

# Modelo Simulink de lámpara de vapor de sodio de alta presión (Na HID) para dimerizado en baja frecuencia

José Inda, Gonzalo Casaravilla, Gabriel Barbat, Fernando Chiaramello

**Resumen-- Descripción y resultados de un modelo Simulink de lámparas de vapor de sodio, desarrollado para simular la corriente consumida por estas lámparas al ser alimentadas con una tensión sinusoidal de 50/60Hz con armónicos de baja y alta frecuencia, como por ejemplo, una onda recortada por un dimmer. Para determinar los parámetros del modelo, se mide simplemente tensión y corriente sobre la lámpara.**

**Palabras Clave--** Dimmer, Modelo Simulink, Na HID lamp

## I. INTRODUCCIÓN

La corriente consumida por una lámpara de vapor de sodio de alta presión tiene una forma de onda particular que necesita ser caracterizada si se quiere estudiar su consumo de armónicos. Este comportamiento no se puede simular con componentes lineales básicos. Si bien existen modelos para simular el consumo característico de corriente de una lámpara de vapor de sodio de alta presión (o más en general, cualquier lámpara de descarga), la mayor parte de los modelos desarrollados requieren de medidas difíciles de realizar (por ej. presión interna de la lámpara) para determinar los parámetros de simulación posteriores. También se encontraron modelos cuyos parámetros se obtienen mediante medidas más sencillas (midiendo tensiones y corrientes), pero se aplicaban al caso de fuentes sinusoidales [1] [4] o para fuentes de alta frecuencia (para simular un balasto electrónico, por ejemplo) [3], pero no se encontraron modelos que simulen el comportamiento de una de estas lámparas cuando son alimentadas por tensiones con componentes armónicos de relativamente baja frecuencia. Al controlar el flujo de una lámpara con un dimmer de tiristores, la tensión

de alimentación de la lámpara se vuelve una onda sinusoidal recortada, con componentes de Fourier de baja y alta frecuencia. Si se quiere estudiar el consumo de armónicos de corriente de una lámpara de descarga, los modelos recién presentados no sirven. En este trabajo se presenta un modelo Simulink de lámpara de vapor de sodio de alta presión que simula su consumo de corriente cuando es alimentada con una onda de tensión sinusoidal recortada, cuyos parámetros se obtienen midiendo tensión y corriente sobre la lámpara, y que se comporta bien a diferentes niveles de alimentación, con los mismos parámetros.

## II. BREVE DESCRIPCIÓN DE UNA LÁMPARA DE VAPOR DE SODIO DE ALTA PRESIÓN – COMPORTAMIENTO EN CONDICIONES NORMALES

A efectos de limitar la corriente de consumo de una lámpara de descarga cuando se produce el arco, se debe poner en serie con la alimentación, un balasto (inductancia), como se ve en la fig. 1.

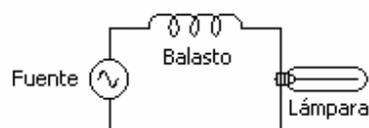


Fig. 1. Circuito de lámpara en funcionamiento con su balasto.

Cuando la lámpara está en funcionamiento con una fuente sinusoidal, la tensión sobre la lámpara y la corriente que circula por ella toman la forma que se ve en la fig. 2.

Las lámparas de descarga no tienen por qué ser alimentadas con una tensión sinusoidal. Los balastos electrónicos alimentan a estas lámparas con una onda cuadrada de alta frecuencia.

En particular, se puede usar un controlador de flujo (dimmer) a tiristores, disminuyendo la tensión eficaz suministrada al recortar la forma de onda, y por lo tanto, disminuyendo el flujo lumínico producido por la lámpara, al mismo tiempo que la potencia consumida.

Financial support should be acknowledged here. Example: This work was supported in part by the U.S. Department of Commerce under Grant BS123.

The paper title should be in uppercase and lowercase letters, not all uppercase.

The name and affiliation (including city and country) of each author must appear on the paper. Full names of authors are preferred in the author line, but are not required. Initials are used in the affiliation footnotes (see below). Put a space between authors' initials. Do not use all uppercase for authors' surnames.

Examples of affiliation footnotes:

J. W. Hagge is with Nebraska Public Power, District Hastings, NE 68902 USA (e-mail: j.hagge@ieec.org).

L. L. Grigsby is with the Department of Electrical Engineering, Auburn University, Auburn, AL 36849 USA (e-mail: l.grigsby@ieec.org).

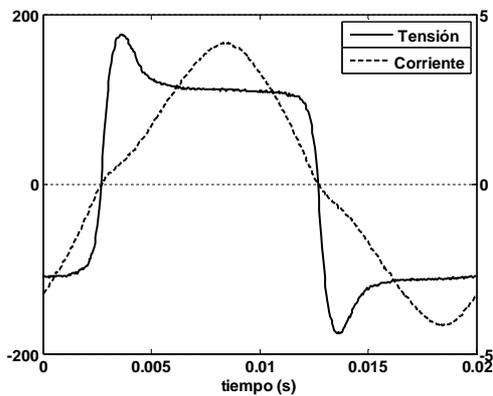


Fig. 2. Corriente y tensión registradas sobre una lámpara de vapor de sodio de alta presión en funcionamiento normal a 50Hz.

Cuando la lámpara es alimentada con un dimmer como se ve en la fig. 3, las curvas de tensión y corriente resultan las que se ven en la fig 4. El objetivo del modelo presentado aquí es que tenga un comportamiento como el descrito.

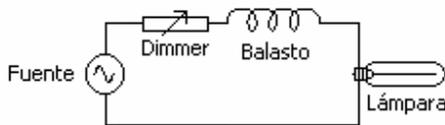


Fig. 3. Lámpara de vapor de sodio de alta presión alimentada con un dimmer.

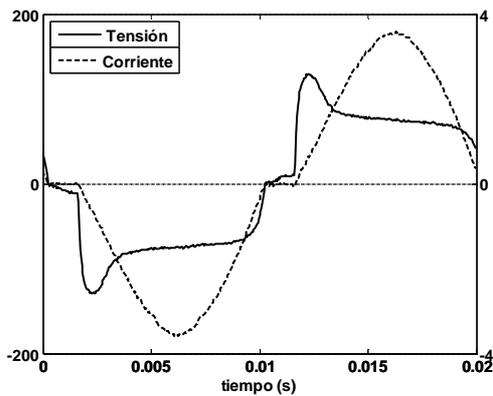


Fig. 4. Tensión y corriente registradas sobre la lámpara alimentada con un dimmer

### III. MODELO

Una versión previa al modelo propuesto en este trabajo es el mostrado la fig. 5.

A la izquierda se encuentra la parte del circuito eléctrico y consta de un amperímetro y una fuente controlable de tensión. La parte de señal del circuito, que se encuentra a la derecha, toma la medida del amperímetro y calcula la tensión que impondrá a la fuente controlable.

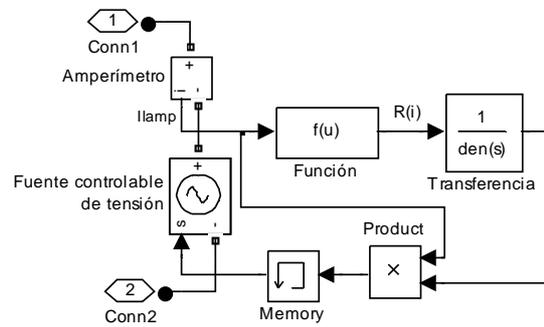


Fig. 5. Circuito de modelo previo

En detalle, la parte de señal calcula una resistencia en función de la corriente

$$R(i) = \min \left( R_{sat}, \frac{V_C}{|i|} \right) \quad (1)$$

donde  $R_{sat}$  y  $V_C$  son parámetros del modelo de la lámpara.

La señal  $R(i)$  pasa por un filtro de transferencia

$$H(s) = \frac{1}{(a \cdot s + 1)^2} \quad (2)$$

para obtener así la “resistencia instantánea” de la lámpara.

Esta señal es multiplicada por la corriente para obtener la señal de tensión que se ingresa a la fuente controlable de tensión.

Este modelo tiene 3 parámetros que afectan su comportamiento:  $V_C$ ,  $R_{sat}$  y  $a$ .

$R_{sat}$  y  $a$  son fijos con lámpara mientras que  $V_C$  depende de la potencia media consumida por la lámpara. A tales efectos se agregó al modelo un bloque que ajusta dicha dependencia. El modelo final propuesto se muestra en la fig. 6.

El bloque que se agregó calcula

$$P = v \cdot i \quad (3)$$

De esta señal se integra el último ciclo (los últimos 20ms/16.7ms) para hallar la potencia media consumida  $P_m$  y se calcula  $V_C$  a partir de  $P_m$  como

$$V_C = A \cdot P_m + B \quad (4)$$

donde  $A$  y  $B$  son parámetros del modelo de la lámpara.

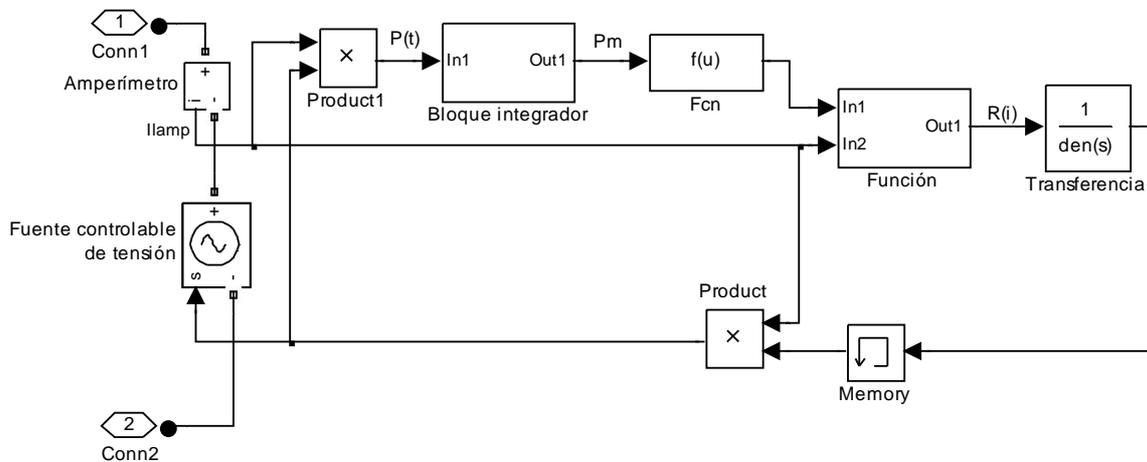


Fig. 6. Circuito del modelo propuesto.

#### IV. JUSTIFICACIÓN DEL MODELO

En primer lugar, este modelo calcula  $v$  en función de  $i$  (y no a la inversa) porque en serie está el balasto, que impone la corriente sobre la lámpara más que su tensión. Esto es lo usual en otros modelos vistos de lámpara.

En segundo lugar, el paso intermedio de calcular  $R(i)$  y pasarlo por una transferencia  $H(s)$  de 2 polos fue lo que mejor funcionó de todo lo que se probó para reproducir el sobretiro de tensión característico asociado con el transitorio establecimiento del arco eléctrico. De todos modos, algunas características favorecieron la elección de esta alternativa.

Si se observan las curvas de tensión y corriente sobre las lámparas, se ve que ambas se anulan al mismo tiempo, lo que representa una carga completamente resistiva (en contraste con cargas inductivas o capacitivas) aunque no necesariamente sea una resistencia constante en el tiempo.

Además, se estudió la resistencia (variable) de la lámpara en función del tiempo, mostrando que es razonable elegir calcular la resistencia instantánea como paso intermedio, y como resultado de una transferencia que imponga algún retardo.

Otras alternativas fueron hacer la resistencia en función de la potencia instantánea  $R(P)$  y pasarlo por una transferencia, similar a como estaba planteado en [3], o calcular la tensión directamente a partir de la corriente  $v(i)$  y pasarlo por una transferencia. También se probaron otras transferencias y se encontró que la transferencia de la ecuación (2) dio los mejores resultados.

Para determinar la función  $R(i)$  se tomó en cuenta que la forma de onda de la tensión es similar a una onda cuadrada, manteniéndose casi constante durante algo menos de medio período, en los momentos en que la corriente toma valores absolutos más grandes. Por lo tanto, se puede decir que para corrientes relativamente grandes se cumple

$$R(i) = \frac{V_C}{|i|} \quad (5)$$

donde  $V_C$  es la tensión sobre la lámpara cuando ésta se mantiene constante.

Sin embargo, cuando la corriente es pequeña, no se cumple (5), haciéndose  $R$  más pequeña.

De esta manera se determinó la ecuación (1). El parámetro  $V_C$  corresponde a tensión mencionada en (5), y  $R_{sat}$  es un valor tope de resistencia en principio arbitrario.

$R(i)$  se pasa entonces por la transferencia que la suaviza y la retrasa produciendo al final la subida que tiene la forma de onda de la tensión cada vez que cambia de signo.

Al comparar el modelo con las diferentes medidas se dedujo que los parámetros  $R_{sat}$  y  $a$  solo dependen de la lámpara y que  $V_C$  también depende de las condiciones de alimentación.

Al comparar las formas de onda de tensión sobre la lámpara en condiciones en que la potencia media consumida  $P_m$  fuera la misma, se observó que  $V_C$  (la parte plana de las mismas) se mantiene similar, y si  $P_m$  cambia,  $V_C$  cambia sensiblemente.

Finalmente, al observar la dependencia de  $V_C$  con  $P_m$  se encontró que se trata de una dependencia lineal del tipo de la ecuación (4).

Comparando las medidas con los resultados de la simulación se ajustaron todos los parámetros y los resultados fueron satisfactorios.

#### V. RESULTADOS

Se hicieron un conjunto de medidas aparte de las que se usaron para determinar el modelo y en todos los casos los resultados fueron satisfactorios. En particular se agregó un capacitor de compensación de reactiva entre la fuente (que tiene cierta impedancia de cortocircuito) y el dimmer como es mostrado en la fig. 7, y se midieron las formas de onda de

tensión y corriente de línea y sobre la lámpara.

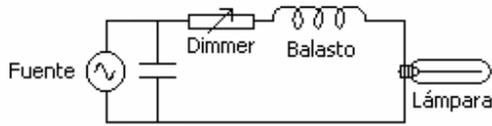


Fig. 7. Circuito con capacitor de compensación de reactiva.

El comportamiento del modelo es mejor en corriente que en tensión, que por otro lado, es donde usualmente se necesita que sea mejor. En la fig. 8 se observa que prácticamente no se perciben diferencias entre la forma de onda de corriente medida y obtenida en la simulación, cuando la fuente es sinusoidal.

En las fig. 10 y 11 se observan las formas de corriente y su contenido armónico, cuando la alimentación es una onda recortada.

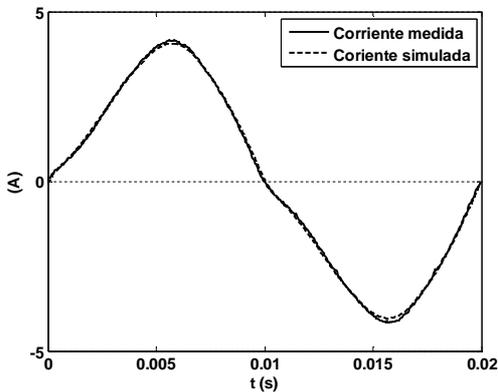


Fig. 8. Corriente sobre la lámpara, medida y simulada con el modelo, para el caso de fuente sinusoidal.

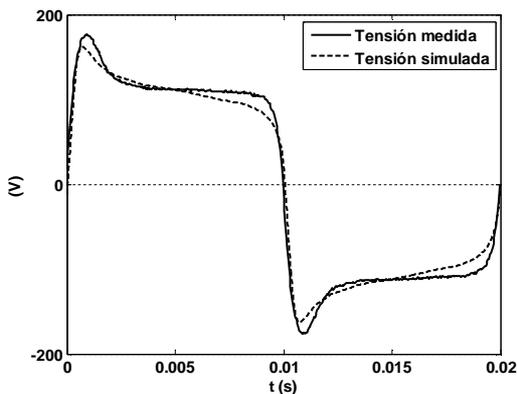


Fig. 9. Tensión sobre la lámpara, medida y simulada con el modelo, para el caso de fuente sinusoidal.

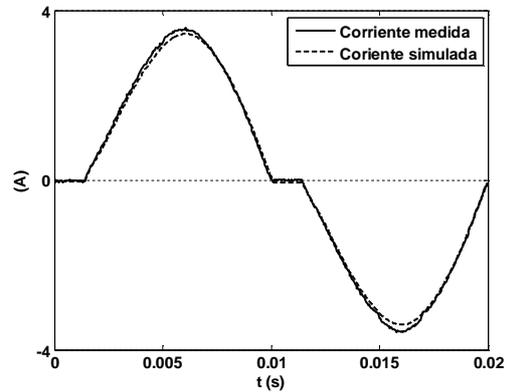


Fig. 10. Corriente sobre la lámpara, medida y simulada con el modelo, para el caso de fuente sinusoidal recortada.

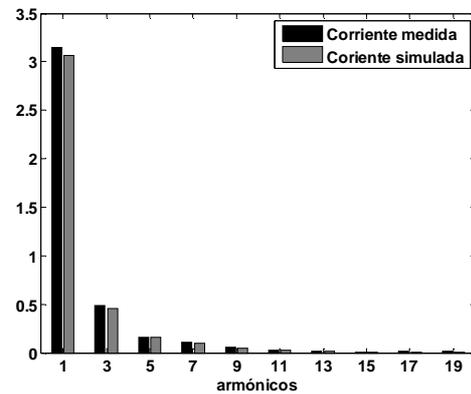


Fig. 11. Armónicos de corriente sobre la lámpara, para el caso de fuente recortada

Cuando se agrega el capacitor de compensación de reactiva, se observa una gran distorsión armónica en la red, debido a que se produce resonancia entre dicho capacitor, y la inductancia de cortocircuito de la red, lo cual es reportado (sin dimmer) en [2]. En el anexo se hacen las cuentas que muestran la dependencia de la frecuencia de resonancia en función de la relación entre la potencia aparente nominal del transformador de distribución de la red, y la potencia aparente de la instalación de lámparas, obteniéndose para este caso una frecuencia de resonancia de 255Hz, muy cercana el armónico 5. Al simular este efecto con el modelo de lámpara presentado aquí, se obtienen también buenos resultados como se ve en las fig. 12, 13 y 14.

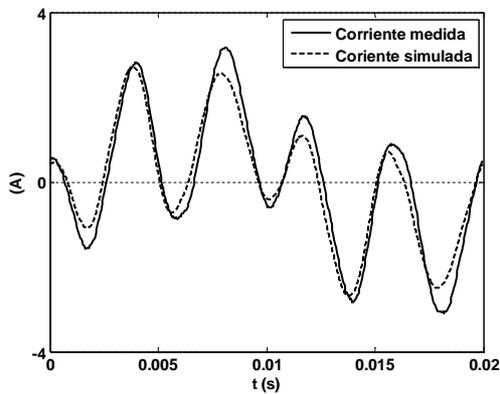


Fig. 12. Corriente sobre la red, medida y simulada con el modelo, para el caso con capacitor de compensación de reactiva.

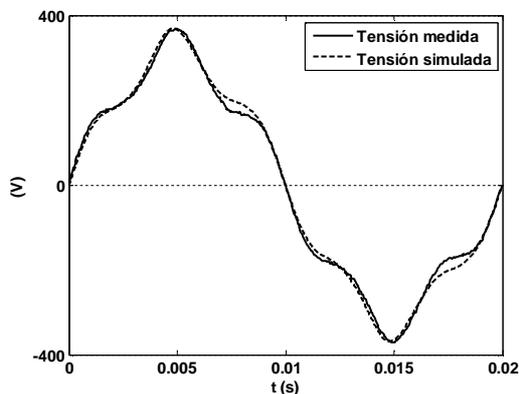


Fig. 13. Tensión de alimentación del conjunto dimmer-balasto-lámpara, medida y simulada con el modelo, para el caso con capacitor de compensación de reactiva.

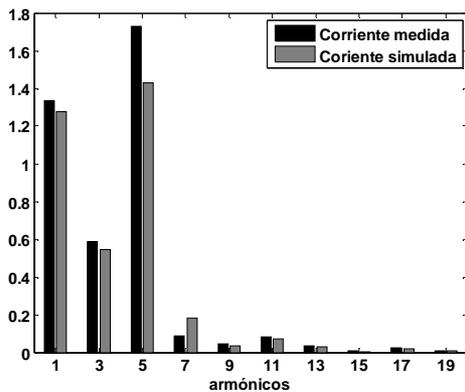


Fig. 14. Armónicos de corriente sobre la red, medida y simulada con el modelo, para el caso con compensación de reactiva.

VI. CONCLUSIÓN

Se determinó un modelo Simulink de lámpara de vapor de sodio de alta presión, con comportamiento satisfactorio cuando la tensión de alimentación es no puramente sinusoidal y tiene armónicos de baja frecuencia.

Si bien existen varios modelos de este tipo de lámparas para simulación, la mayoría o bien no cubren el caso

particular de alimentación recién mencionado, o bien requieren medidas complicadas.

El modelo aquí presentado cubre satisfactoriamente el caso recién mencionado, además de tener la posibilidad de hallar sus parámetros midiendo solamente tensiones y corrientes sobre la lámpara.

VII. APÉNDICE

En una instalación de lámparas de descarga con capacitores de compensación de reactiva se produce un fenómeno de resonancia que amplifica respuestas no lineales de las lámparas. La frecuencia de resonancia depende de los capacitores de compensación de reactiva y la inductancia de cortocircuito del transformador de distribución aguas arriba, que dependen a su vez, de la potencia de la instalación de las lámparas y la potencia nominal del transformador. En este apéndice se encuentra una expresión para dicha dependencia en una instalación típica, y se muestra que la frecuencia de resonancia es menor (y por lo tanto peor) cuando la potencia nominal del transformador es cercana a la potencia aparente de la instalación de lámparas, llegando a ser la frecuencia de resonancia, comparable a la frecuencia fundamental de la red.

La frecuencia de resonancia está dada por la ecuación

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{1}{L \cdot C}} \tag{6}$$

donde  $L$  es la impedancia de cortocircuito del transformador de distribución, y  $C$  es la capacidad de fase de la instalación.

Considerando la componente fundamental de la carga, dada una determinada instalación equilibrada de lámparas, se conoce su potencia de consumo  $P$ , y su potencia aparente  $S$  (y por lo tanto su factor de potencia  $\cos\phi$ ). La potencia  $P$  depende únicamente de las lámparas, mientras que  $S$  también depende de los balastos y los capacitores de compensación de reactiva.

En general, dada una instalación con solamente las lámparas y los balastos, se conoce, al igual que su potencia  $P$ , su potencia aparente  $S_L$  (y por lo tanto su factor de potencia  $\cos\phi_L$ ), y se eligen los capacitores para obtener una  $S$  deseada en el punto de facturación.

La capacidad de fase de la instalación resulta determinada por:

$$C = \frac{Q_L - Q}{\omega \cdot U^2} \tag{7}$$

donde  $Q_L$  es el consumo de potencia reactiva del conjunto balasto lámpara sin compensar,  $Q$  es el consumo de potencia reactiva deseada luego de compensar,  $\omega$  es la frecuencia angular de la red y  $U$  es la tensión nominal de la red (entre fases).

Operando se obtiene

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (8)$$

$$Q_L = \sqrt{S_L^2 - P^2} \quad (9)$$

$$P = S \cdot \cos \varphi \quad (10)$$

De esta forma se obtiene  $C$  en función de  $S$ :

$$C = \frac{S}{\omega U^2} \left( \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi_L} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_L} - \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} \right) \quad (11)$$

Por otro lado, se puede expresar la inductancia de cortocircuito del transformador de distribución en función de su potencia nominal  $S_T$ :

$$L = \frac{U^2}{\omega \cdot S_T} X_{CC} \quad (12)$$

donde  $X_{CC}$  es la impedancia de cortocircuito en p.u.

Finalmente, sustituyendo en la eq. (6) se obtiene

$$\frac{f_r}{f_0} = \sqrt{\frac{S_T}{S} \frac{1}{X_{CC}} \left( \frac{1}{\frac{\cos \varphi}{\cos \varphi_L} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_L} - \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}} \right)} \quad (13)$$

que muestra la relación entre la frecuencia de resonancia de la instalación, la potencia aparente de la misma, y la potencia nominal del transformador de distribución aguas arriba.

En el ensayo de laboratorio, montado con luminarias comunes, el factor de potencia sin compensar resultó

$$\cos \varphi_L = 0,45 \quad (14)$$

Si el factor de potencia compensado deseado es

$$\cos \varphi = 0,92 \quad (15)$$

sustituyendo en (13) se obtiene

$$\frac{f_r}{f_0} = 0,84 \cdot \sqrt{\frac{S_T}{S} \cdot \frac{1}{X_{CC}}} \quad (16)$$

Evaluando este resultado, suponiendo  $X_{CC}$  en valores normales de 5% y 10% se observan las curvas de la fig. 15.

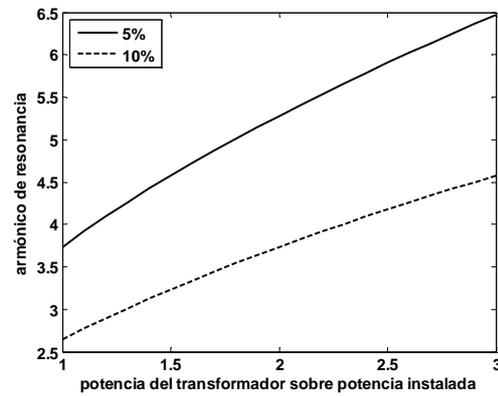


Fig. 15. Frecuencia de resonancia de una instalación de lámparas en función de la potencia aparente consumida y la potencia del transformador de distribución, para dos valores de impedancia de cortocircuito del mismo.

En el ensayo del laboratorio, los valores obtenidos fueron:

$$\cos \varphi_L = 0,45 \quad (17)$$

$$\cos \varphi = 0,85 \quad (18)$$

$$S = 2049 \cdot VA \quad (19)$$

$$S_T = 2500 \cdot VA \quad (20)$$

$$X_{CC} = 5\% \quad (21)$$

$$\frac{f_r}{f_0} = 5,1 \quad (22)$$

### VIII. REFERENCES

- [1] Anton, J.C.; Blanco, C.; Ferrero, F.; Roldan, P.; Zissis, G. Simulation of the dynamic behaviour of HID lamps based on electrical conductance, ; 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society, v.1, p. 462-467, 2002.
- [2] Ettore Bompard, Enrico Carpaneto, Gianfranco Chicco, Paolo Ribaldone and Claudio Vercellino (2001) The Impact of Public Lighting on Voltage Distortion in Low Voltage Distribution Systems, IEEE Transactions on Power Delivery, vol16, no.4, October 2001.
- [3] Mikahil Polonskii, Álysson. R. Seidel, e Rafael A. Eichelberger, (2006). Metodología de simulação empregando o programa Matlab/Simulink Aplicada a Projetos de Reatores Eletrônicos Dimerizáveis, Eletrônica de Potência, vol. 11. nº3. Novembro de 2006
- [4] Wei Yan and S. Y. Ron Hui (2005). A Universal PSpice Model for HID Lamps, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, no.6, November/December 2005