

Acoplamiento de impedancias para la excitación con RF de un láser de CO₂

J. Y. Montiel¹

J. M. de la Rosa²

¹Escuela Superior de Cómputo (ESCOM),
Instituto Politécnico Nacional (IPN),
Unidad Profesional Adolfo López Mateos,
Av. Bátiz s/n, Col. Lindavista, 07738 México, DF.
MÉXICO

²Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI),
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME),
Instituto Politécnico Nacional (IPN).
Unidad Profesional Adolfo López Mateos,
Av. IPN, Col. Lindavista, 07738 México, DF.
MÉXICO

Tel. (1) 5729 6000 ext. 52011
(2) 5729 6000 ext. 54622

email: yalja@ipn.mx
mdelaros@ipn.mx

Recibido el 22 de junio de 2004; aceptado el 31 de enero de 2005.

1. Resumen

Un aspecto importante en la excitación de láseres con radiofrecuencia, es el eficiente acoplamiento de la señal de radiofrecuencia en la cámara de descarga. En este trabajo se presenta el diseño y evaluación de una red eléctrica de acoplamiento PI para la excitación de un láser de CO₂ con una fuente de radiofrecuencia de 445 kHz y 50 ohms de impedancia.

Las mediciones de voltaje y corriente en los diferentes componentes del circuito permiten establecer la localización de las pérdidas de energía en el circuito y la proporción de energía aplicada a la cámara de descarga. La máxima eficiencia del láser considerando la potencia suministrada a la cámara de descarga es de 2% y alcanza apenas el 0.7% al considerar la potencia entregada por la fuente de radiofrecuencia.

2. Abstract (Matching Impedance for Exciting by RF of CO₂ Laser)

A very important aspect in the excitement of laser with radio-frequency is the couple efficient of the signal of radiofrequency in the discharge chamber. In this work is presented the design and evaluation of an PI network for the excitement of a laser of CO₂ with a radiofrequency source of 445 kHz and 50 ohms of impedance.

The measurements of voltage and current in the different components of the circuit allow to establish the localization of the losses of energy in the circuit and the proportion of applied energy to the discharge chamber. The maximum efficiency of the laser considering the power given to the discharge chamber is of 2% and hardly reaches 0.7% when considering the power supplied by the source of radio-frequency.

Palabras clave: acoplamiento de impedancias capacitivo, láser de CO₂, red de acoplamiento de impedancias PI.

3. Introducción

Los láseres de CO₂ en general, poseen potencias de salida óptica media y alta, >1W [1]. El diseño de un sistema láser es variado, y depende del tipo de excitación que tenga. Hay excitación mediante corriente directa, corriente alterna, radiofrecuencia, excitación pulsada y por microondas. Cada tipo de láser tiene sus requerimientos de diseño y construcción [2, 3, 4, 5, 6]. Cuando la excitación es por radiofrecuencia, la fuente posee una impedancia por lo general de 50 ohms. La energía proporcionada por la fuente debe de llegar hasta el medio activo, el cual tiene una impedancia del orden de unidades de miles de ohms. Para acoplar las impedancias se utiliza una red de acoplamiento, ya sea de tipo T, L, PI o mediante un transformador [7]. Este trabajo trata el diseño de un circuito PI para el acoplamiento de impedancias, su construcción y pruebas para un láser de CO₂.

4. Desarrollo

4.1 Sistema láser

La cámara de descarga es el lugar donde se realiza el intercambio de energía entre la fuente de excitación y el medio activo. Esta

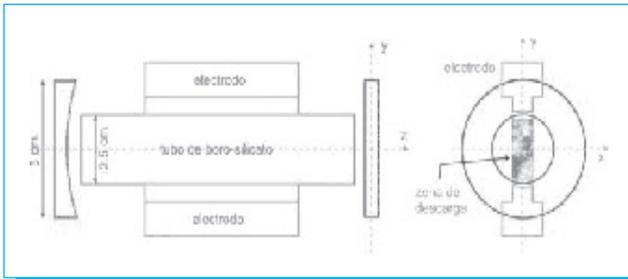


Fig. 1. Cámara de descarga. Electrodo adherido a tubo de boro-silicato y a sus extremos espejos, izquierda. Vista transversal de la cámara de descarga, zona de descarga en el medio activo es aproximadamente rectangular, derecha.

cámara consta de un tubo de boro-silicato con diámetro exterior de 2.5 cm, un espesor de pared de 1.5 mm y una longitud de 28 centímetros. Mediante pegamento cerámico *Wale Bond 15-1483* se adhieren electrodos externos de aluminio a la superficie del tubo. Ambos electrodos se encuentran paralelos entre sí, teniéndose una configuración transversal con respecto al eje del tubo de boro-silicato. Los electrodos tienen enfriamiento mediante agua a 16°C, figura 1.

La fuente de radiofrecuencia es de marca COMDEL CLF 5000/PLL con una frecuencia de operación de 400 ± 50 kHz y una impedancia de salida de 50 ohms.

Inicialmente se desconoce la impedancia de carga, aunque se sabe por la literatura que en operación láser tiene un valor superior a los 500 ohms para cámaras de descarga similares a la construida para este trabajo [8]. En este proyecto se elige una red de acoplamiento de tipo PI, debido a que ésta permite el acoplamiento tanto de impedancias mayores o menores, de la descarga respecto al generador de radiofrecuencia.

4.2 Red de acoplamiento

La cámara de descarga posee una impedancia que depende de la presión de la mezcla gaseosa, la separación entre electrodos, el espesor del tubo de boro-silicato, y el ancho y longitud de los electrodos [8].

La impedancia de la cámara de descarga puede encontrarse mediante pruebas de descarga a diferentes presiones del medio activo. Debido a que inicialmente esta impedancia se desconoce, se propone con fines de diseño el valor de $Z_{RL} = 63.5 - j784$ que propone B. Walter bajo condiciones similares, pero para frecuencia de operación de 10 MHz [9].

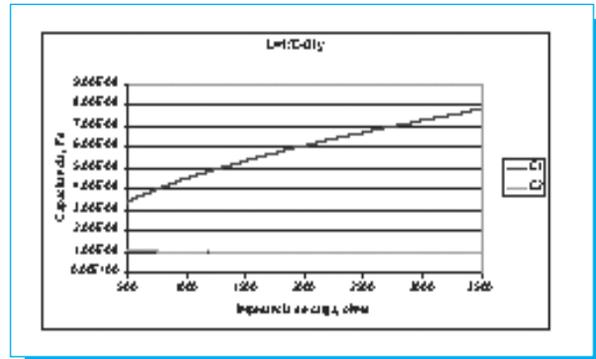


Fig. 2. Valores de capacitancia para C_1 y C_2 .

Los valores de los elementos que componen la red de acoplamiento están dados por [9]:

$$C_2 = \frac{1}{\omega^2 \cdot L} \left[1 + \sqrt{\frac{R_0}{R_L} \cdot \left(1 - \frac{\omega^2 \cdot L^2}{R_0 \cdot R_L} \right)} \right] \quad (1)$$

$$C_1 = \frac{\omega^3 \cdot L \cdot C_2^2 + \frac{\omega \cdot L}{R_L^2} - \omega \cdot C_2}{\omega \cdot \left[\left(1 - \omega^2 \cdot L \cdot C_2 \right)^2 + \left(\frac{\omega \cdot L}{R_L} \right)^2 \right]} \quad (2)$$

Con la condición para el inductor de

$$L < \sqrt{\frac{R_0 \cdot R_L}{\omega^2}} \quad (3)$$

Donde R_L es la impedancia de carga, R_0 es la impedancia de la fuente de alimentación, L es el inductor, así C_1 y C_2 son los capacitores de la red PI, ω es la frecuencia angular.

Debido a cuestiones dimensionales de construcción, la inductancia se fija a un valor de 15 μ Hy, con lo cual se obtiene la gráfica de la figura 2. Para la impedancia de carga calculada de 786.56 ohms, se tiene que $C_1 = 40.6$ nF y $C_2 = 10.38$ nF.

Mediante el diagrama eléctrico de la figura 3 se analizan las corrientes y voltajes para obtener la potencia consumida en el circuito y tener referencias teóricas de la distribución de energía proporcionada por la fuente de radiofrecuencia y la eficiencia

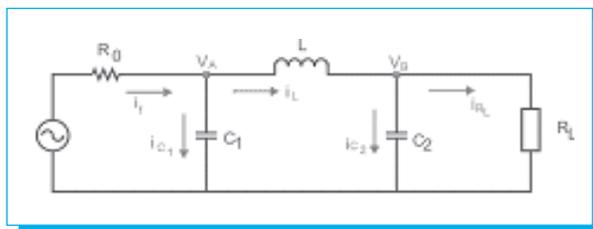


Fig. 3. Diagrama eléctrico de sistema láser y convección de dirección de corrientes.

del sistema láser. Donde i con subíndice f, L, R_L, C_1 y C_2 , es la corriente eléctrica suministrada por la fuente de alimentación, en el inductor, en la carga, y en los capacitores 1 y 2, respectivamente. V_A es el voltaje suministrado por la fuente de alimentación y V_B es el voltaje proporcionado a la carga.

Con análisis de corrientes por nodos se tiene que

$$i_f = i_L + i_{C_1} \quad (4)$$

$$i_f = i_{R_L} + i_{C_2} \quad (5)$$

con

$$i = I_n \cos(\omega \cdot t + \theta_i)$$

$$V = V_n \cos(\omega \cdot t + \theta_v)$$

Se tiene que la potencia promedio se calcula con:

$$P_p = \frac{V_n I_n}{2} \cos(\theta_v - \theta_i) = \frac{I_n^2}{2} \text{Re}(Z) \quad (6)$$

Mientras que la potencia reactiva se estima con:

$$Q_r = \frac{V_n I_n}{2} \text{sen}(\theta_v - \theta_i) = \frac{I_n^2}{2} \text{Im}(Z) \quad (7)$$

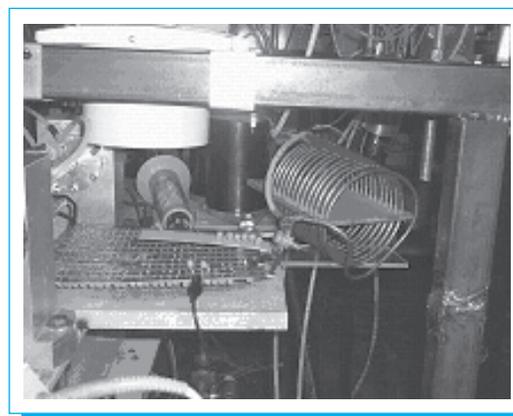
De tal manera que la potencia compleja se expresa mediante [10, 11]

$$S_c = P_p + jQ_r \quad (8)$$

4.3 Construcción

Inductor

Para optimizar el factor de calidad o factor de disipación, las dimensiones físicas del inductor deben cumplir con la



Fotografía 1. Red de acoplamiento, inductor y capacitor C_2 .

condición de que su longitud sea aproximadamente igual a su diámetro [12]. Con lo cual se elige una longitud $d_{ind} = 13.5$ cm y un radio $r_{ind} = 6.25$ cm, con lo que se tiene una inductancia de $15.07 \mu\text{Hy}$, L_{ind} .

El inductor se construye con tubo de cobre de 4.5 mm de diámetro externo. Este elemento tiene la necesidad y disposición de conectarse a una red de enfriamiento por agua.

Capacitor

Los valores teóricos requeridos para los capacitores son $C_1 = 40.6$ nF y $C_2 = 10.38$ nF, que deben ser ajustados experimentalmente. La construcción de estos capacitores es por medio de bancos, se utilizan capacitores con dieléctrico de polipropileno *orange drop* de bajas pérdidas de la firma Vishay [13, 14].

El capacitor C_2 se construye con un banco de 9 columnas de capacitores por 28 filas como se muestra en la figura 4. Se utilizan capacitores de 10 nFd, y para ajustar al valor deseado, capacitores de 3.3 nFd y 2.2 nFd. Por las características de estos capacitores, el banco está limitado a un máximo de corriente de $18 A_{rms}$ y voltaje $3\ 800 V_{rms}$. La potencia que consume este banco se manifiesta en forma de calor y es enfriado mediante un ventilador.

Para el capacitor C_1 se utiliza un banco de 2 columnas por 13 filas de capacitores; con valores de 4.7 nFd y 3.3 nFd para ajustar el valor total. Este banco se implementa en paralelo con dos capacitores cerámicos de 30 nFd. Este arreglo permite tener corrientes de hasta $9 A_{rms}$ y voltaje de hasta $890 V_{rms}$. Para ambos capacitores, el banco de elementos se implementa en tablilla de circuito impreso en pistas con espesores de 1.5 cm. La implementación de esta red de acoplamiento se muestra en la fotografía 1.

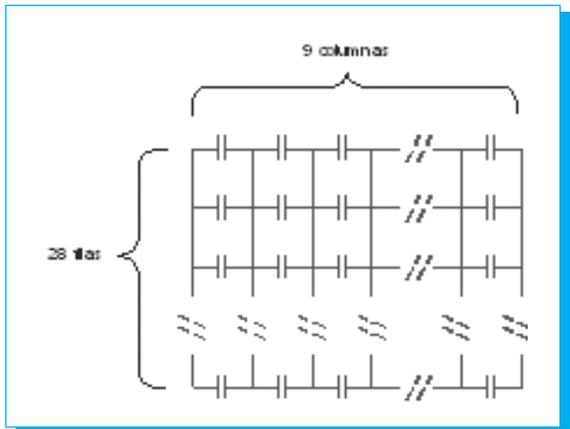
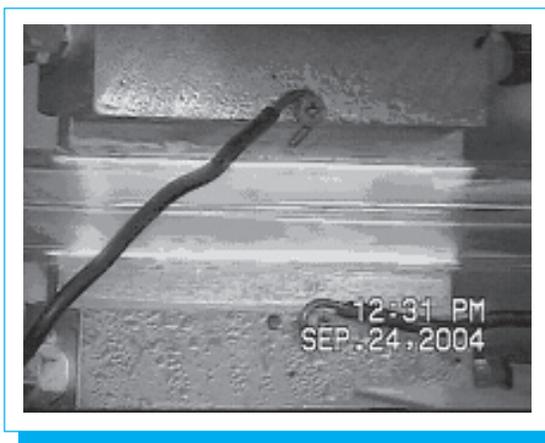


Fig. 4. Banco de capacitores en arreglo serie-paralelo para C_2 .

Los valores de capacitores C_1 y C_2 son ajustados experimentalmente para una presión de mezcla gaseosa de 50 a 70 mbar. En estas mediciones existe descarga de resplandor dentro de la cámara de descarga. A 50 mbar la descarga inicia a potencia suministrada de 200 W, mientras que para 70 mbar inicia a 400 W. Entre menor sea la potencia reflejada, mejor es el acoplamiento del circuito hacia la cámara de descarga.

Los cambios de impedancia predichos entre estado de descarga y no-descarga en la cámara no son considerables. El valor de los elementos a la frecuencia de 445 kHz utilizando un



Fotografía 2. Descarga entre electrodos, con potencia suministrada de 1 kW y voltaje entre electrodos de 6 kVpp.

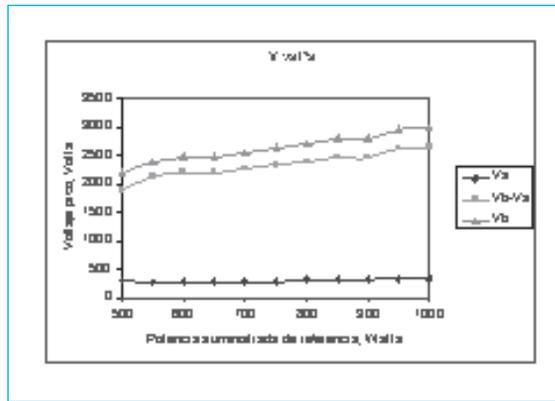


Fig. 5. Voltaje pico en los elementos de la red de acoplamiento.

medidor LCR HP4285A Precision LCR Meter 75 kHz - 30 MHz son:

$$C_1 = 78.79 \text{ nFd}$$

$$C_2 = 9.97 \text{ nFd}$$

$$L = 15.07 \text{ } \mu\text{Hy}$$

4.4 Pruebas experimentales

La fotografía 2 muestra la descarga generada entre electrodos y se observan zonas de alta y baja luminiscencia, zonas γ y α respectivamente.

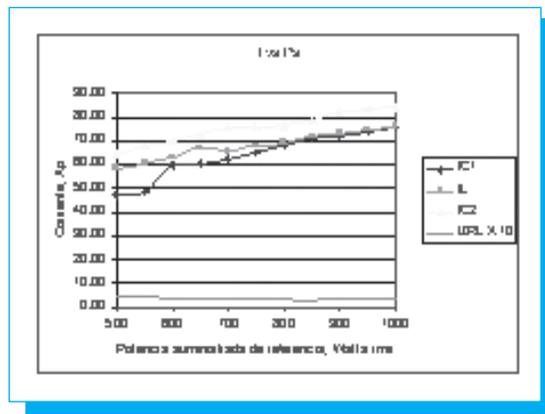


Fig. 6. Corriente pico en los elementos de la red de acoplamiento.

Para mediciones de voltaje se utiliza un osciloscopio *Tektronics* TDS8032 y una punta de alto voltaje *Tektronics* P6015A (0-40 kVp, 0-75 MHz). La corriente es medida mediante una bobina de Rogowsky.

Debido a las altas corrientes a medir se realizan divisores de corriente en el circuito.

La figura 5 muestra el voltaje pico y potencia de referencia suministrada, así como en la figura 6 la corriente pico y la potencia de referencia suministrada al sistema. Teniéndose emisión láser a partir de 600 W de potencia suministrada.

Las mediciones realizadas para una potencia suministrada de referencia rms de 1000 W son:

$$V_a = 346 \text{ Vp}$$

$$V_b = 3\,000 \text{ Vp}$$

$$I_{C_1} = 74.6 \text{ Ap}$$

$$I_{C_2} = 83.5 \text{ Ap}$$

$$I_L = 76 \text{ Ap}$$

$$I_{ZRL} = 0.34 \text{ Ap}$$

Con los ángulos de fase $v-i$ medidos:

$$\Phi_{C_1} = 77^\circ$$

$$\Phi_{C_2} = 89.65^\circ$$

$$\Phi_L = 89.5^\circ$$

$$\Phi_{ZRL} = 213^\circ$$

A esta potencia suministrada se obtiene una potencia óptica de 8.5 W de radiación láser cuando se usa una mezcla de gas de las proporciones 1:10.2:11.5, de CO_2 : N_2 :He respectivamente.

El modelo utilizado para los elementos de la red de acoplamiento es una resistencia real en serie con la reactancia, ya sea capacitiva o inductiva.

Las expresiones que rigen al modelo son:

$$\frac{V_p}{I_p} = X \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{\tan \phi}\right)^2 + 1}$$

Donde V_p es el voltaje pico, I_p corriente pico, X la reactancia del elemento y Φ la fase $v-i$.

La relación entre la parte reactiva y la real de la impedancia del capacitor o inductor está dada por:

$$R = \frac{X}{\tan \phi}$$

Donde R es la resistencia real, X es la reactancia del capacitor o inductor y Φ la fase.

Las impedancias de los elementos del sistema son:

$$Z_{C_1} = 1.04 + j4.53$$

$$Z_{C_2} = 0.21 + j35.87$$

$$Z_L = 9.11 + j42.13$$

$$Z_{RL} = 7202.3 + j4805.6$$

Teniendo potencias complejas:

$$S_{C_1} = 2.8k + j12.6k$$

$$S_{C_2} = 732 + j122k$$

$$S_L = 26k + j121.6k$$

$$S_{ZRL} = 416 + j277.7$$

5. Conclusiones

La cámara de descarga de tipo transversal de un sistema láser posee una impedancia que depende de la presión del medio activo, su composición y la separación entre electrodos. El tubo de vidrio actúa como un dieléctrico contribuyendo a la impedancia total con una impedancia reactiva, por otro lado, el medio activo proporciona una contribución con impedancia real.

Existen varios modelos teóricos válidos para la configuración utilizada en este trabajo. Pero para conocer la impedancia compleja se deben de realizar pruebas de descarga.

Esta impedancia es uno de los principales problemas del diseño de una red de acoplamiento para un sistema láser.

Mediante pruebas experimentales se encuentran los valores de los elementos de la red, que son válidos únicamente para la

frecuencia de operación. Las condiciones para estos valores se basan en el mismo banco de capacitores con las tolerancias de los elementos que le componen, los cables de conexión utilizados, la frecuencia de operación y respuesta de los elementos de la red.

Los valores de voltaje utilizados para obtener radiación láser son del orden de unidades de kV, mientras que para operaciones a baja frecuencia, estos voltajes se incrementan. Los ángulos de fase medidos proporcionan el orden de potencia disipada en cada elemento. Las potencias disipadas calculadas son erróneas tanto para C_1 y L , puesto que sus valores son más grandes que la potencia que se suministra al sistema (1 000 W para el caso mostrado en este trabajo). Las potencias calculadas tanto para C_2 como para Z_{RL} son menores a la potencia suministrada y aparentemente son coherentes con las condiciones que se tienen.

La potencia disipada depende en gran medida de la resistencia real del elemento analizado y a su vez del ángulo de fase medido. La medición de los ángulos de fase debido a que fueron obtenidos del osciloscopio, dependen fuertemente de la apreciación de ésta.

Por ejemplo, para el caso del inductor, si la medición de la fase fuese cercana a 90° , dígase 89.9° , su resistencia real del elemento se reduce a $R_L = 0.073$ ohms, con lo cual a la corriente medida de 76 Ap se tiene una potencia disipada de 210 W. Este cálculo indica que las mediciones tienen un error aproximado de hasta 13° .

Lo anterior expuesto muestra que es necesario tener una etapa de medición de fase que proporcione datos con un error pequeño, y así poder afirmar donde se pierde la potencia que se suministra al sistema, ya que de los 1 000 W, únicamente llegan 416 W a la cámara de descarga.

Considerando que se tiene una potencia óptica de 8.5 W, la eficiencia de la cámara de descarga es del 2%. Teniendo en cuenta que para los láseres de este tipo de descarga, su eficiencia máxima se encuentra en 13%.

6. Referencias

- [1] T. G. Roberts; G. J. Hutcheson. High power N_2 - CO_2 -He laser development, *IEEE Journal of Quantum Electronics*; vol QE-3, No. 11, pp. 605-609, November 1967.
- [2] Zang Yongpei, Yang Heyi, *A practical power supplied for fast axial flow CO_2 laser*, *SPIE International Conference on Optoelectronics Science and Engineering'90*, vol 1230; pp.445-447, 1990.
- [3] V. S. Golubev, F. V. Lebedev; Stability of the emission from fase-flow gas discharge industrial CO_2 laser (review), *Sov. J. Quantum Electron*, vol. 15; No. 4, pp.437-442, April 1985.
- [4] J. Y. Montiel, *Láser de CO_2 de alta potencia para procesado de materiales*, SEPI-ESIME-IPN, 2000.
- [5] Pio Burlamachii, Francesco Congui, High homogeneity gain distribution in a cross flow AC excited CO_2 laser; *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 26, No. 3, pp. 570-574, March 1990.
- [6] H. J. Baker, I. Laidler, Electrical characterization of pulsed and cw fast axial flow RF excited CO_2 lasers, *SPIE High-Power Gas Lasers*, vol. 1225, pp.349-356, 1990.
- [7] Bowick, Chris, *RF circuit design*, Howard W Sams, 1982.
- [8] Yongho Kim, Min Suk Cha, Wan-Ho Shin, Young-Hoon Song, Characteristics of dielectric barrier Glow Discharges with a low-frequency generator in nitrogen; *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 43, No. 5, pp. 732-727, 2003.
- [9] B. Walter, *Impedance matching of rrf-excited CO_2 lasers*, *SPIE High Power CO_2 Laser Systems and Applications*, vol. 1020, pp. 57-67, 1988.
- [10] Sun, Hongbo, D. C. Yu, Q. Zheng, AC power flow transmission networks, *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 2000, vol.3, pp. 1715-1720, 2000.
- [11] Fetea, R; A. Petronianu, Can the reactive power be used, *International Power System Technology Proceedings*, vol. 3, pp. 1251-1255, 2000.
- [12] I. T. Wallace, N. H. Kutkut, S. Bhattacharya, D. M. Divan; D. W. Novotny, Inductor design for high power applications with broad spectrum excitation, *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, vol. 2, pp. 1057-1063, 1995.
- [13] J. F. Peggs; Phillip W. Powell; Thomas Grebe; Innovations for protection and control of high voltage capacitor banks on the virginia power system; *Proceedings of the 1994 IEEE Power Engineering Society*, pp. 284-290, 1994.
- [14] <http://www.vishay.com/docs/42018/715p.pdf>, on line, Vishay Inc. Doc. 42018, pp. 47-52, marzo 2005.