

## Fundamentos teóricos de la optimización de la electrónica de medición para experimentos con técnicas fotopiroeléctricas

R. Ivanov, I. Moreno  
*Facultad de Física de la UAZ*  
*Av. Preparatoria 301, Frac. Progreso, 98060. Zacatecas, Zac.*

G. Gutiérrez-Juárez, M. Vargas-Luna  
*IFUG*  
*A. P. E-143, 37150, León, Gto.*

J. L. Pichardo-Molina  
*CIO*  
*A.C. Loma del Bosque 115, Col. Lomas del Campestre, 37150. León, Gto.*  
 (Recibido: 17 de junio de 2005; Aceptado: 23 de agosto de 2005)

Al planear un experimento con la técnica fotopiroeléctrica, se deben encontrar los parámetros adecuados del equipo de medición para evitar la distorsión de la amplitud y la fase de la señal. En este trabajo se presentan los fundamentos teóricos para la optimización de los parámetros del equipo electrónico de medición en ambos modos de medición: de voltaje y de corriente. Aplicando las leyes de Kirchhoff a la electrónica de medición se pueden encontrar los valores óptimos de los componentes electrónicos, que permiten que el régimen de medición esté cerca del ideal. Se muestran resultados experimentales que concuerdan bien con la teoría.

*Palabras clave:* Error relativo; Fotopiroeléctrico; Preamplificador; Radiación modulada

When planning an experiment with the photopyroelectric technique, is necessary to find the correct parameters of the measurement equipment in order to avoid the distortion of the signal in both amplitude and phase. In this work, we present theoretical fundaments for the optimization of the parameters of the electronic equipment of measurement in both measurement ways: voltage and current. Applying the laws of Kirchhoff to the measurement electronics we found the optimum values of the electronic components, that allow the measurement regime be near the ideal. Experimental results appear to agree well with the theory.

*Keywords:* Relative error; Photopyroelectric; Preamplifier; Modulated radiation

### 1. Introducción

El método fotopiroeléctrico ha permitido determinar las propiedades térmicas y ópticas de materiales sólidos y líquidos [1-3]. Existen dos configuraciones diferentes para la realización de un experimento fotopiroeléctrico de contacto: la configuración fotopiroeléctrica inversa (BPPE) [4] y la configuración fotopiroeléctrica directa (FPPE) [5]. En la técnica BPPE el estímulo proviene del calentamiento directo del piroeléctrico debido a la radiación modulada incidente, donde además el piroeléctrico también actúa como sensor. En el caso de la técnica FPPE, es la muestra la que se calienta, mientras que el piroeléctrico solo sensa las variaciones de temperatura de la muestra. Con cada técnica se pueden realizar mediciones en dos regímenes: modo de voltaje y modo de corriente [6]. En todos los casos la estructura de la electrónica de medición es la misma. En la figura 1 se muestra el diagrama de bloques para la electrónica de medición en experimento fotopiroeléctrico. Los parámetros de la electrónica influyen sobre los resultados experimentales. La mayoría de los autores hacen normalización con materia conocida como muestra, suponiendo, que de este modo se elimina dicha influencia, y por eso no es necesaria la

optimización de la electrónica. Esta idea es solo parcialmente correcta, porque no se toman en cuenta los ruidos que acompañan cada medición. De los parámetros de la electrónica depende drásticamente la amplitud de la señal, y de aquí el valor de la relación “señal/ruido” y respectivamente la incertidumbre de la medición. Debido a este entendimiento incompleto del papel de la electrónica en el proceso de medición hay una gran diferencia entre los equipos de medición de distintos autores. Algunos miden en modo de voltaje con preamplificador de alta resistencia de entrada [7-8], otros sin preamplificador [3],[9-10]. En modo de corriente la mayor parte de los autores realiza sus mediciones con conexión directa piroeléctrico – Lock.in [11-12], otros incluyen convertidor “corriente-voltaje”[13]. Por eso es necesario hacer una investigación precisa de cómo los parámetros de la electrónica influyen sobre las mediciones fototérmicas y dar recomendaciones para su optimización.

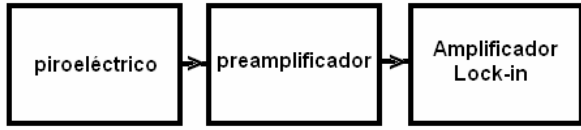


Figura 1. Diagrama de bloques de la electrónica de medición en un experimento fotopiroeléctrico

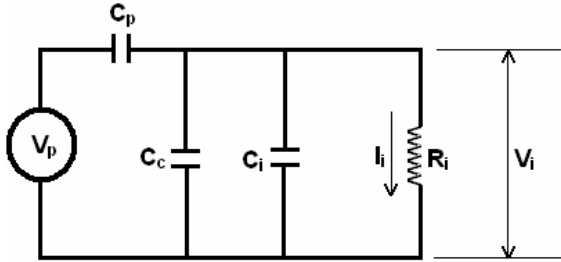


Figura 2. Diagrama equivalente de la electrónica de medición en un experimento fotopiroeléctrico.

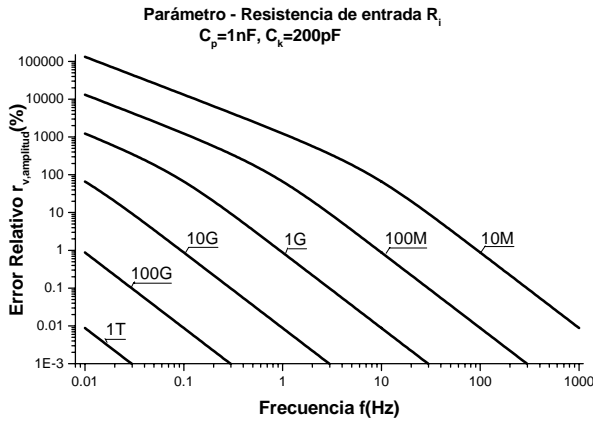


Figura 3. Comportamiento del error relativo, para la amplitud de la señal fotopiroeléctrica en el modo voltaje, en función de la frecuencia de modulación y de la resistencia de entrada del preamplificador.

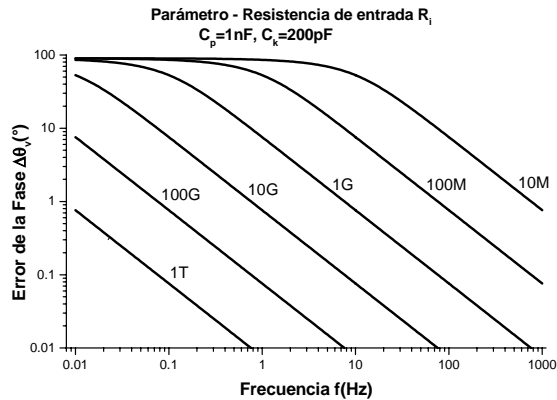


Figura 4. Comportamiento del error de la fase del voltaje medido en modo voltaje como función de la frecuencia y la resistencia de entrada del preamplificador.

## 2. Planteamiento de problema

Para tener una buena calidad de las mediciones es necesario sintonizar los parámetros eléctricos del piroeléctrico, el cable de conexión y la entrada del preamplificador. El diagrama equivalente de esta parte de la electrónica de medición [14] se muestra en la figura 2. En esta figura  $V_p$  es el voltaje generado por el piroeléctrico,  $C_p$  es la capacitancia del sensor piroeléctrico,  $C_c$  y  $C_i$  son las capacitancias del cable de conexión y de la entrada del preamplificador, respectivamente.  $R_i$  es la resistencia de entrada del preamplificador y es el único elemento disipador de

energía eléctrica en el circuito.  $V_i$  es el voltaje de entrada del preamplificador, y representa la caída de voltaje sobre  $R_i$  provocada por la corriente de entrada  $I_i$ . Anotamos  $C_k = C_i + C_c$ . Aplicando las leyes de Kirchof

[14] al circuito eléctrico de la figura 2, obtenemos las siguientes expresiones para la amplitud y la fase del voltaje de entrada  $V_i$  y de la corriente de entrada  $I_i$ :

$$V_{i,max} = R_i \frac{\omega C_p V_p}{\sqrt{(C_p + C_k)^2 \omega^2 R_i^2 + 1}} \quad (1)$$

$$I_{i,max} = \frac{\omega C_p V_p}{\sqrt{(C_p + C_k)^2 \omega^2 R_i^2 + 1}} \quad (2)$$

$$\theta_v = \theta_i = \arctan \left[ \frac{1}{\omega R_i (C_p + C_k)} \right] \quad (3)$$

Dado que el sensor fotopiroeléctrico es un generador de voltaje, la señal que proviene de este en cualquier experimento fotopiroeléctrico se puede obtener de dos modos, modo voltaje, cuando se mide el voltaje  $V_i$ , y modo de corriente, cuando se mide la corriente  $I_i$ . Para trabajar en modo ideal de voltaje, se necesita que  $R_i \rightarrow \infty$ ; para trabajar en modo ideal de corriente, se necesita  $R_i \rightarrow 0$ . En el caso de trabajar en régimen ideal del modo voltaje, la Ec. (1) se reduce a

$$V_{i,max}^{ideal} = V_p \frac{C_p}{C_k + C_p} \quad (4)$$

mientras que la Ec. (3) tiende a cero, es decir,  $\theta_v^{ideal} = 0$ .

Por otro lado, la amplitud ideal, en el modo corriente,  $I_i$ , se puede expresar mediante

$$I_{i,max}^{ideal} = \omega C_p V_p \quad (5)$$

mientras que la fase se aproxima a  $\theta_i^{ideal} = 90^\circ$ .

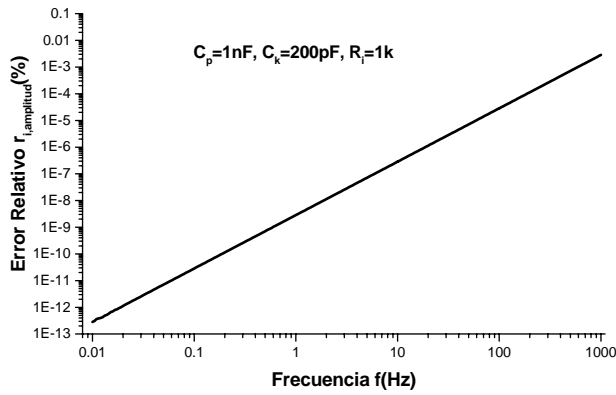


Figura 5. Comportamiento del error relativo de la amplitud de la corriente medida en modo de corriente como función de la frecuencia.

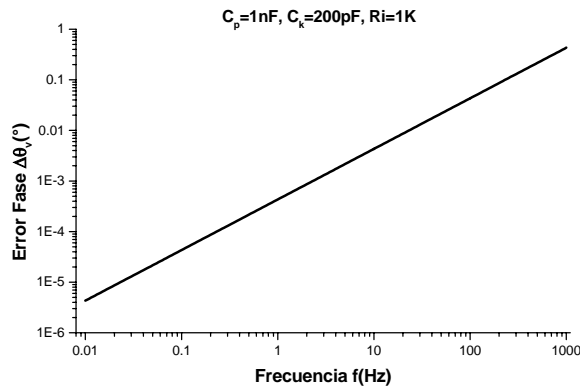


Figura 6. Comportamiento del error de la fase de la corriente medida en modo de corriente como función de la frecuencia.

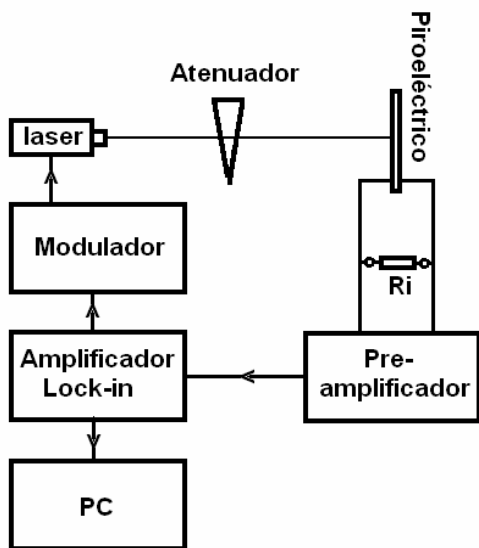


Figura .7. Diagrama de bloques del arreglo experimental.

### 3. Resultados y discusión

En la práctica nunca se puede lograr un régimen ideal. Por eso siempre hay una diferencia entre los valores reales y los valores ideales de las magnitudes eléctricas. Para evaluar esta diferencia definimos los siguientes errores.

a) **Error relativo para la amplitud de la señal fotopiroeléctrica ( $V_i$ ) en el modo de voltaje**

$$r_v = \left| \frac{V_{i,max}^{ideal} - V_{i,max}}{V_{i,max}} \right| \times 100\% = \left| 1 - \frac{\sqrt{(C_p + C_k)^2 \omega^2 R_i^2 + 1}}{\omega(C_k + C_p)R_i} \right| \times 100\% \quad (6)$$

b) **Error en la fase de la señal fotopiroeléctrica ( $\theta_v$ ) en el modo de voltaje**

$$\Delta\theta_v = \theta_v - \theta_v^{ideal} = \theta_v = \arctan \left[ \frac{1}{\omega R_i (C_p + C_k)} \right] \quad (7)$$

c) **Error relativo para la amplitud de la señal fotopiroeléctrica ( $I_i$ ) en el modo corriente**

$$r_i = \left| \frac{I_{i,max}^{ideal} - I_{i,max}}{I_{i,max}} \right| \times 100\% = \left| 1 - \sqrt{(C_p + C_k)^2 \omega^2 R_i^2 + 1} \right| \times 100\% \quad (8)$$

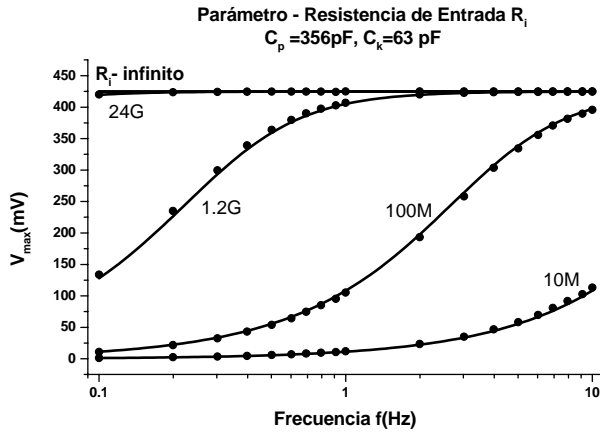
d) **Error en la fase  $\theta_i$  en medición en modo de corriente**

$$\Delta\theta_i = \theta_i^{ideal} - \theta_i = 90^\circ - \theta_i = 90^\circ - \arctan \left[ \frac{1}{\omega R_i (C_p + C_k)} \right] \quad (9)$$

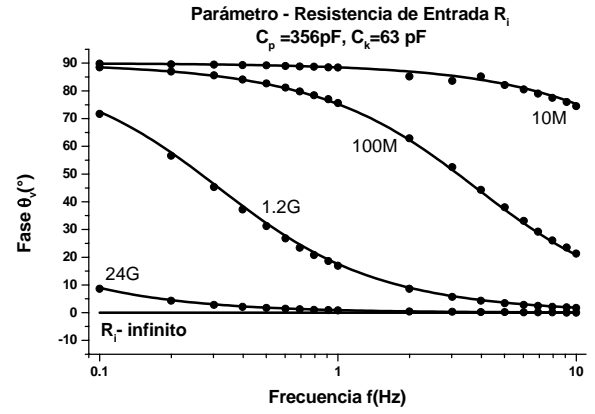
En las figuras 3 y 4 se presentan los errores para la amplitud y fase de la señal fotopiroeléctrica, obtenidos de las Ecs. (6) y (7), respectivamente. Los valores utilizados para la resistencia de entrada al preamplificador,  $R_i$ , fueron  $10M\Omega$ ,  $100M\Omega$ ,  $1G\Omega$ ,  $10G\Omega$ ,  $100G\Omega$  y  $1T\Omega$ . Mientras que los valores para  $C_p$  y  $C_k$ , fueron de  $1nF$  y  $200nF$  respectivamente, los cuales son valores de que usualmente poseen éstas capacitancias en los experimentos.

Como se puede ver en ambas graficas – Fig.3 y Fig.4, tanto el error en la amplitud como en la fase, crece considerablemente para valores de  $R_i$  menores de  $1T\Omega$ . Por otro lado, se puede ver, que es inadecuado conectar el piroeléctrico directamente al amplificador Lock-in. La resistencia de entrada de un Lock-in SR830 o SR850 (Stanford Research Systems) es de  $10M\Omega$ , y los errores  $r_v$  y  $\Delta\theta_v$  tienen valores aceptables ( $r_v < 1\%$  y  $\Delta\theta_v < 5^\circ$ ) solo para frecuencias mayores de  $100Hz$ . Para experimentos fotopiroeléctricos tradicionales, donde se usa un sensor piroeléctrico de PVDF espesor de  $28\mu m$  (Measurement Specialties), esta es una frecuencia muy alta, tomando en cuenta que para frecuencias por arriba de  $25 Hz$  el piroeléctrico ya es térmicamente grueso.

Por eso para optimizar la electrónica de medición en un experimento real que se va a realizar en modo de voltaje, es necesario previamente aplicar cierto procedimiento. De la planeación del experimento ya se conocen el diapasón de frecuencia  $f$ , los valores aproximados de  $C_p$  y  $C_k$  y los



**Figura 8.** Comportamiento experimental de la amplitud de la señal fotopiroeléctrica en el modo voltaje, en función de la frecuencia de modulación y de la resistencia de entrada del preamplificador. Los círculos negros anotan los valores experimentales.



**Figura 9.** Comportamiento experimental de la fase de la señal fotopiroeléctrica en el modo voltaje, en función de la frecuencia de modulación y de la resistencia de entrada del preamplificador. Los círculos negros anotan los valores experimentales.

errores máximos aceptables de la amplitud  $r_{ov}$  y la fase  $\Delta\theta_{ov}$  del voltaje. En tal caso, para el valor mínimo de la frecuencia, se pueden construir las desigualdades:

$$r_{ov} > r_v, \tag{10}$$

$$\Delta\theta_{ov} > \Delta\theta_v, \tag{11}$$

donde  $r_v$  y  $\Delta\theta_v$  están definidas por las Ecs. (6) y (7). De las desigualdades (10) y (11) se despeja  $R_i$  y se busca su valor mínimo -  $R_{i,min}$ , que satisface (10) y (11) simultáneamente. Luego se elige un preamplificador con la resistencia de entrada  $R_i$  mayor que  $R_{i,min}$  y usando este preamplificador se realiza el experimento.

En las figuras 5 y 6 se presentan las graficas de  $r_i$  y  $\Delta\theta_i$  para el circuito de medición, con  $R_i = 1k\Omega$  (lo que equivale a que el sensor piroeléctrico está conectado directamente a un amplificador Lock-in SR830 o SR850 en régimen de medición de corriente, es decir, se eliminó el preamplificador). Las curvas fueron obtenidas de las Ecs. (8) y (9) respectivamente con  $C_p = 1nF$  y  $C_k = 200pF$ . El valor de  $C_k$  corresponde a la suma de las capacitancias de entrada del amplificador Lock-in y del cable coaxial de aproximadamente 1m.

En el régimen de medición de corriente, el amplificador Lock-in tiene una resistencia de entrada del orden de  $R_i = 1k\Omega$ . Como podemos ver en las figuras 5 y 6, los errores son extremadamente pequeños, y es a partir de 1000Hz (que rara vez se usan en los experimentos fotopiroeléctricos) que estos toman valores que deban considerarse. De esto se deduce, que si el experimento se realiza en el modo corriente, no es necesario usar un preamplificador para realizar la detección.

Cabe señalar que, la principal ventaja de trabajar en el modo de medición cercano al ideal, es que la amplitud de la señal útil es máxima, y con esto se mejora considerablemente la relación “señal/ruido”. Las formulas (4) y (5) pueden ayudar en la optimización de los valores

de las capacitancias  $C_p$  y  $C_k$ . Para ello obtengamos la primera derivada de  $V_{i,max}^{ideal}$  con respecto a  $C_k$ , es decir,

$$\frac{\partial V_{i,max}^{ideal}}{\partial C_k} = -\frac{C_p V_p}{(C_k + C_p)^2} < 0. \tag{12}$$

La primera derivada es negativa siempre. Por consiguiente  $V_{i,max}^{ideal}$  tiene un máximo cuando  $C_k = 0$ . En un experimento en el modo voltaje, esta condición no se puede cumplir en la práctica. Sin embargo, si se usan cables de conexión con la mínima longitud, es posible minimizar el valor de  $C_k$ .

En el modo corriente,  $I_{i,max}^{ideal}$  es independiente de  $C_k$ , Ec. (5). Para investigar el comportamiento de la amplitud y fase de la señal fotopiroeléctrica en el modo corriente,  $V_{i,max}^{ideal}$  y  $I_{i,max}^{ideal}$ , cuando varía  $C_p$ , calculamos la primera derivada de estas funciones con respecto a  $C_p$ , así

$$\frac{\partial V_{i,max}^{ideal}}{\partial C_p} = \frac{C_k V_p}{(C_k + C_p)^2} > 0 \tag{13}$$

$$\frac{\partial I_{i,max}^{ideal}}{\partial C_p} = \omega V_p > 0 \tag{14}$$

Las dos derivadas son siempre positivas. Esto significa que los valores máximos para  $V_{i,max}^{ideal}$  y  $I_{i,max}^{ideal}$  se obtiene cuando  $C_p$  es máxima. Para un piroeléctrico con espesor determinado, la máxima  $C_p$  se obtiene mediante maximizar la superficie activa del piroeléctrico, donde la superficie activa es la parte de la superficie del piroeléctrico que participa en la generación de la señal fotopiroeléctrica.

Para verificar la teoría realizamos experimentos con celda piroeléctrica (Fig.7). El amplificador Lock-in SR830

(Stanford Research Systems) sincroniza el modulador por su frecuencia. El modulador elabora pulsos estables de corriente, que alimentan el módulo del láser-diodo MiniLaseCF™ (Pro-Lite Technology). El módulo emite luz modulada infrarroja (785nm, 60mW), que pasa por el atenuador P54-534 (Edmund Optics) y incide sobre el piroeléctrico (grosor 28  $\mu\text{m}$ , Measurement Specialties). La superficie irradiada es negra y absorbe la energía del haz del láser. El piroeléctrico se calienta y genera voltaje. Este voltaje se suministra a un preamplificador con resistencia de entrada  $R_i > 100\text{T}\Omega$ . Hay posibilidad de conectar varias resistencias eléctricas en paralelo con la entrada del preamplificador y con esto cambiar su resistencia de entrada efectiva. Los valores de las resistencias disponibles son:  $10\text{M}\Omega \pm 5\%$ ,  $100\text{M}\Omega \pm 10\%$ ,  $1.2\text{G}\Omega \pm 20\%$ ,  $24\text{G}\Omega \pm 20\%$ . El voltaje de la salida del preamplificador se mide del amplificador Lock-in, que está conectado a una PC para lectura y almacenamiento de los datos.

Los resultados para la amplitud del voltaje medido  $V_{\text{max}}$  y su fase  $\theta_v$  como función de varios valores de la resistencia de entrada del preamplificador, se pueden ver en las Fig.8 y Fig.9. Se realizó una normalización sobre los datos para cada frecuencia, para eliminar la variación de la amplitud y de la fase del voltaje, originada por las propiedades térmicas del piroeléctrico y el aire, que lo rodea. De este modo la variación de los datos con la frecuencia se deben solo a propiedades eléctricas de la electrónica de medición. Hay una concordancia buena entre la teoría y los resultados del experimento. La pequeña diferencia se debe a la falta de posibilidad de medir el valor exacto de resistencias tan grandes. También cierto error acompaña la medición de las capacitancias  $C_p$  y  $C_k$ . El error experimental es igual al radio de los círculos.

#### 4. Conclusiones

En un experimento fotopiroeléctrico en el modo corriente se puede realizar conectando directamente al piroeléctrico con el amplificador Lock-in. Por el contrario, cuando se trabaja en modo de voltaje, siempre se debe conectar un preamplificador con alta impedancia de entrada entre el piroeléctrico y el Lock-in. La resistencia de entrada mínima del preamplificador depende del error aceptable, pero no es necesario que su valor exceda  $1\text{T}\Omega$ . El cable de conexión en un experimento realizado en el modo voltaje debe tener una longitud mínima, mientras que para el modo corriente

dicha longitud no influye sobre los resultados de medición. Para maximizar la amplitud de la señal fotopiroeléctrica en ambos modos de medición (voltaje y corriente), es necesario usar un sensor piroeléctrico con máxima superficie activa.

#### Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente apoyado por CONACyT bajo el convenio SEP-2003- CONACYT-44058.

#### Referencias

- [1] G. Gutiérrez-Juárez, J. L. Pichardo-Molina, L. N. Rocha-Osornio, R. Huerta-Franco, R. Ivanov, B. Huerta-Franco, T. Córdova-Fraga, and M. Vargas-Luna. *J. de Physique IV*, **125**, 729 (2005).
- [2] L. N. Rocha-Osornio, G. Gutiérrez-Juárez, R. Ivanov, J. L. Pichardo-Molina, M. Vargas-Luna, M. R. Huerta-Franco, M. Sosa and P. Palomares. In Proc. VIII Mexican Symposium on Medical Physics. Eds. M. Vargas-Luna, G. Gutiérrez-Juárez, R. Huerta-Franco y S. Márquez-Gamiño. *AIP Conference Proceedings*, **724**, 297(2004).
- [3] D. Dadarlat, and A. Frandas. *Appl. Phys. A*, **56**, 235 (1993).
- [4] M. Chirtoc, and G. Mihailescu. *Phys. Rev. B*, **40**, 9606 (1989).
- [5] S. Horita, T. Saikawa, and H. Konishi, T. Hata. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **32**, 2561 (1993).
- [6] Creus. *Instrumentación Industrial*, 6<sup>ta</sup> edición, Ed: "Alfaomega Marcombo", MEXICO, 2001
- [7] J.A. Balderas-Lopez. *Rev. Mex. de Física*, **49**, 353 (2003).
- [8] H. Confal, A. Mandelis. *Pyroelectric. Ferroelectrics*, **118**, 379 (1991).
- [9] D. Dadarlat, D. Bicanic, H. Visser, F. Mercuri, A. Frandas. *Part I. JAOCS*, **72**, 273 (1995).
- [10] M. Chirtoc, V. Tosa, D. Bicanic, P. Torfs. *The Inverse Photopyroelectric. Ber. Der Bun.-Ges.-Phys. Chem. Chem. Phys.*, **95**, 766 (1991).
- [11] J.A.P. Lima, E. Marin, O. Correa, M.C. da Silva, S.L. Cardoso. *Meas.Sci.Technol.*, **11**, 1522 (2000).
- [12] M. Chirtoc, E.H. Bentefour, J.S. Antoniow, C. Glorieux, J. Thoen. *Current Mode. Rev. Sci. Inst.*, **74**, 648 (2003).
- [13] M.Chirtoc, D.G.B. Arnscheidt, N. Kalevich, J. Pelze. *Opt. Eng.*, **36**, 363 (1997).
- [14] D. E. Johnson, J. L. Hilburn, J. R. Johnson. *Análisis Básico de Circuitos Eléctricos*, (Prentice Hall Hispanoamericana, SA, MEXICO, 1991) p. 26.