

Los Dimmers y la Compatibilidad Electromagnética

Gonzalo Casaravilla

gcp@fing.edu.uy

IIE - Universidad de la República

Abstract—Este trabajo aborda el problema que supone, en cuanto a la emisión de armónicos, el uso de lámparas incandescentes dimerizadas de en base a tiristores. Se analiza para un caso particular de un sistema de iluminación de un teatro el diseño de una alternativa de filtrado intentando cumplir con la normativa internacional de referencia. Se propone una alternativa mixta en la que se utiliza un transformador adecuado que elimina explícitamente las corrientes homopolares y algunos armónicos específicos (similar al conexionado de 12 pulsos) y el uso de un Filtro Activos Shunt controlado Selectivamente como para hacer cumplir la reglamentación estrictamente en la medida de lo necesario.

I. INTRODUCCIÓN

Los Dimmers son convertidores que utilizan semiconductores con el objeto de regular el flujo lumínico emitido por lámparas en aplicaciones de iluminación domiciliaria o comercial. La versión más primitiva de los mismos y que más abunda en las instalaciones convencionales consiste en un triac o en aplicaciones de mayor porte un par de tiristores conectados en antiparalelo. La Fig. 1 muestra la forma de corriente de un dimmer que alimenta una lámpara incandescente¹. La Fig. 2 muestra como varía el valor eficaz de la tensión sobre la lámpara incandescente dimerizada al variar el ángulo de disparo de los semiconductores. Por ejemplo para un ángulo de 90° como el de la Fig. 1 se tiene una tensión eficaz de 70 %, un flujo lumínico de 25 % y se consume la mitad de la potencia respecto a los valores nominales de la lámpara [1]. Sin embargo basta intentar escuchar una radio de AM en las cercanías de una lámpara así dimerizada para percibir que existe un problema de compatibilidad electromagnética (*EMC*). Por una parte se producen flancos de tensión que emiten en el espectro de la radio frecuencia. Por otro lado, la corriente consumida por los dimmers está fuertemente distorsionada. En la Fig. 3 se puede apreciar cómo para diferentes ángulos de disparo de los tiristores del dimmer se consumen corrientes armónicas que superan los valores máximos establecidos por la norma internacional "IEC61000 – 3 – 2(2001). Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)"[2]. Cada asterisco (*) indica que para la pareja (armónico, ángulo) no cumple con la norma. Prácticamente se puede asegurar que para el caso de tener una lámpara que consume nominalmente 16 A, la posibilidad de dimerizado cumpliendo la reglamentación es prácticamente imposible.

¹Se descarta por inaceptable el caso de que se utilice un dimerizado asimétrico con un solo tiristor ya que trae como consecuencia, además de consumir armónicos pares (en particular 100 Hz), el consumo de corriente con valor de continua no nulo.

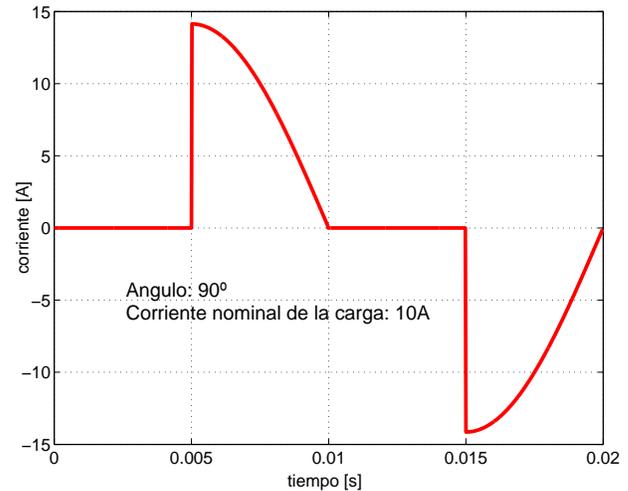


Fig. 1. Corriente consumida por un dimmer.

II. CASO ESTUDIADO

Ante este problema de armónicos surgen varias alternativas para evitarlo o para corregirlo. Supóngase el caso que se estudia en este trabajo de un teatro que ya cuenta con un sistema de iluminación. El mismo consta de 10 kW de lámparas incandescentes conectadas en estrella, equilibradas y dimerizadas por fase tal como muestra la Fig. 4. La tensión de línea es de 0.4 kV y las lámparas son de 0.23 kV conectadas entre fase y neutro. La corriente nominal resultante es de 14.5 A. En este caso, el sistema de dimerizado ya existe y se busca la forma de filtrar los armónicos para cumplir con la norma *IEC* ya referida.

En lo que sigue se asumirá una carga nominal de 16 A a los efectos de llevar la situación al extremo que plantea la norma (la norma especifica valores absolutos de corriente en Amperios a no ser superados para cada frecuencia armónica).

La Fig. 5 muestra los armónicos de corriente producidos y los límites variando el ángulo de disparo de los tiristores. En la misma se aprecia claramente la razón por la que en la norma *IEC* se plantea ensayar los equipos destinados a iluminación dimerizada con un ángulo de 90° . Se observa que el principal problema es el armónico 3. Este armónico 3 (y sus múltiplos) son la viva expresión de las consecuencias del creciente uso de este tipo de tecnologías (categoría en la que caen por ejemplo las fuentes conmutadas de cada *PC*, televisor, electrodomésticos, etc.), que han provocado

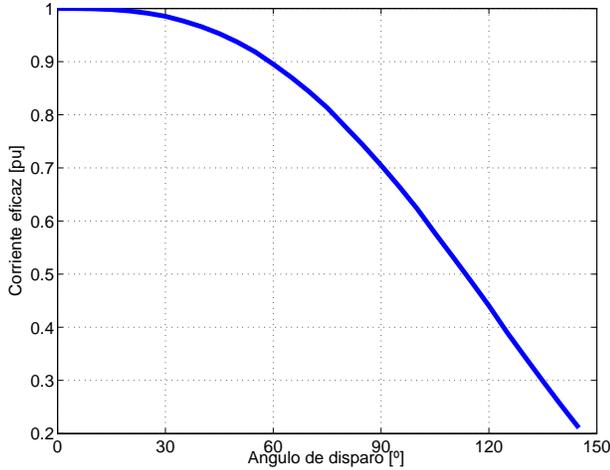


Fig. 2. Tensión eficaz en la lámpara.

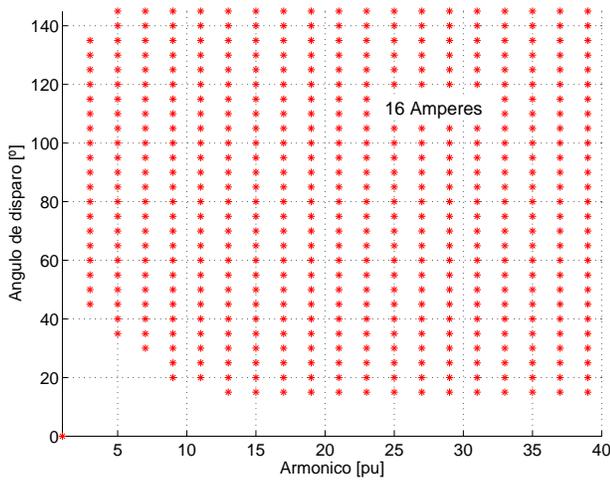


Fig. 3. Mapa de no cumplimiento de la norma IEC

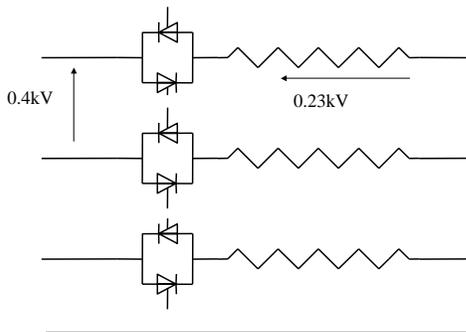


Fig. 4. Dimmer trifásico en estrella equilibrada.

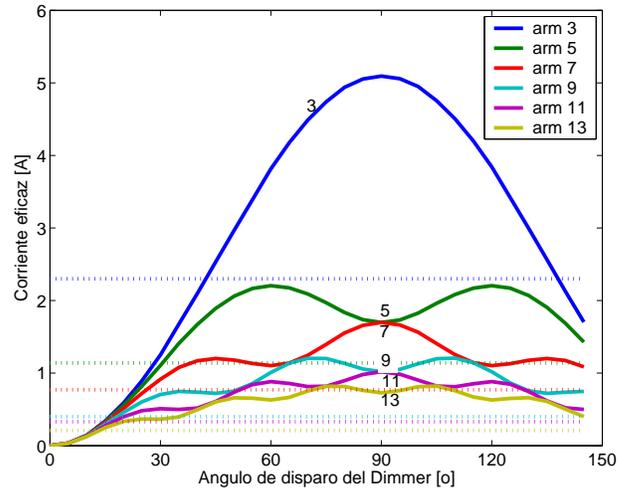


Fig. 5. Armónicos emitidos por un dimmer y límite IEC.

la necesidad de redimensionar los conductores neutros de las instalaciones eléctricas. Por ejemplo en el handbook de la IES [1] se recomienda duplicar la sección del conductor neutro de la instalación respecto al conductor de las fases.

Para los armónicos múltiplos de 3, por su condición de homopolares, no es razonable intentar en primera instancia filtrarlos mediante filtros pasivos o activos. Por ejemplo bastaría con conectar en el punto de conexión del sistema estudiado un transformador $Yz5^2$ (o cualquiera de sus variantes horarias) para hacerlos desaparecer. En este trabajo se asume que se adopta esta solución por lo que resta analizar que se hace con el resto de los armónicos que presentan problemas de EMC.

III. FILTRADO ACTIVO SELECTIVO

Si se tiene como objetivo filtrar sólo el mínimo imprescindible como para cumplir la norma IEC, se debe descartar el uso de filtros pasivos shunt puros ya que no permiten modular la acción de filtrado. Otra alternativa es el uso de Filtros Activos Shunt o Filtros Activos Shunt Híbridos (activo/pasivo). En este trabajo se utilizará un Filtro Activo Shunt tal como se muestra en la Fig. 6 pero podría también ser una alternativa igualmente válida la Híbrida. En el caso de que la compensación de reactiva fuese realizada en el punto de conexión del dimmer, sería mandatorio el uso de una alternativa híbrida ya que seguramente sobrevendrían problemas de resonancias armónicas entre la capacidad de la compensación y la impedancia de cortocircuito en el punto de conexión del dimmer.

El Filtro Activo se puede controlar usando una metodología que filtre en forma, si bien modulada, indiscriminada respecto a los armónicos. En [3] se analiza este tipo de filtrado y en [4] se muestra que si se desea minimizar el tamaño del filtro activo y cumplir con las reglamentaciones, la opción más adecuada es usar una estrategia de control selectiva usando por ejemplo

²Para este cometido también puede servir un transformador Dy pero se producirá en el circuito magnético flujo homopolar.

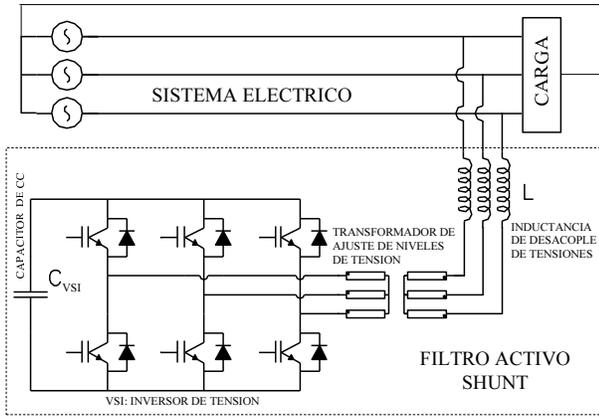


Fig. 6. Filtro Activo Shunt.

'Celdas Básicas de Filtrado Selectivas: *SFBC*' [5]. Se adopta el esquema de control más sencillo en el que se mide y se compensa la corriente distorsionada con el filtro activo (control feedforward). En este caso se demuestra en [6] que el método de cálculo más adecuado para realizar un filtrado selectivo es el 'Serie' por lo que se utilizará esta alternativa.

IV. ¿CUÁNTO FILTRAR DE CADA ARMÓNICA?

Por una parte ya se ha establecido que no se filtrará ningún múltiplo de 3. Por otra parte se filtrarán selectivamente los armónicos 5, 7, 11 y 13. Armónicos superiores (el primero en consideración que aparece es el 17) serán filtrados con un filtro pasivo.

En [7] se expone la metodología de cálculo optimizada de las diferentes ganancias de cada *SFBC* a los efectos de minimizar el tamaño del filtro activo y cumplir la reglamentación. En este caso particular en el que no está determinada la distorsión armónica total (*THD*), el cálculo se reduce a imponer que para cada secuencia armónica (positiva y negativa) se deba filtrar hasta que en conjunto ambas secuencias (se suma en forma cuadrática) cumplan el valor objetivo. En este procedimiento de optimización está explícitamente establecido que lo que se minimiza es la suma algebraica de los módulos de todas las secuencias armónicas objeto de filtrado.

La Fig. 7 muestra para los armónicos 5, 7, 11 y 13 el valor eficaz de los armónicos al variar el ángulo de disparo y los límites que no hay que superar. Claramente con tan sólo 30° todos los límites son superados. La Fig. 8 muestra las corrientes eficaces que superan el límite asociado a cada armónica. También se muestra en la gráfica la suma algebraica de dichas corrientes que sobrepasan los máximos individuales. Esta suma determina el máximo absoluto que podrá tomar la corriente del filtro activo pero puede suceder que no todos los máximos de las armónicas coincidan en un cierto instante por lo que alcanzaría con un filtro activo de menor corriente. Este máximo se ubica cercano a 90° y determina un valor de pico del orden de $2,75\sqrt{2} = 3,9A$.

En la Fig. 9 se observa en la parte superior la corriente de cada secuencia armónica previo al filtrado, el máximo

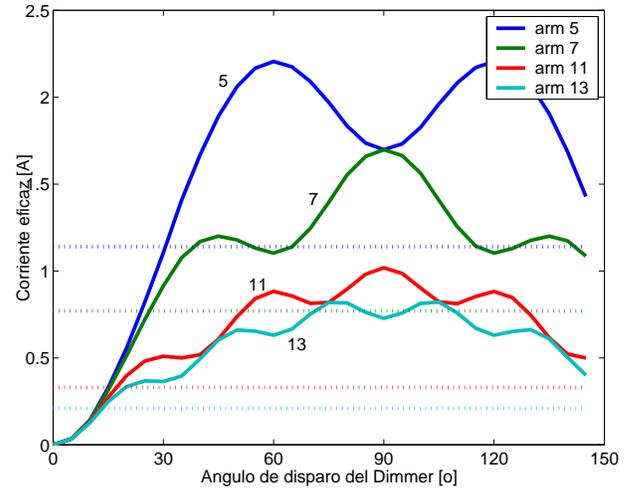


Fig. 7. Corrientes armónicas y límites de interés.

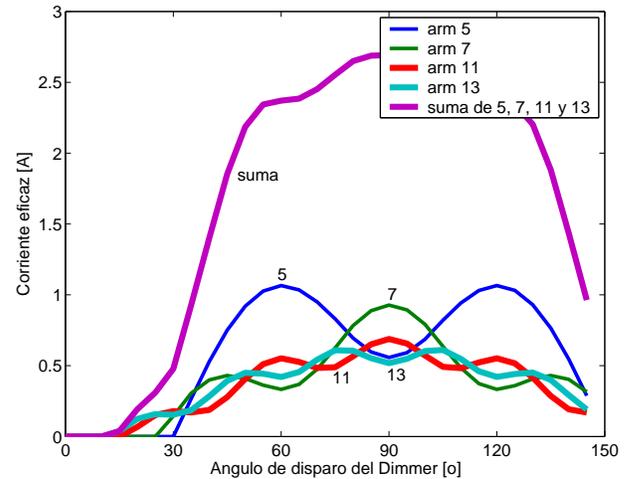


Fig. 8. Corrientes a filtrar.

permitido y el máximo permitido dividido por $\sqrt{2}$. Este último límite es el primer nivel que surge a ser verificado por cada secuencia armónica en el método de optimización ya referido. Si una secuencia armónica está por debajo de este valor, su hermana podrá superarlo ya que luego se deben sumar cuadráticamente para obtener el valor resultante para la armónica en consideración.

Se hace notar que se verifica, como es de esperar en un sistema trifásico con carga equilibrada, que las armónicas 5 y 11 son exclusivamente de secuencia negativa y en las 7 y 13 de secuencia positiva.

Luego en la parte inferior de la Fig. 9 se muestran las ganancias de las diferentes *SFBC*. El procedimiento de cálculo optimizado determina un filtrado de 33% de la secuencia negativa 5, un 55% de la secuencia positiva 7, un 68% de la secuencia negativa 11 y 71% la secuencia positiva 13.

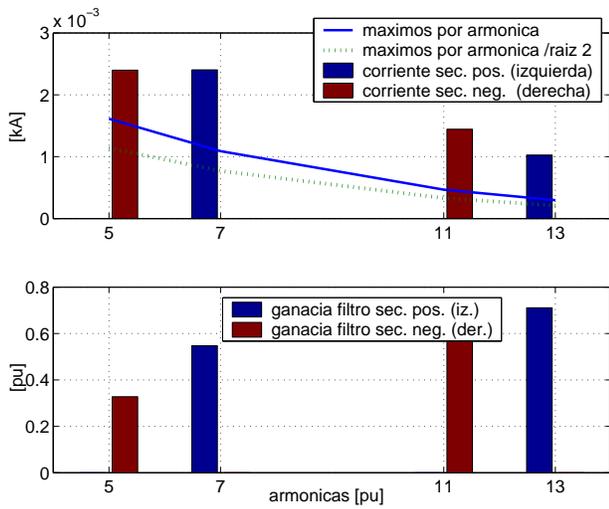


Fig. 9. Espectros original y ganancias óptimas de los SFBC.

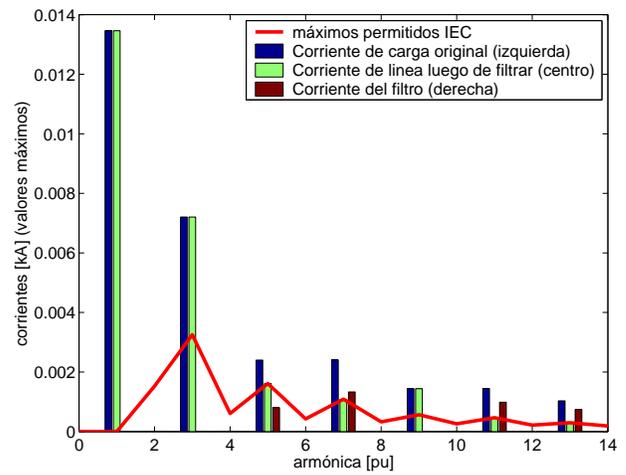


Fig. 11. Espectro antes y después del filtrado.

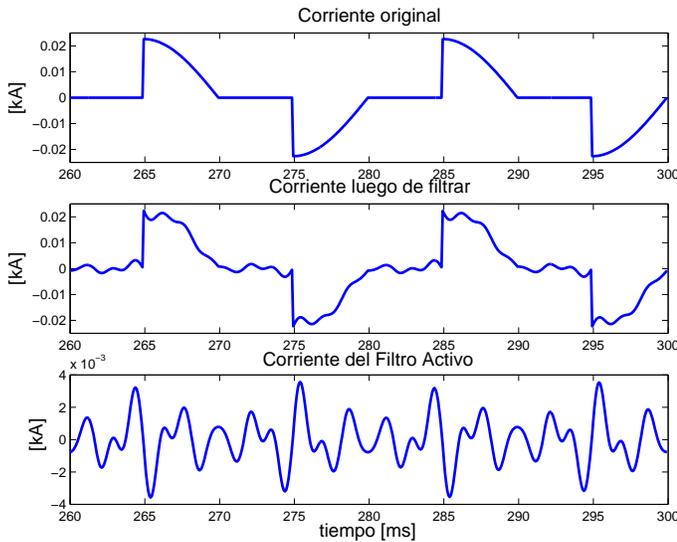


Fig. 10. Corriente de línea antes y después y del Filtro Activo.

V. RESULTADOS Y NUEVAS ALTERNATIVAS

El filtrado determinado en el apartado anterior se simuló y se obtuvo el resultado mostrado en la Fig. 10.

Si bien a pesar del filtrado la corriente de línea sigue teniendo una forma aparentemente similar a la original (incluso se puede suponer que es más distorsionada), en la Fig. 11 se puede ver el espectro de corriente antes y después del filtrado. Se comprueba que no se han alterado el fundamental ni los armónicos múltiplos de 3 pero si se ha llevado a los armónicos 5, 7, 11 y 13 justo por debajo de lo que exige la norma IEC. La corriente final que debe tomar el filtro activo tiene un pico de 3,6A y se verifica que es menor que el máximo 3,9A que se refirieran en el apartado anterior. Si se adopta un valor de tensión del bus de continua del VSI proporcional respecto a la tensión de red al obtenido para el caso estudiado en [4] y se adopta el criterio también establecido en dicho trabajo por

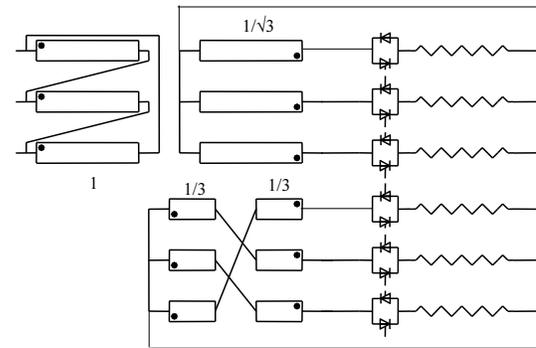


Fig. 12. Elimina armónicos homopolares y $n = 12k + 6 \pm 1$.

el cual la potencia aparente del VSI es aproximadamente el producto de la tensión del bus de continua por la corriente máxima que debe dar el VSI, resulta que en este caso se necesita un VSI de 3,3kVA.

Visto el valor de corriente que deberá tomar el VSI del filtro activo, surge como alternativa utilizando un sistema de 12 pulsos modificado para tener dos secundarios con neutro accesible tal como muestra la Fig. 12. Esta configuración eliminar teóricamente en forma total los armónicos $12k + 6 \pm 1$ con lo cual se elimina el 5, 7, 17, 19,... Esta posibilidad supone partir la carga dimerizada en dos bloques de igual potencia. Si con el filtro selectivo se filtra lo necesario los armónicos 11 y 13, el primer armónico que eventualmente aparece en el espectro es el 23. En este caso el filtro activo se puede conectar a un cuarto bobinado del transformador y será la impedancia de cortocircuito de este arrollamiento la inductancia de desacople del VSI del filtro activo con al sistema eléctrico. En la Fig. 13 se muestra la corriente antes y después y en el filtro activo si sólo se filtran los armónicos 11 y 13. En este caso la corriente final que debe tomar el filtro activo baja a una corriente de pico de 1,8A. Esta corriente y con las hipótesis ya especificadas corresponde a un VSI de 1,6kVA lo cual es menos de la mitad que los 3,3kVA

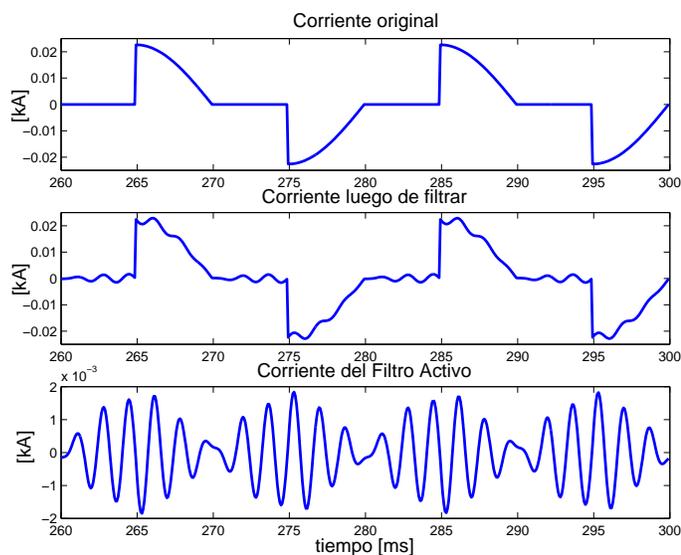


Fig. 13. Corrientes del Filtro sólo filtrando arm. 11 y 13.

de la alternativa anterior. Por una parte ya que de hecho había que instalar un transformador para atender los armónicos homopolares, la dificultad adicional que pueda representar el transformador propuesto claramente es inferior al sobrecosto asociado con el *VSI* en uno y otro caso. Por otra parte los armónicos 5, 7, etc. se eliminan totalmente y no parcialmente por lo que la *THD* final termina siendo menor que en el caso anterior.

VI. CONCLUSIONES

La primer conclusión a la que se arriba es que filtrar las corrientes armónicas de un sistema de dimmerizado de lámparas incandescentes es más que una tarea trivial. En particular el tercer armónico es un problema serio dada su magnitud relativa. Teniendo en cuenta los costos relativos de un Filtro Activo y un transformador que se ocupe de eliminar las corrientes homopolares, esta última opción es la más razonable.

Finalmente se concluye que, a los efectos de cumplir con la normativa referida a emisión armónica, el uso de una alternativa de filtrado mixta es la más conveniente. En la misma deberá existir un transformador adecuado que elimine ciertos armónicos incluidos los homopolares y un Filtro Activo controlado en forma selectiva para atender los armónicos más significativos restantes.

REFERENCES

- [1] *Lighting Handbook: Reference and Applications*. Illuminating Engineering Society of North America, 1993.
- [2] "IEC 61000-3-2," International Electrotechnical Commission, Tech. Rep., 2001, electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current lower than 16A per phase).
- [3] G. Casaravilla, C. Briozzo, and E. H. Watanabe, "Filtro activo de mínimo costo ajustado a la carga de un horno de arco y a las regalamentaciones sobre emisión armónica aplicables," *XIII CBA-Brazilian Conference on Automatic Control*, pp. 1108–1113, 2000, (in spanish).
- [4] G. Casaravilla, "Filtros activos selectivos," Ph.D. dissertation, Universidad de la República - Uruguay, May 2003.
- [5] G. Casaravilla, A. Salvia, C. Briozzo, and E. H. Watanabe, "Control strategies of selective harmonic current shunt active filter," *IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, vol. 149, no. 6, pp. 689–694, Nov. 2002.
- [6] —, "Series and parallel calculations methods for the reference current values in a selective shunt active filter." in *International Symposium on Industrial Electronics of the IEEE*, 2003, iEEE catalog Number 03th8692.
- [7] —, "Selective active filter with optimum remote harmonic distortion control," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 4, pp. 1990–1997, Oct. 2004.