de interconexión que vinculan los transformadores con las barras de generación se encuentran conformadas por cables de 13.8 kV, con aislación butiltenax y tendido subterráneo con una longitud aproximada de 2 km.

Además, la red posee generación propia constituida por 4 generadores idénticos:

$$\begin{aligned} S_n &= 33,12 \text{ MVA} \\ U_n &= 13,8 \text{ kV.} \end{aligned}$$

Se encuentran conectados dos de estos generadores en la barra de generación N° 1 y los otros dos en la barra de generación N° 3, tal como se observa en la Figura A1.

En diversos puntos de la red existen además reactores limitadores, con el objeto de disminuir los niveles de cortocircuitos en las barras de 13.8 kV.

Las cargas de la red se encuentran constituidas en gran parte por motores de media tensión (en los niveles de 2.3, 4.16 y 6 kV) algunos de elevadas potencias (1900 HP) y también motores en baja tensión (0.38kV).

A su vez existen motores de corriente continua y otros tipos de cargas alimentadas a través de rectificadores, algunos de ellos controlados con tiristores, y también con reactor saturable. Estos rectificadores son la principal fuente de generación de corrientes armónicas existentes en la red.

No existen elementos de compensación de reactivo en la planta y se desea corregir el factor de potencia en la barra de carga N°3.

A partir de ello, y de las características de las cargas existentes en la red, se instalarán en dicha barra filtros sintonizados de forma tal que a frecuencia industrial (50 Hz) provean la compensación necesaria, y a su vez resulten filtradas las corrientes armónicas que predominan en el sistema.

Serán instalados filtros para la 3^{ra}, 5^{ta} y 7^{ma} armónica siendo los dos primeros del tipo sintonizados y operados con un único interruptor, mientras que el de 7^{ma} es del tipo amortiguado.

3. METODOLOGÍA.

Para los estudios, se utilizará la última versión disponible del programa para cálculo de transitorios electromagnéticos ATP (*Alternative Tran-*

scient Program), construyéndose para tal fin, un modelo digital de la red a analizar.

En total, los grupos de estudios realizados son los que se enumeran a continuación, aunque aquí se presentan aquellos correspondientes a los dos primeros de ellos:

- a. Búsqueda de situaciones de posible resonancia, utilizando el método de barridos de frecuencia o 'Frequency Scan'.
- b. Estudio de flujos de armónicas y distorsiones de tensión en distintas situaciones, utilizando el método de 'Harmonic Frequency Scan'.
- c. Simulación digital de maniobras de inserción y desconexión de los filtros, a fin de determinar las solicitaciones máximas.
- d. Estimación cualitativa de situaciones, configuraciones y/o condiciones de posible ocurrencia de autoexcitación de los generadores, considerando la inclusión de los filtros y/o pérdida de carga.

Además, es de destacar que los modelos digitales construidos difieren según los estudios sean de 'Frequency Scan' o 'Harmonic Frequency Scan' que se realizan en el 'dominio de la frecuencia', o de transitorios electromagnéticos, los cuales se efectúan en el 'dominio del tiempo'.

4. MODELADO DE LA RED

Dado que por su extensión no es posible ni justificable construir el modelo completo de la red, se modeló un equivalente detallado solamente del sub sistema en análisis, es decir, de la red vinculada a la barra de carga N° 3, en la cual se instalarán los filtros.

Se tuvo en cuenta la vinculación de esta barra de carga con las restantes, pero no se modelaron en detalle las cargas conectadas en dichas barras.

En la Figura A2 del Anexo I se puede observar el modelo construido con el Atpdraw.

Tanto para las simulaciones de barrido en frecuencia como para los flujos de armónicas se debieron utilizar modelos adecuados de los componentes de la red para modelar la misma.

A continuación se realiza una descripción de los modelos y componentes utilizados para la conformación de la red.

4.1.1. Conexión al sistema

La potencia de cortocircuito en el punto de conexión al sistema es aproximadamente de 3000 MVA, en el nivel de tensión de 132 kV.

A partir de ello se definió el equivalente del sistema en dicho punto a través de la reactancia de cortocircuito del sistema X_{cc} , la cual fue modelada como un elemento de parámetros concentrados.

4.1.2. Generadores

Los generadores se modelaron con impedancias concentradas para cada secuencia. Para la secuencia directa el valor corresponde al de la reactancia subtransitoria del generador, mientras que para la secuencia cero, se considera la resistencia de neutro que posee dos de los cuatro generadores.

4.1.3. Transformadores

Para la representación de los transformadores de la red se utilizó el circuito equivalente del mismo, sin tener en cuenta la variación de sus parámetros con la frecuencia.

No se considera necesario además representar la alinealidad de su circuito magnético. Sólo fue tenido en cuenta para el modelado de los transformadores el valor de la reactancia inductiva sin considerar las pérdidas.

Con respecto a la representación para la secuencia homopolar, se considera el tipo de conexión de los mismos, ya sea triángulo o estrella con su respectivo desfase entre las tensiones primarias y secundarias.

4.1.4. Cables

Para el modelado de los cables de alimentación de media tensión se consideró el modelo de línea de parámetros distribuidos de "Clarke" el cual forma parte de la librería estándar del ATP.

Los valores de los parámetros de los cables fueron obtenidos de un catálogo general de cables donde figuran datos típicos de parámetros de secuencia directa por unidad de longitud. Se adoptaron los valores correspondientes

a cables categoría II, de aislación XLPE, de material CU y tripolares.

Para los parámetros de secuencia cero, se los supuso iguales a los de secuencia directa.

Sólo fueron tenidos en cuenta en el modelado de la red los cables de media tensión correspondientes a las líneas de interconexión 1 y 2 y aquellos cables que alimentan a cada una de las barras de carga de la barra de generación N°3.

Los alimentadores de cada uno de los transformadores, como así también los de motores y otros tipos de cargas, no fueron modelados.

4.1.5. Motores de inducción

EL modelo utilizado para los motores depende del tipo de estudio realizado.

Para los estudios de barridos de frecuencia el modelo del motor de inducción consiste en una impedancia igual a la de rotor bloqueado del mismo

Para los estudios de flujos de armónica se lo modela con la misma impedancia, pero en serie con una fuente ideal que representa la tensión interna del motor. Esto es necesario para obtener la corriente nominal por cada motor.

Los modelos de motores fueron construidos con la herramienta 'DATA BASE MODULE' del ATP

4.1.6. Rectificadores o rectificadores controlados

Existen instalados en diversos puntos del sistema, rectificadores de 6 y 12 pulsos.

Teóricamente, las armónicas generadas por un rectificador son de orden $nk \pm 1$, siendo n el número de pulsos, y $k=0,1,2,3,\dots,\infty$. Es decir, un rectificador de 6 pulsos, además de corrientes de frecuencia nominal genera corrientes armónicas de orden 5,7,11,13,17,19...., etc. Para el caso de uno de 12 pulsos, las armónicas son de orden 11 y superior.

La amplitud de cada armónica, para el caso en que la potencia de cortocircuito en bornes del rectificador sea infinita, es teóricamente igual a la de orden fundamental multiplicada por la inversa del orden de la armónica en cuestión. Es

decir, la armónica 5 tendrá una amplitud de 1/5 (20%) de la de 50Hz, la 7ma 14,28%, etc. Estas amplitudes resultan inferiores, cuanto mayor sea la inductancia del sistema, es decir, cuanto menor sea la potencia de cortocircuito en bornes del rectificador.

Los rectificadores de 6 pulsos fueron representados con un conjunto de fuentes sinusoidales trifásicas de corriente, de manera de representar en forma individual cada una de las armónicas que este dispositivo inyecta en el sistema, de acuerdo con lo mencionado en los párrafos precedentes, considerando una potencia de cortocircuito aproximada en cada caso.

Los rectificadores de 12 pulsos son en realidad dos de 6 pulsos conectados a secundarios de transformadores de manera que entre ambos exista un desfase de 30 grados. Si la carga en ambos rectificadores son iguales, se obtiene un rectificador de 12 pulsos, y es aplicable la fórmula antes mencionada, por lo que no existirán armónicas de orden 5 y 7.

Si las cargas no son iguales, las amplitudes de las armónicas 5 y 7 será algo intermedio entre las correspondientes al de un rectificador de 6 pulsos y uno de 12 pulsos, y función del desbalance entre las cargas.

Los rectificadores controlados con tiristores, tiene un contenido armónico similar a aquellos no controlados, aunque la amplitud de las armónicas superiores son un poco mayor.

Los modelos de rectificadores fueron construidos con la herramienta 'DATA BASE MODULE' del ATP

4.1.7. Filtros

Los filtros se modelaron con parámetros concentrados R, L y C. Se modelaron 2 filtros del tipo sintonizados serie L-C para las armónicas de orden 3° y 5° respectivamente y un tercero del tipo amortiguado para la 7° armónica.

En la Tabla I se indican los valores de los parámetros utilizados en cada uno de los filtro.

Tabla I. Datos de los filtros

#	Tipo	U (kV)	Q (MVA)	R _p (Ω)	L (mH)	C (μF)
3 ^{ra}	Sintonizado	13,8	5	0	15,62	74,079
5 ^{ta}	Sintonizado	13,8	7	0	3,764	112,12
7 ^{ma}	Amortiguado	13,8	12	11,74	1,038	196,26

4.2. Modelos desarrollados con DATA BASE MODULE.

Los modelos desarrollados para los estudios con la herramienta DATA BASE MODULE del ATP se indican a continuación.



Modelos de motor de inducción
 Datos de entrada: HP, Tensión nominal, relación I_{arr}/I_n , $\cos\Phi$ y Fase



Rectificador trifásico de 6 pulsos
 Datos de entrada: Tensión nominal, Corriente nominal, Fase y Potencia de cortocircuito en bornes.



Filtros
 Datos de entrada: Tensión nominal, MVAR nominales, orden del filtro y relación X/R

5. ESTUDIOS REALIZADOS

Una vez construido el modelo digital de la red, con el mismo se realizó los siguientes estudios:

- Barridos de frecuencia (FREQUENCY SCAN), con el objetivo de verificar posibles puntos de resonancia.
- Flujos de armónicas (HARMONIC FREQUENCY SCAN)
- Aunque no se presentan en este artículo, también se realizaron estudios de transitorios de conexión y desconexión de los filtros.

6. FREQUENCY SCAN

El barrido en frecuencia consiste en conectar una fuente de corriente en la Barra N°3, de amplitud 1 A y frecuencia continuamente variable desde 50 Hz hasta un valor máximo.

Como resultado se obtiene la variación del módulo de la impedancia del sistema en función de la frecuencia, vista desde dicho punto de la red

Esto permite determinar los polos y ceros de la impedancia vista desde esta barra, y por ende también los valores de corrientes y tensiones a diferentes frecuencias.

Es de destacar que, debido a limitaciones del programa PlotXY utilizado para graficar las salidas, en los gráficos el eje Y es rotulado en volts pues es la variable medida en la barra, y el eje X con el *logaritmo* de la frecuencia. Sin embargo, dado que la fuente de corriente es de amplitud 1 A, cada volt equivale a 1 ohm. Es decir, cada gráfico muestra la variación de la impedancia en ohms, en función de la frecuencia.

Los casos analizados son fundamentalmente los siguientes:

- Sin los filtros (caso base)
- Con todos los filtros
- Con un banco de capacitores de igual compensación reactiva

6.1. Caso A, Sin filtros:

En la Figura 1 se muestra el resultado de la simulación sin los filtros, considerado como caso base para comparación con las otras alternativas.

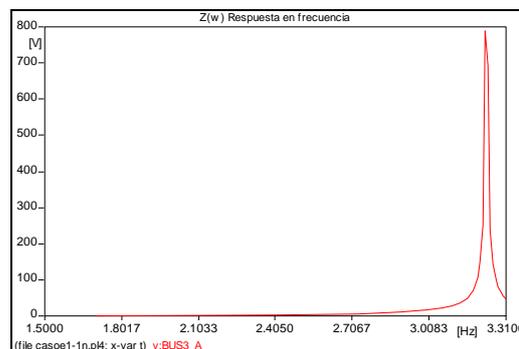


Figura 1. Respuesta en frecuencia en la barra N°3, sin filtros

Se observa una frecuencia de resonancia para un valor de $\log f=3.23$, es decir, para una frecuencia de 1698,2 Hz o aproximadamente para armónica de orden 34°.

La Tabla II muestra el valor de la impedancia para cada armónica, obtenida del gráfico de la figura precedente:

Tabla II. Módulo de la impedancia para distintas armónicas

Orden de la armónica (h)	Módulo de la impedancia Z (Ohm)
1	0,52

Orden de la armónica (h)	Módulo de la impedancia Z (Ohm)
3	1,57
5	2,64
7	3,80
11	6,28
13	7,67
17	11,52
19	14,08
23	20,56
25	27,00

La distorsión armónica impar (THDi) se define según la siguiente ecuación:

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{25} (Z_h \times I_h)^2}}{U_1}$$

En este caso, se la refiere a la tensión nominal del sistema, es decir, $U_1 = 13.8 \text{ kV}$

Considerando sólo las armónicas impares (excepto la de orden 1) de la Tabla II y suponiendo que todas las corrientes armónicas tienen una amplitud de 1 A, entonces resulta, en la situación actual del sistema sin filtros:

$$THDi = 0.29\%$$

6.2. Caso B, Con Filtros.

Se presentan ahora los resultados obtenidos teniendo en cuenta la instalación de los filtros proyectados en la barra N°3.

En la Figura 2 se muestra la gráfica de la respuesta obtenida, en donde también se incluye la característica $Z(f)$ del sistema sin filtros, a fines comparativos.

Se puede observar en la curva los puntos de valor de impedancia nula, que corresponden con las frecuencias de sintonía de los filtros, es decir, 150, 250 y 350 Hz.

El filtro de 7^{ma} armónica, al ser del tipo amortiguado, presenta un valor de impedancia más elevado para su frecuencia de sintonía. De comparar las curvas con y sin filtros, se observa la atenuación producida por el conjunto de ellos para frecuencias elevadas, con respecto al caso sin filtros.

Se observa además las frecuencias de resonancia (polos) producidas por la inserción de los filtros en la red, las cuales ocurren para frecuencias menores a sus frecuencias de sintonía.

El de 3^{ra} armónica produce un polo de la impedancia para 135 Hz., el de 5^{ta} armónica para 190 Hz. y el de 7^{ma} armónica para 280 Hz, las cuales corresponden a frecuencias denominadas interarmónicas.

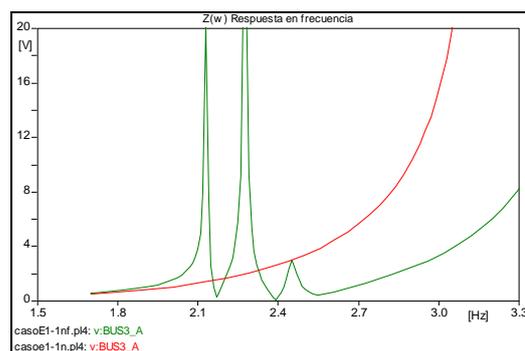


Figura 2. Respuesta en frecuencia con todos los filtros, y comparación con el caso base.

La mayoría de cargas generadoras de corrientes armónicas existentes en la red interna, como lo son rectificadores no controlados, rectificadores controlados, etc., sólo generan corrientes de amplitudes considerables en el caso de las armónicas impares.

Las armónicas pares, sin embargo, suelen encontrarse debido a la saturación de transformadores o condiciones de funcionamiento desbalanceadas de las cargas.

Por ende, aunque las amplitudes de las armónicas pares no sean de consideración frente a las impares, deben tenerse en cuenta las resonancias producidas por los filtros para dichas frecuencias, a fin de evitar problemas de ferorrresonancia debido a la energización de transformadores.

Utilizando el mismo procedimiento que en el caso a, el THD resultante en este caso es de

$$THD = 0.053\%$$

Es de aclarar que los valores de distorsión calculados para estos casos, deben tomarse so-

lamente como índices comparativos entre la situación con y sin filtros.

Dependiendo de las amplitudes reales de cada una de las corrientes armónicas inyectadas en la barra N°3, la distorsión en la tensión resultará de la sumatoria de los productos del módulo de la impedancia, por la amplitud de la corriente correspondiente cada frecuencia.

Los valores de distorsiones calculados se indican a los fines de observar comparativamente la disminución en la misma con la instalación de los filtros.

Una evaluación más precisa de los beneficios obtenidos con la instalación de los filtros, será presentada más adelante en los estudios de flujos de corrientes armónicas, o 'Harmonic Frequency Scan'.

6.3. Caso C, Con banco de compensación equivalente:

Si en la barra N°3 se conectan en lugar de filtros, solamente bancos de capacitores para la corrección del factor de potencia de potencia equivalente (aproximadamente 24 MVar), se obtiene el resultado que muestra en la Figura 3, en donde también se incluye la correspondiente al caso base para comparación.

En dicha figura, se observa que el banco de capacitores establece una frecuencia de resonancia para el valor de 195 Hz.

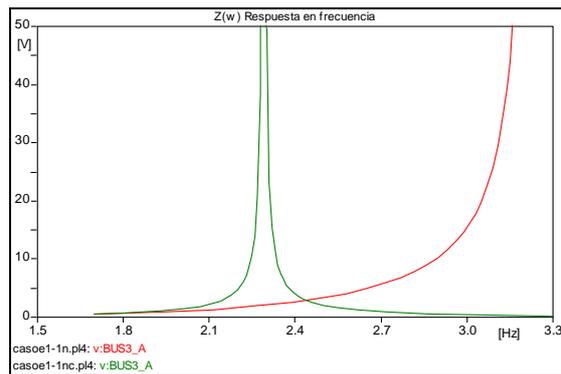


Figura 3. Caso con compensación capacitiva, comparado con el caso base.

De la comparación de las curvas con y sin capacitores, se observa un aumento de las distorsiones para frecuencias entre los 80 y 275 Hz con respecto al caso sin filtro, con una reso-

nancia además en 195 Hz., o sea del orden aproximado a la 4^{ta} armónica.

Es de notar que se incrementa sensiblemente la impedancia para frecuencias correspondientes a armónicas presentes en la red. Por ejemplo para la 3^{ra} armónica se produce un aumento del 147% en el valor de la impedancia y para la 5^{ta} aproximadamente un 70%.

Estas son frecuencias cercanas a las corrientes armónicas de mayor amplitud generadas por la mayoría de las cargas alineales existentes en el sistema, las cuales son inyectadas por los rectificadores conectados en diferentes puntos de la red.

Si se tiene en cuenta que cualquier cambio en la configuración de la red, o en la cantidad de banco de capacitores conectados, haría que dicha frecuencia se moviera en un entorno de los centenares de Hertz, podría aparecer en la red distorsiones superiores, con consecuencias adversas para el sistema y el equipamiento.

En la Figura 4 se presentan las simulaciones de los tres casos anteriores para así poder comparar los resultados obtenidos.

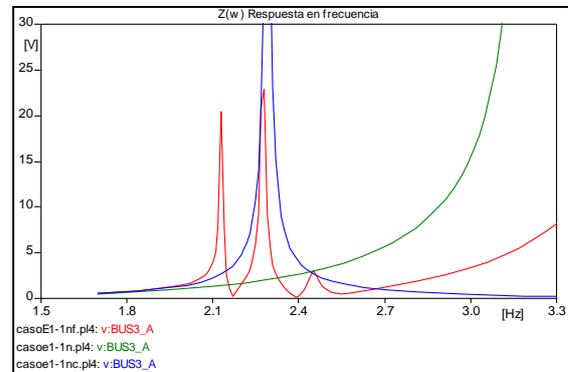


Figura 4. Respuesta en frecuencia en la barra N°3. Comparación de los casos analizados.

La curva verde representa el caso actual, sin conexión de bancos de capacitores o filtros, la curva azul teniendo en cuenta sólo la conexión de los bancos de capacitores para compensar el reactivo y la curva roja con la actuación de los filtros.

Se puede apreciar que los filtros además de mitigar las armónicas de orden 3^{ra}, 5^{ta} y 7^{ma}, producen menores distorsiones entre los valores de 140 Hz. y 465 Hz con respecto al caso de instalación sólo de bancos de capacitores.

6.4. Caso Adicionales:

Los filtros de 3^{ra} y 5^{ta} tienen un interruptor común, por lo que se conectan en bloque. Además, el filtro de 7^{ma} tiene su propio interruptor. Esto es así para poder modular la compensación reactiva en función de las necesidades de la planta.

Por lo tanto, es necesario analizar el caso donde solamente estén conectados los filtros de 3^{ra} y 5^{ta} (Caso B1), como así también con solamente el de 7^{ma} (Caso B2).

6.4.1. Caso B1, con filtros de 3^{ra} y 5^{ta}

En la Figura 5 se muestra la respuesta para el caso de estar conectados los filtros de 3^{ra} y 5^{ta} armónica en la barra N°3.

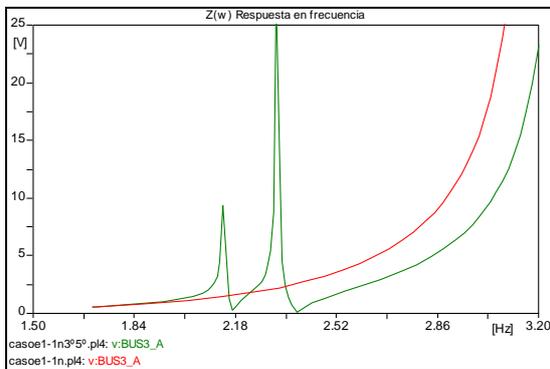


Figura 5. Respuesta en frecuencia en la barra N°3 con los filtros de 3^{ra} y 5^{ta}

El filtro de 3^{ra} armónica establece una frecuencia de resonancia en 138 Hz. y el de 5^{ta} armónica en 209 Hz.

Utilizando el mismo procedimiento que para los casos precedentes, la distorsión resulta para este caso:

$$\text{THD} = 0.146\%$$

6.4.2. Caso B2, Solamente el filtro de 7^{ma}

En la Figura 6 se presenta la respuesta en frecuencia en la barra de carga N°3 para el caso de estar sólo conectado el filtro de 7^{ma} armónica.

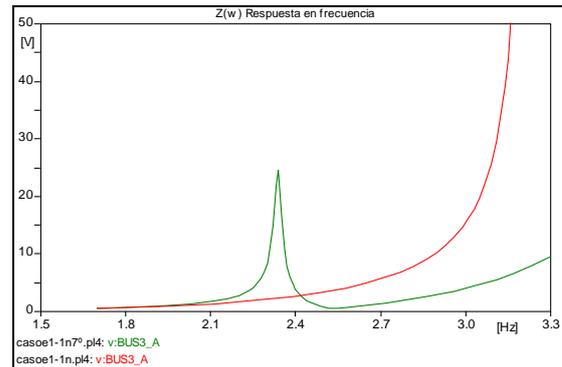


Figura 6. Respuesta en frecuencia en la barra N°3 con sólo el filtro de 7^{ma}

Se observa la frecuencia de sintonía del filtro para 350 Hz. y la frecuencia de resonancia para 220 Hz.

De acuerdo con el Caso B, cuando el filtro de 7^{ma} armónica se encuentra conectado junto con los de 3^{ra} y 5^{ta} establece una frecuencia de resonancia a los 280 Hz (Figura 2), pero cuando se encuentra conectado sólo, la frecuencia de resonancia es a los 220 Hz, y las distorsiones son más elevadas.

Es de destacar en este caso que, a diferencia de los filtros de 3^{ra} y 5^{ta} conectados en forma individual en la barra N°3, el filtro de 7^{ma} produce una frecuencia de resonancia muy próxima a la de 5^{ta} armónica.

Como existen actualmente armónicas de quinto orden, generadas por los equipos existentes en el sistema, si se conectara solamente el filtro de 7^{ma} se produciría un sensible aumento de las distorsiones para dicha armónica.

Por lo tanto, es una condición operativa que debe evitarse.

El factor de distorsión armónica total resulta en este caso de:

$$\text{THD} = 0.074\%$$

6.5. Resumen de casos

A continuación se presenta en la Tabla III, un resumen de los casos analizados

Tabla III. Resumen de los casos

Filtro conectado	Frecuencias de resonancia de los filtros con la red (Hz.)	Distorsión $\frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{25} (Z_h \times I_h)^2}}{U_1}$
Ninguno	1698	0.290
3, 5 y 7	135, 190 y 280	0.053
3 y 5	138 y 208	0.146
7	220	0.074

7. FLUJOS DE ARMONICAS (HARMONIC FREQUENCY SCAN)

En este punto se describen los estudios de flujos de armónicas, utilizando el módulo de cálculo 'Harmonic Frequency Scan (HFS)' del ATP.

En el punto anterior, se realizaron 'barridos de frecuencia' que, como se ha dicho, consiste en conectar *una* fuente de corriente de amplitud 1 A en *una sola* barra del sistema, y graficar la variación de la impedancia '*vista*' desde esa barra en función de la frecuencia de esta fuente ficticia, la cual se hace variar en forma continua desde un valor mínimo hasta un valor máximo.

Para el caso de 'Harmonic Frequency Scan' en cambio, se conectan *múltiples* fuentes de corriente, en *varios puntos* de la red (aquellos donde existen equipos generadores o 'fuentes' de armónicas), y *solamente* de las frecuencias correspondientes a las armónicas generadas.

El objetivo es analizar el flujo de armónicas por la red, y el efecto que la combinación de todas ellas produce en la distorsión de tensión en diversos puntos del sistema.

Las fuentes o equipos generadores de armónicas, existentes en la red y considerados para este estudio, son fundamentalmente dos:

- Rectificadores de 6 o 12 pulsos, controlados o no.
- Inductancias series saturables, utilizadas para control de rectificadores. Estas existen en equipos conectados a la barra de Estañado.

Para estos modelos no se construye un modelo que los represente físicamente, es decir con diodos, inductancias, etc., dado que no es posible utilizar este tipo de modelos con el 'Harmonic Frequency Scan'.

En su lugar se utiliza, para cada equipo, varias fuentes de corriente de amplitudes y frecuencias diferentes, las cuales en conjunto representan el efecto de cada uno de estos equipos en su punto de conexión.

Las armónicas inyectadas al sistema por los equipos rectificadores puede determinarse teóricamente, según lo indicado en el punto 4.1.6.

En lo que respecta a las inductancias saturables, el contenido armónico es variable en función del grado de saturación. En el sistema se ha medido la presencia de armónicas de orden 3, lo cual se atribuye a la saturación de estas inductancias, porque los rectificadores no generan armónicas de este orden, ya sean de 6 o 12 pulsos.

Por lo tanto, la saturación de estas inductancias es tenida en cuenta en las simulaciones mediante fuentes de armónicas de orden 3, con una amplitud igual a las medidas en campo.

Los casos analizados con el Harmonic Frequency Scan son:

- Sin filtros, para tener un escenario de comparación con los otros casos analizados.
- Con los filtros de 3^{ra} y 5^{ta} armónica.
- Con todos los filtros, 3^{ra}, 5^{ta} y 7^{ma}.
- Con un banco de capacitores de potencia reactiva equivalente a los filtros.

Se utilizó el programa GTPPLOT desarrollado por el Ing. Orlando Hevia para procesar las salidas de HFS.

Con el mismo es posible obtener:

- El espectro de armónicas, para la tensión y/o corriente en los puntos deseados, presentado en formato de gráfico de barras, y/o numéricamente.
- La reconstrucción de la forma de onda de la variable deseada.
- El procesamiento de la señal, para calcular por ejemplo el valor eficaz de la onda, como así también índices de utilidad para definir

la calidad del suministro, o el beneficio de la instalación de los filtros.

Los valores e índices obtenidos como resultado son:

- El valor eficaz de las ondas de tensión y corriente.
- El factor de distorsión total, o THD (del inglés '*Total Harmonic Distortion*')
- El Factor K, que permite evaluar la sobrecarga de transformadores debido a la presencia de armónicas.
- El Factor TIF, útil para evaluar la interferencia que las armónicas pueden introducir en líneas telefónicas o de comunicación.
- El Factor de sobrecarga de capacitores.

En los puntos que siguen, se presentan los resultados obtenidos para cada caso analizado, incluyéndose por simplicidad solamente los gráficos para el caso base, y el contenido armónico en formato tabla para el caso base y los restantes.

Es principalmente de interés el contenido armónico y la forma de onda de la tensión en barra de carga N°3 y de la corriente en el reactor limitador, es decir, la corriente aportada por el sistema, dado que son las variables en donde más se verá el efecto de la inserción de los filtros.

Se indica la amplitud de cada armónica en valor eficaz y como porcentaje de la fundamental.

Posteriormente, también se incluye un cuadro comparativo de los factores resultantes mencionados más arriba, para cada caso.

7.1. Resultados de los estudios de HFS.

La Figura 7 muestra el contenido armónico de la tensión de barra de carga N°3 y la reconstrucción de su forma de onda obtenido basándose en el mismo, para el caso base, es decir, sin ningún filtro o elemento de compensación reactiva.

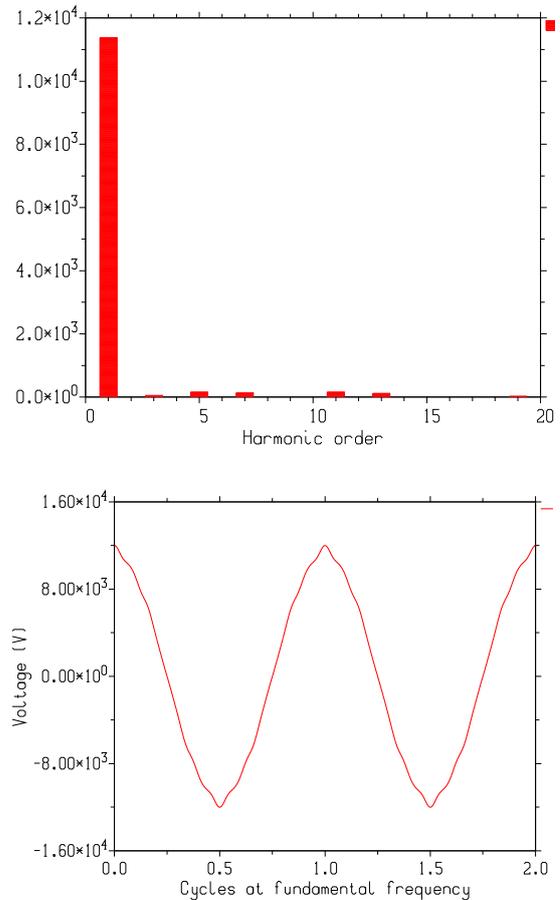


Figura 7. a) Contenido armónico y b) forma de onda de la tensión en Barra N°3 - Caso Sin Filtros.

La Figura 8 a) en cambio muestra el contenido armónico y forma de onda de la corriente suministrada por el sistema a la barra de carga N°3.

La Figura 8 b) muestra gráficamente como se incrementa el calentamiento de un transformador en función del contenido armónico de la corriente que fluye por él. En otras palabras, se muestra cómo la potencia nominal de un transformador se ve reducida debido al contenido armónico de la corriente. Esta reducción es función también de las pérdidas del transformador.

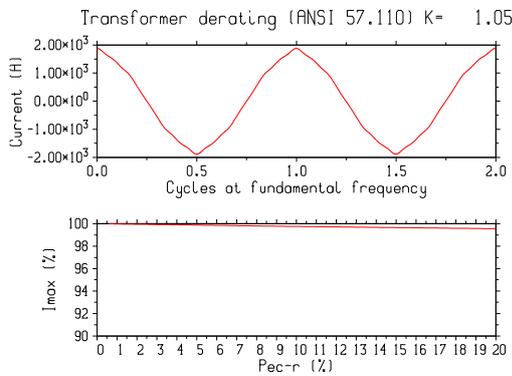
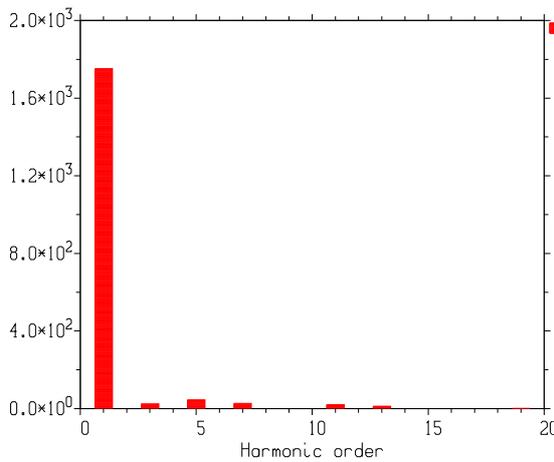


Figura 8. a) Contenido armónico y b) forma de onda de la corriente por el reactor limitador - Caso Sin Filtros.

La Tabla IV indica los resultados numéricos presentados gráficamente en la Figura 8 para el caso base.

Tabla IV. Resultados para el caso sin filtros.

#	Tensión en barra N°3		Corriente en el reactor limitador	
	kV [ef]	%	A [ef]	%
1	8046,03	100,00	1238,84	100,00
3	34,62	0,43	16,87	1,36
5	108,14	1,34	31,60	2,55
7	92,27	1,15	19,24	1,55
11	108,75	1,35	14,38	1,16
13	80,08	1,00	8,94	0,72
17	2,54	0,03	0,22	0,02
19	14,77	0,18	1,12	0,09

Las Tabla V a VII muestran los resultados para cada una de las alternativas analizadas.

Tabla V. Resultados para el caso con todos los filtros.

#Arm.	Tensión en barra N°3		Corriente en el reactor limitador	
	kV [ef]	%	A [ef]	%
1	8042,28	100,00	1553,23	100,00
3	8,35	0,10	4,07	0,26
5	10,18	0,13	2,98	0,19
7	11,76	0,15	2,45	0,16
11	25,42	0,32	3,36	0,22
13	19,95	0,25	2,23	0,14
17	0,63	0,01	0,05	0,00
19	3,50	0,04	0,26	0,02

Tabla VI. Resultados para el caso filtros de 3ª y 5ª.

#Arm.	Tensión en barra N°3		Corriente en el reactor limitador	
	kV [ef]	%	A [ef]	%
1	8044,61	100,00	1302,47	100,00
3	7,72	0,10	3,76	0,29
5	8,89	0,11	2,60	0,20
7	46,65	0,58	9,73	0,75
11	64,22	0,80	8,49	0,65
13	47,64	0,59	5,32	0,41
17	1,48	0,02	0,13	0,01
19	8,38	0,10	0,63	0,05

Tabla VII. Resultados para el caso con capacitor de compensación.

#Arm.	Tensión en barra N°3		Corriente en el reactor limitador	
	kV [ef]	%	A [ef]	%
1	8043,69	100,00	1551,70	100,00
3	78,91	0,98	38,46	2,48
5	186,85	2,32	54,60	3,52
7	42,85	0,53	8,93	0,58
11	14,97	0,19	1,98	0,13
13	7,26	0,09	0,81	0,05
17	0,12	0,00	0,01	0,00
19	0,49	0,01	0,04	0,00

7.2. Resumen de resultados. Factores de calidad.

Las siguientes tablas, muestran una comparación de los resultados y los efectos sobre los índices de calidad que tiene cada alternativa analizada.

En la Tabla VIII se presentan los resultados de los cálculos de los factores de calidad, aplicados a la tensión en barra de carga N°3.

Tabla VIII. Tensión en barra #3

TENSION	Sin Filtros	Filtros 3 ^{ra} y 5 ^{ta}	Filtros 3 ^{ra} , 5 ^{ta} , 7 ^{ma}	Banco capacitores
Valor eficaz	8048	8045	8042	8046
THD	2,48	1,165	0,46	2,58
Factor de Sobrecarga de Trafos	1,051	1,016	1,002	1,016
TIF	30,4	17,9	7,3	5,1
Factor de Sobrecarga de Capacitores	0,226	0,125	0,050	0,128

La Tabla IX presenta los mismos cálculos pero aplicados a la corriente por el reactor limitador de la barra de carga N°3, es decir, la corriente suministrada por el sistema.

Tabla IX. Corriente por el reactor

CORRIENTE	Sin Filtros	Filtros 3 ^{ra} y 5 ^{ta}	Filtros 3 ^{ra} , 5 ^{ta} , 7 ^{ma}	Banco capacitores
Valor eficaz	1240	1303	1553	1553
THD	3,556	1,129	0,445	4,34
Factor de Sobrecarga de Trafos	1,054	1,011	1,001	1,036
TIF	23,99	13,25	4,49	5,92
Factor de Sobrecarga de Capacitores	0,234	0,1046	0,0346	0,196

8. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos, se concluye que:

- La conexión de los filtros de 3^{ra} y 5^{ta} armónica no producen frecuencias de resonancias cercanas a frecuencias de corrientes de armónicas existentes.
- La conexión de solamente el filtro de 7^{ma}

armónica es sin embargo una condición operativa que debe evitarse, debido a que produce una resonancia del sistema para la quinta armónica y dado que estas existen en la red analizada, se agravarían las distorsiones actualmente existentes.

- Se observa que, especialmente para el caso con todos los filtros conectados, se reduce substancialmente el factor de distorsión, tanto en la tensión como en la corriente.
- Como consecuencia de esto, también se reducen los factores de sobrecarga de transformadores y capacitores.
- La instalación de banco de capacitores, sin embargo, no trae aparejado una reducción de la distorsión armónica, y no resulta beneficioso por lo tanto en este aspecto.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] "Estudios de Armónicas con el ATP: Harmonic Frequency Scan", Orlando P. Hevia, Revista iberoamericana del ATP, No.4 Año 1999.
- [2] "Análisis armónico con el ATP: Harmonic Frequency Scan", Gabor Furst, Revista iberoamericana del ATP, No.2 Año 1998.
- [3] "Modeling and Analysis Guidelines for Slow Transients. Part II: Controller Interactions; Harmonics Interactions", Slow transients Task Force of the IEEE WG, IEEE TPD, No.3, July 1996
- [4] "Converter Engineering", Gottfried Moltgen, (Siemens), Ed. John Wiley and Sons
- [5] "Power Electronic Converter Harmonics", Derek A. Paice, IEEE Press.

Anexo I

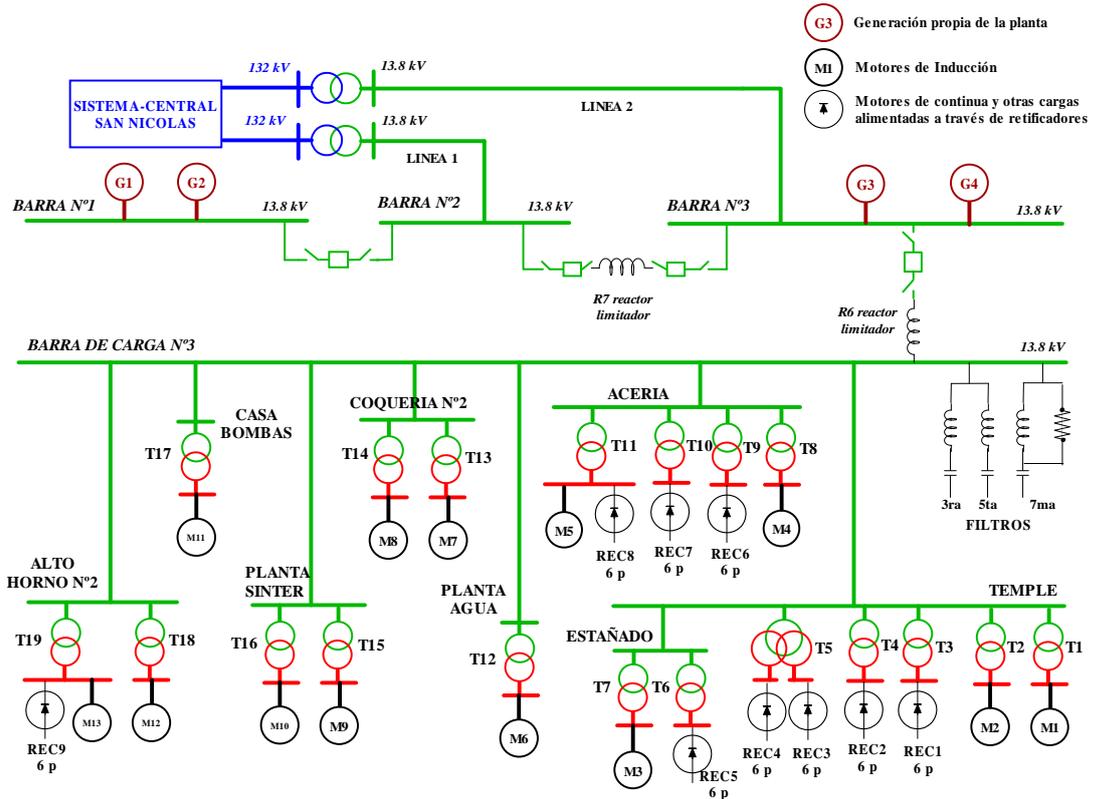


Figura A1. Diagrama unifilar simplificado de la red a modelar.

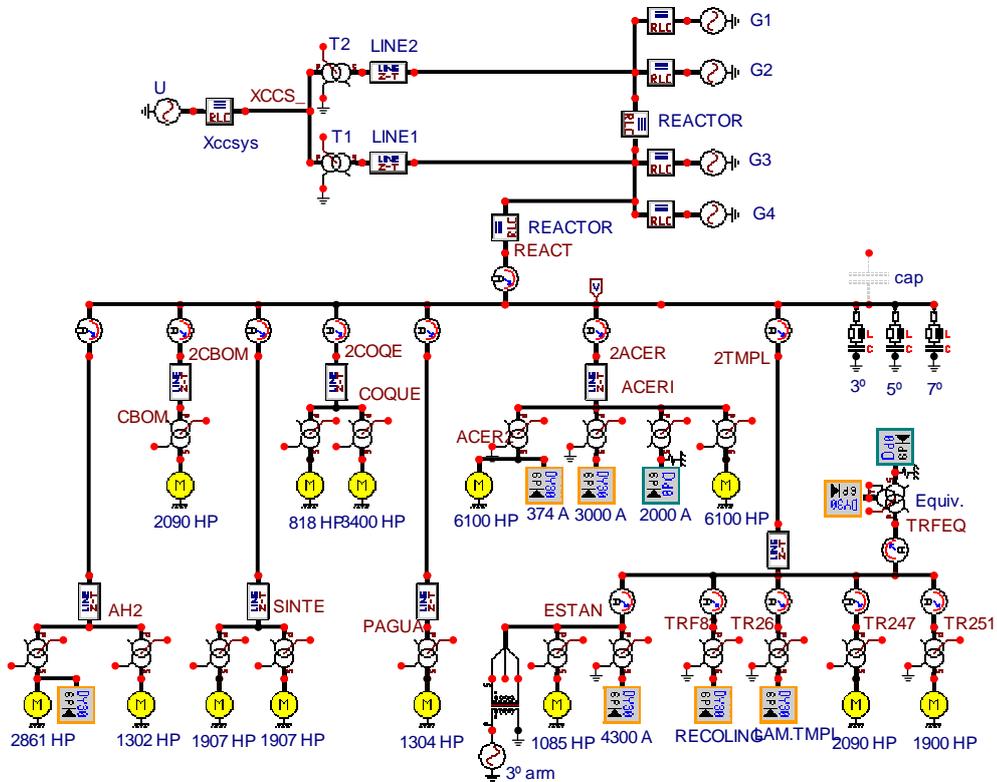


Figura A2. Modelo construido con el ATP.