

# DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MONITOR DE CORRIENTE PARA UN MULTIPLICADOR DE ELECTRONES CON BASE EN GAS (GEM)

Rabi Soto Camacho, Sergio Vergara Limón y Guy Paic

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias de la Computación, Doctorado en Ingeniería del Lenguaje y del Conocimiento, Puebla, México, [rabi87\\_soto22@hotmail.com](mailto:rabi87_soto22@hotmail.com)

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias de la Electrónica, Puebla, México, [svergara2@hotmail.com](mailto:svergara2@hotmail.com)  
Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias Nucleares, Coyoacán, Ciudad de México, México, [Guy.Paic@cern.ch](mailto:Guy.Paic@cern.ch)

## Resumen

En este trabajo, se describe el diseño de una herramienta útil para el monitoreo de los paneles detectores, conocidos como multiplicadores de electrones a base de gas (GEM), con el propósito de medir el consumo actual de corriente y, de esta forma, conocer la vida útil de los detectores. Para esto, se desarrolla un monitor de corriente (picoamperímetro), el cual es una herramienta útil para medir la corriente eléctrica de un dispositivo, en este caso, el detector GEM que requiere de mediciones muy pequeñas en nano y microamperios. Además, en esta propuesta se tiene contemplado diseñar un *software* para analizar la interacción de los campos electromagnéticos dentro de una guía de ondas que representa las pistas en una placa de circuito impreso utilizando el estudio de la teoría electromagnética en el desarrollo de un simulador, lo cual permitirá analizar los efectos de estos campos en la propagación de las señales que se obtienen y determinar si los datos obtenidos son adecuados para permitir su análisis posterior.

Palabras clave: Interferencias electromagnéticas, monitor de corriente, análisis de EMI

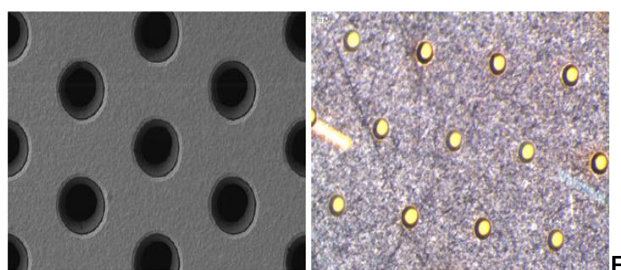
## Abstract

In this paper, the design of a useful tool for monitoring detector panels, known as gas electron multipliers (GEM), is described to measure the existing current consumption and, by doing so, to know the useful life of detectors. To achieve these purposes, a current monitor (picoamperimeter) is developed as it is a useful tool to measure the electrical current of a device such as the GEM detector, which requires very small measurements in nano- and microamperes. In addition, this proposal has considered a software design to analyze the interaction of electromagnetic fields within a waveguide that represents the tracks inside a printed circuit board, using the study of electromagnetic theory for developing a simulator. This will allow analyzing the effects of these fields in the propagation of the signals and determining whether the data are appropriate to allow their subsequent analysis.

Keywords: Electromagnetic interference, current monitor, EMI analysis

## I. INTRODUCCIÓN

Un multiplicador de electrones a base de gas (GEM, por sus siglas en inglés) está hecho de una placa de lámina de Kapton de 50 micras y un revestimiento de cobre con una perforación superficial en cada lado que actúa como un canal de multiplicación de electrones. Cada perforación tiene una estructura bicónica con un diámetro externo de 50 micras y un paso de 140 micras.



ig. 1. Imagen Microscópica de un GEM

Una partícula cargada, o un fotón, que interactúa en el gas de la región de deriva produce una ionización en racimos de iones positivos y electrones. Debido al campo eléctrico aplicado, el grupo de iones positivos de la región de deriva va hacia el cátodo, mientras que el grupo de electrones va hacia los agujeros de la primera lámina del GEM.

Aquí la carga se multiplica y, mientras la carga amplificada hacia el segundo GEM se frustra por un gran porcentaje de los iones positivos producidos en los agujeros, esta es capturada por el electrodo superior del GEM. Así, el canal de multiplicación se libera rápidamente y los grupos de electrones se multiplican. La ganancia es proporcional a la suma de los voltajes del GEM (Fig. 2).

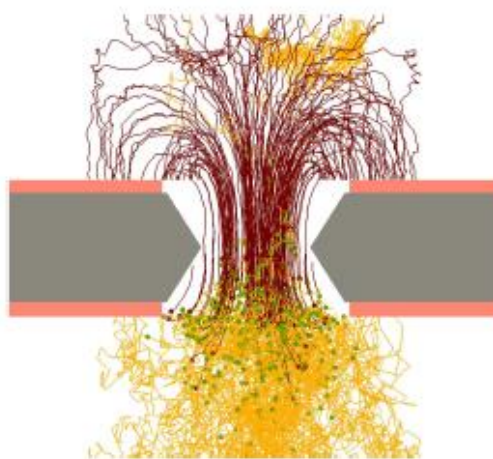


Fig. 2. Funcionamiento de un GEM

Se requiere de dispositivos especializados para llevar a cabo la medición del consumo de corriente de estos detectores. En este documento se propone el desarrollo y la implementación de un monitor de corriente para supervisar este consumo, así como el desarrollo de un *software* para llevar a cabo el análisis de

campos electromagnéticos que se pueden presentar en el monitor.

### A. Medidor de Corriente (Picoamperímetro)

El detector de corriente (picoamperímetro) es un circuito electrónico que sirve para

monitorear cada canal de los GEMs para registrar las variaciones de corriente del detector. El sistema propuesto se muestra en la Figura 3.

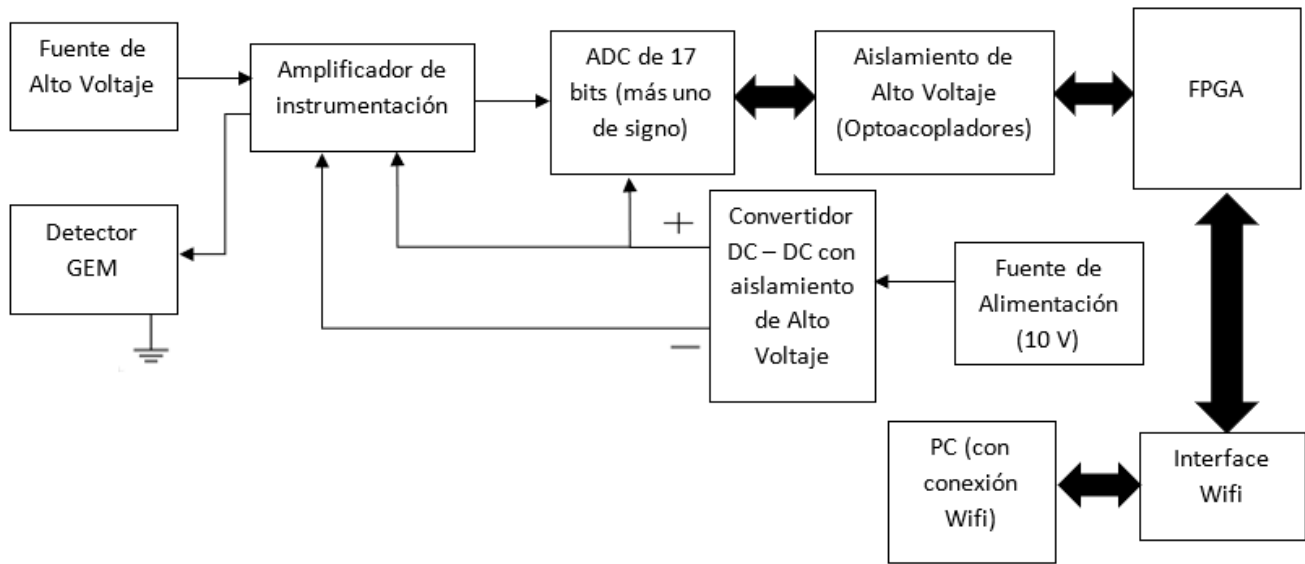


Fig. 3. Diagrama de bloques del monitor de corriente

El sistema se tiene que conectar al alto voltaje y al detector GEM, así que se requiere de conectores de alto voltaje.

Los niveles de voltaje necesarios para utilizar la tarjeta del medidor de corriente se obtienen a partir del uso de un convertidor DC-DC. En este caso, además de acondicionar el voltaje de la tarjeta, este permite aislar las alimentaciones de alto y bajo voltaje. Posteriormente, se utiliza un regulador de

voltaje con la finalidad de acondicionar el voltaje de operación del ADC.

Actualmente, existen algunos tipos de *software* para el análisis de campos electromagnéticos, pero sus costos son muy altos, así que una parte primordial del diseño de esta herramienta es brindar una herramienta de análisis a un costo menor. Por otra parte, al llevar a cabo los experimentos se genera una enorme cantidad de datos, los cuales deben ser procesados para su estudio.

Por consiguiente, el desarrollo de este tema de investigación se centra como primer punto en el desarrollo de un *software* para el análisis de campos electromagnéticos que permitan estudiar los efectos de dichos campos en las señales adquiridas y, así, poder obtener datos adecuados para su análisis. Como segundo punto de este proyecto de investigación, una vez que se realice el análisis y se generen datos adecuados, estos deben ser procesados para estudiar y almacenar aquellos que sean fundamentales.

## II. PROPUESTA A DESARROLLAR

Para desarrollar este tema, a continuación se presenta un diagrama de bloques con la metodología de trabajo a seguir:

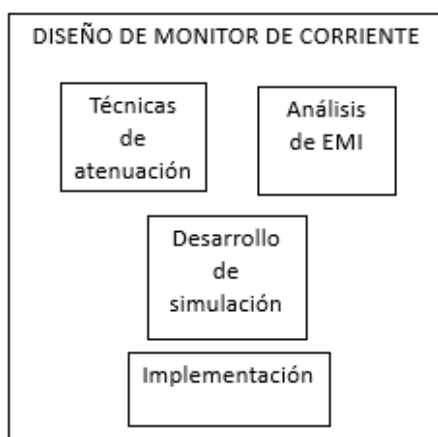


Fig. 4. Diagrama de bloques de la propuesta

En el diagrama anterior se presentan diferentes etapas para el desarrollo del monitor de corriente.

- El estudio de las técnicas para la disminución de interferencias electromagnéticas se realiza para conocer adecuadamente cómo interactúan los campos electromagnéticos dentro de un medio y así atenuarlos para obtener señales deseadas sin ruido.
- El análisis de las interferencias electromagnéticas se realiza para saber cómo se transmiten las señales en diversos medios y cómo se atenúan en estos.
- El diseño del *software* para el análisis de campos electromagnéticos se realiza para determinar cómo estos afectan a las señales y realizar un análisis de ello con el propósito de obtener valores adecuados de señales para su posterior análisis mediante el uso de técnicas de limpieza de datos.
- La instrumentación del monitor de corriente se realiza para visualizar su funcionamiento y observar las interferencias que puedan presentarse

debido a los campos electromagnéticos dentro del circuito y el medio.

#### A. Propagación de Ondas Electromagnéticas

La radiación electromagnética y su propagación están descritas por las ecuaciones de Maxwell con el campo eléctrico perpendicular al magnético. Estas ecuaciones determinan los efectos de transmisión, reflexión, atenuación y dispersión de la onda propagada. Las ecuaciones de Maxwell se muestran en la Tabla 1,

Tabla 1. Ecuaciones de Maxwell

Forma diferencial	Forma Integral	
$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v$	$\oint D \cdot ds = \int_v \rho_v dv$	Ley de Gauss
$\nabla \cdot \vec{B} = 0$	$\oint B \cdot ds = 0$	Ley de Gauss (H)
$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\int_L E \cdot dl = -\frac{\partial}{\partial t} \int_s B \cdot ds$	Ley de Faraday
$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	$\int_L H \cdot dl = \int_s \left( J + \frac{\partial D}{\partial t} \right) \cdot ds$	Ley de Ampere

donde:

$\vec{E}$ = vector de intensidad eléctrica o campo eléctrico [V/m],

$\vec{B}$ = flujo magnético o inducción magnética [ $T = Wb/m^2$ ],

$\vec{H}$ = Vector de intensidad magnética o campo magnético [A/m],

$\vec{J}$  = intensidad de corriente o conducción [ $A/m^2$ ],

$\vec{D}$  = flujo eléctrico o corriente de desplazamiento [ $C/m^2$ ] y

q = carga eléctrica.

Esta descripción implica que la ley de Faraday indica que un campo magnético puede producir una corriente en una trayectoria cerrada si el flujo magnético está variando en el tiempo. En relación con la ley de Lenz, el voltaje inducido por el flujo magnético tiene una polaridad tal que la corriente establecida en una trayectoria cerrada da lugar a un flujo que se opone al cambio de flujo magnético. La Ley de Ampere establece que el campo magnético es generado tanto por la corriente de conducción como por las corrientes de desplazamiento. La primera ecuación de la ley de Gauss establece que el flujo eléctrico que pasa a través de cualquier superficie cerrada es igual a la carga total encerrada en la superficie. La ley de Gauss para el campo magnético establece que las líneas de flujo magnético son cerradas y no terminan en una carga magnética.

La propagación de las ondas electromagnéticas depende de dos factores:

1. De la naturaleza del medio (permitividad o constante dieléctrica, permeabilidad magnética y conductividad).
2. De la frecuencia de onda electromagnética.

El sistema de ecuaciones que relacionan y describen la propagación electromagnética con la naturaleza del medio son:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (1)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2)$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (3)$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (4)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (5)$$

donde se tiene que

$\epsilon$  = permitividad dieléctrica [F/m],

$\mu$  = permeabilidad magnética [H/m],

$\epsilon_0, \mu_0$  corresponden a los valores del vacío,

$\epsilon_r, \mu_r$  corresponden a los valores relativos al medio y

$\sigma$  = conductividad eléctrica [S/m=1/ $\Omega$ m].

La permitividad dieléctrica es una medida del grado de resistencia del medio a un flujo de carga y se determina por la relación entre el desplazamiento eléctrico y la intensidad del campo que lo produce.

La permeabilidad magnética es la habilidad de un medio para dar paso a las líneas del campo magnético y se determina por

la relación entre la inducción magnética y el campo magnético externo.

### *B. Interferencias Electromagnéticas en Circuitos Electrónicos*

Las interferencias electromagnéticas (EMI, por sus siglas en inglés) se pueden definir como señales electromagnéticas que perturban (no intencionalmente), el funcionamiento normal de un sistema eléctrico o electrónico.

Los tipos de interferencia, métodos de medida y límites tolerados están especificados por normas internacionales y se establecen en función de la banda de frecuencia de interferencias.

- Perturbaciones de baja frecuencia: ( $f < 10$  KHz), emitidas por la red y las fuentes de alimentación.
- Perturbaciones de banda de 10 a 150 KHz, emitidas por impulsos de intensidad, fenómenos transitorios de tensión, interruptores, etc.
- Perturbaciones de banda de 150 KHz a 30 MHz, emitidas por impulsos de intensidad, fenómenos transitorios de tensión e interruptores; la propagación es causada por radiación y acoplamiento.

- Perturbaciones de banda de 30 MHz a 300 MHz, debidas a propagación por radiación.
- Perturbaciones de banda de 500 MHz a 18 GHz, debidas a propagación por radiación y suelen aparecer en los equipos de comunicaciones o los circuitos lógicos de conmutación.

Una EMI se puede entender como la presencia de voltaje o corriente no deseada que puede aparecer en un equipo como resultado de la operación de otro aparato o fenómeno natural.

El acoplamiento entre sistemas consiste en la interacción y la perturbación de un equipo en función de otro. Los métodos de acoplamiento son:

- Conducción (corriente eléctrica).
- Acoplamiento inductivo (campo magnético).
- Acoplamiento capacitivo (Campo eléctrico).
- Radiación (Campo electromagnético).

La interferencia puede ser radiada o conducida. Cuando el ruido se origina en una fuente o viaja a través del aire, se llama radiación EMI. Cuando el ruido conducido viaja a través de un conductor, como una línea de

energía, este puede haber sido radiado, depositado en las líneas y entonces conducido.

El ruido en las líneas es el más común y las fuentes que las causan son múltiples, por ejemplo:

- Interrupción de carga.
- Transmisión de estaciones de comunicación.
- Puesta a tierra pobre o nula de los equipos.
- Descargas atmosféricas (rayos).
- Operaciones de equipo pesado.
- Motores eléctricos funcionando cerca del equipo electrónico sensible.

Se realizarán las pruebas pertinentes del sistema diseñado para poder obtener los datos de manera adecuada y que sirvan para su estudio posterior.

### III. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

Al realizar el monitoreo del consumo de corriente de manera continua se puede conocer la degradación del GEM, puesto que en condiciones iniciales este tiene un consumo de corriente específico y, mientras más consumo de corriente se visualice, más se sabrá cuan degradado está el material.

Es posible realizar el diseño y la implementación de un dispositivo tal que permita monitorear el consumo de corriente

en nanoamperios utilizando técnicas de atenuación de interferencias electromagnéticas con la finalidad de determinar si se está monitoreando ruido o una señal definida.

Al conocer las técnicas y teorías sobre la atenuación de interferencias electromagnéticas es posible desarrollar una herramienta de *software* útil que permita conocer el grado de atenuación de las interferencias.

## Referencias

Tiago Sergio Santos Rodrigues de Araujo. (2016). Gas Electron Multiplier. 10 de agosto de 2017. Disponible en el sitio de Internet del CERN: <https://kt.cern/technologies/gas-electron-multiplier>

Reitz, Milford, Christy. Fundamentos de la teoría electromagnética (Tercera edición). Editorial Addison Wesley.

Robert Resnick. Physics Vol. 2 (Tercera edición). Editorial, Continental S.A. de C.V. México.

M. A. Félix, D. Salazar, J. A. Valenzuela, H. Márquez. (2005). Análisis de propagación de campos electromagnéticos en guías de onda por medio un método para barrido de parámetro. V SOMI Congreso de

La detección de fenómenos de tipo electromagnético permitirá mejorar el avance tecnológico en el diseño de circuitos impresos, puesto que al tener una herramienta que permita conocer la atenuación de interferencias electromagnéticas se puede evitar que se tengan que volver a fabricar los circuitos por fallas en el medio.

Instrumentación, XVIII, 1-11. 23 de septiembre de 2017. Disponible en: [ftp://www.ece.buap.mx/pub/Secretaria\\_Academica/ACADEMIA/ASISTENCIA%20A%20EVENTOS%20ACAD%C9MICOS%20Y%20PERMISOS%20TEMPORALES/CONGRESO%20SOMI%20XVIII/PDF/Microondas/71.pdf](ftp://www.ece.buap.mx/pub/Secretaria_Academica/ACADEMIA/ASISTENCIA%20A%20EVENTOS%20ACAD%C9MICOS%20Y%20PERMISOS%20TEMPORALES/CONGRESO%20SOMI%20XVIII/PDF/Microondas/71.pdf) Base de datos

Sekhar Chattopadhyay. (1999). Generation of magnetic and electric field measurement and its analysis. Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility, 2, 219-224. 18 de agosto de 2017. Recuperado de: INCEMIC-99 Base de datos.

Chengyuan Wang, Youping Chen, Gang Zhang, Zude Zhou. (2007). Design of Printed-Circuit Board Rogowski Coil for Highly



Accurate Current Measurement. 19 de agosto de 2017. Recuperado de: International Conference on Mechatronics and Automation. Disponible en el sitio de Internet: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4304180/>

Toshiro Sato, Takashi Matsunaga, Hideki Maeda, Masahide Watanabe. (2012). Application Examples of Electromagnetic Field Analysis at Fujitsu. 17 de agosto de 2017. Recuperado de: FUJITSU Sci. Tech. Disponible en el sitio de Internet: <https://www.fujitsu.com/global/documents/about/resources/publications/fstj/archives/vol48-4/paper15.pdf>

Hyun Ho Park, Hyun-Tae Jang y Hark-Byeong Park. (2011). Simulation and Design of a PCB-Chassis System for Reducing Radiated Emissions. ACES JOURNAL, 26, 679-687.

Guy de Burgh. (Noviembre de 2004). Making EMI Analysis Part of the Design Process. 21 de septiembre de 2017. Recuperado de: COTS Journal. Disponible en el sitio de Internet: <http://archive.cotsjournalonline.com/articles/view/100226>

Shiqiang Gao, Ze Zhang y Ruirui Bo. (2015). Research on the magnetic property of high-speed PCB design. 18 de agosto de 2017. Recuperado de: Journal of Chemical and

Pharmaceutical Research. Disponible en el sitio de Internet: <http://www.jocpr.com/articles/research-on-the-magnetic-property-of-highspeed-pcb-design.pdf>

Hank Zumbahlen (editor). (2008). Printed Circuit-Board Design Issues. Consulta en Linear Circuit Design Handbook (1201-1297). E.E.U.U.: I.E.E.E.

Héctor Antillanca Espina, Gerardo Cerda Neumann. (2012). Propuesta Metodológica para el Desarrollo de *Software* de Investigación. 26 de diciembre de 2017. Recuperado de: Universidad de Santiago de Chile. Disponible en el sitio de Internet: <http://sitios.diinf.usach.cl/kddp/files/2012/10/Paper-Propuesta-de-M%C3%A9todo-para-Sw-de-Investigaci%C3%B3n-Infonor-2010.pdf>

Jaime A. Chavarriaga L., Hugo F. Arboleda J. (2004). Modelo de Investigación en Ingeniería del *Software*: Una propuesta de investigación tecnológica. 26 de diciembre de 2017. Recuperado de: Universidad San Buenaventura. Disponible en el sitio de Internet: <http://www.emn.fr/x-info/harbol07/MIFISIS2004.pdf>

Juliano Mologni. (2016). Compatibilidad electromagnética. 27 de diciembre de 2017. Recuperado de: ESSS. Disponible en el sitio de

Internet:

<http://www.esss.com.br/blog/es/2016/08/compatibilidad-electromagnetica/>

*Software* FEKO para análisis de circuitos. 27 de diciembre de 2017. Disponible en: <http://www.indielec.es/feko-cms-4-50-376/>

*Software* ZUKEN para análisis de circuitos. 27 de diciembre de 2017. Disponible en: <https://www.zuken.com/en>