

III JORNADAS DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA DEL NEA Y PAÍSES LÍMITROFES  
*"Nuevos escenarios para la Ingeniería en el Norte Grande"*  
9 y 10 de Junio de 2014. Resistencia, Chaco, Argentina

## CONTROL DE RADIACIONES NO IONIZANTES: DETECTORES DE POTENCIA RMS EN RADIOFRECUENCIAS

Del Valle, Eduardo E.<sup>a</sup>; Valdez, Alberto D.<sup>\*</sup>; Miranda, Carlos A.<sup>b</sup>; Schlesinger, Paola L.<sup>c</sup>; Chiozza, Juan A.<sup>d</sup>; Miranda, Carlos V.<sup>e</sup>; Fernández Cvitkovic, Marcos M.<sup>f</sup>

<sup>a, b, c, d, e y f</sup> Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura / Departamento de Ingeniería, Corrientes, CP3400, Argentina.

<sup>\*</sup> Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura / Departamento de Ingeniería, Corrientes, CP3400, Argentina. [dvaldez@exa.unne.edu.ar](mailto:dvaldez@exa.unne.edu.ar), Tel.: 0379-4423126 int. 107

### Resumen

El control y estudio de los niveles de radiaciones no ionizantes RNI en ambientes sensibles para el ser humano es un tema de interés para varias disciplinas. El monitoreo autónomo de los niveles de RNI en un punto puede realizarse de manera conveniente utilizando un equipo electrónico de medición de banda ancha, con capacidad de procesamiento y almacenamiento de datos y conectividad bajo diferentes protocolos. El instrumento mencionado se encuentra actualmente en desarrollo por el Grupo de Radiaciones No Ionizantes. En la arquitectura del equipo de medición adoptada se pueden diferenciar tres etapas: el sistema de antenas, el circuito de medición de potencia de RF y el circuito de procesamiento digital. En el presente trabajo se analizan diferentes dispositivos electrónicos sensores de potencia de RF de las marcas Linear Technology, Analog Devices, Hittite Microwave Corporation y Texas Instruments. Los rangos de frecuencia de medición de los dispositivos estudiados abarcan parcialmente las bandas de mayor interés definidas en las normativas reguladoras de RNI. Se discute una selección preliminar tomando como referencias la banda de broadcasting de FM en VHF, la banda de Televisión Digital Terrestre en UHF, las bandas de telefonía celular en 800 MHz y 1.900 MHz y las bandas de WiFi en 2.4 GHz y 5 GHz. Se analizan los rangos de potencias admitidas por cada sensor y su linealidad dentro de su banda de frecuencia de operación. Finalmente se presenta un estudio cualitativo indicando las ventajas y desventajas de cada uno de los dispositivos y las conclusiones finales.

**Palabras clave:** medición; sensores; potencia; frecuencia

### Introducción

El control y estudio de los niveles de radiaciones no ionizantes (RNI) en ambientes sensibles para el ser humano tales como centros de salud, centros educativos, centros de esparcimientos, es un tema de especial interés para varias disciplinas.

En el mundo existen numerosas normas de seguridad y recomendaciones para minimizar los efectos de la exposición humana a campos de radiofrecuencia (RF). Las principales organizaciones emisoras de las mismas son la American Standards Institute (ANSI), la National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP), el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), la International Radiación Protection Association (IRPA) y Canada's Safety Code 6 HC Pub: 091029, Radiation Protection Bureau of Health Canada. En la Argentina la Dirección Nacional de Calidad Ambiental de Secretaría de Salud del Ministerio de Salud y Acción Social, estableció el "Estándar Nacional de Seguridad para la Exposición a radiofrecuencias comprendidas entre 100 KHz y 300 GHz", el cual forma parte de la Resolución N° 202-95, donde se propusieron los valores máximos admisibles de niveles de exposición para las personas a las radiaciones no ionizantes tanto a nivel poblacional como ocupacional. A su vez, la Comisión Nacional de Comunicaciones aprobó "El Protocolo de Evaluación de las RNI", que regula los métodos de medida de las RNI, mediante la resolución CNC N° 3690/2004 (Boletín Oficial N° 30.524, 10/11/04), de la Comisión Nacional de Comunicaciones. En la ciudad de Corrientes se aprobó en el año 2008 una Ordenanza Municipal N°4600/08 de Control de instalaciones que emiten radiaciones no ionizantes en la Ciudad de Corrientes.

A través de la Resolución N°11/14 de la Secretaría de Comunicaciones de la Nación se creó el Sistema Nacional de Monitoreo de Radiaciones No Ionizantes el que tendrá como objetivos la medición de las emisiones electromagnéticas, el cumplimiento del Estándar Nacional de Seguridad para la exposición a radiofrecuencias, la articulación de políticas entre los actores involucrados y su adecuada comunicación. El Sistema Nacional de Monitoreo de las Radiaciones No Ionizantes (SiNaM) deberá ser un sistema abierto y adecuado a lo estipulado en la Recomendación UIT-T K.83 de la Unión Internacional de Telecomunicaciones [1].

En los últimos años se ha difundido la utilización de instrumental médico y equipos de asistencia y diagnóstico basados en sistemas electrónicos que operan en variados niveles de potencia y frecuencia, que contribuyen a la generación de RNI en ambientes sanitarios. Muchos instrumentos y equipos médicos disponen de conectividad inalámbrica en la banda ISM (Industrial Scientific and Medical) WiFi y Bluetooth. A este escenario se le suman las fuentes externas emitidas por sistemas de broadcasting de radio, televisión analógica y digital, telefonía celular, sistemas inalámbricos de internet, sistemas de comunicaciones comerciales, ruido industrial y nuevos sistemas electrónicos que emiten RNI. La utilización y colocación de equipos de comunicaciones que trabajen en radiofrecuencias en hospitales y sus inmediaciones ha sido objeto de un extenso debate, que ha generado políticas y enfoques muy diferentes en distintos países. En mayor medida preocupa el posible efecto de las RNI sobre la salud en pacientes en condiciones críticas y el personal asignado a su cuidado, en especial a mediano y largo plazo. La preocupación de muchos profesionales de las diferentes disciplinas que convergen en centros de salud es el posible efecto a mediano y largo plazo de las RNI en el ser humano. A los efectos de disponer información periódica sobre los niveles de RNI en un punto o sector, es importante disponer de un instrumento monitor de medición autónomo con capacidad de procesamiento, con conectividad a PC y software de análisis adecuado. Esta información servirá de insumo para diferentes líneas de investigación presente y futura. Las preocupaciones que dieron origen al Proyecto de Desarrollo Tecnológico y Social “Optimización y Control de las Radiaciones No Ionizantes” [2] se pueden considerar de interés en el Instituto de Cardiología de Corrientes. En este centro existen numerosos y variados equipos de diagnóstico, tratamiento, de asistencia terapéutica, dispositivos de implantación (marcapasos) y además monitores de parámetros vitales con conectividad inalámbrica en la banda de UHF y los más recientes en 2.4 GHz. Se suma a este escenario teléfonos celulares de uso particular y la contaminación externa de múltiples y variadas fuentes emisoras de RNI.

Básicamente se desarrollará un equipo electrónico que permita medir el nivel de campos electromagnéticos en las bandas de mayor utilización del espectro radioeléctrico. La selección de las bandas de interés será objeto de un estudio inicial a fin de elaborar las especificaciones particulares en cuanto a la/las antenas a utilizar, con el fin de cubrir el espectro de frecuencias de mayor densidad de potencia presentes en el punto. Se contemplará especialmente las bandas de radiodifusión, de televisión analógica y digital, de telefonía celular, WiFi y la de ISM. El equipo contará con un sistema de procesamiento y almacenamiento electrónico propio, con conectividad bajo diferentes protocolos alámbricos e inalámbricos y un software de aplicación para el análisis de los datos obtenidos.

En la arquitectura del equipo de medición adoptada bajo estudio se pueden diferenciar tres etapas: el sistema de antenas, el circuito de medición de potencia de RF y el circuito de procesamiento digital.

Para la determinación de las características básicas del equipo de medición y selección de tecnologías a utilizar, en este trabajo se analizan algunos de los detectores de potencia de RF de valor eficaz verdadero RMS (Root Mean Square) disponibles en el mercado.

## **Materiales y Métodos**

Con el objetivo de diseñar un medidor de intensidad de campo electromagnético fue necesario investigar acerca de los equipos disponibles en el mercado de similares características técnicas, la tecnología utilizada y la normativa asociada. La gran mayoría de ellos se rige por la Recomendación UIT- K.83 de la Unión Internacional de Telecomunicaciones. Considerando la masiva utilización de esquemas de modulación digitales, los cuales implican un comportamiento complejo de la envolvente

de señal cuya potencia se pretende medir, se optó por trabajar con detectores de potencia de RF de tipo RMS. Otro aspecto a considerar son los valores límites de densidad de potencia (o campo eléctrico) permitidos por las normas, los cuales determinarán el rango de potencia de entrada a considerar en el equipo. Un aspecto no menos importante es la respuesta del detector a la potencia de entrada la cual puede ser lineal o logarítmica. La respuesta en frecuencia y la linealidad son aspectos importantes a considerar a la hora de la selección del dispositivo. Y no menos importante al momento de la construcción del equipo es el encapsulado y sistema de soldadura ya que la mayoría de los detectores se presentan en dimensiones del orden del milímetro, con un número de 8 pin de conexiones.

Para el presente trabajo se utilizaron los datasheet de circuitos detectores de potencia de algunas empresas líderes en el mercado en la fabricación de este tipo de detectores. Primero se hace una breve descripción de las características de los principales tipos de detectores de potencia para luego profundizar en los detectores RMS considerados de interés.

**Detector de pico de RF.-** El detector de pico o de cresta es el más simple de los detectores utilizados para la medición de potencia en RF. El circuito almacena el máximo valor de la señal con una constante de tiempo relativamente alta respecto a la portadora y pequeña comparada con la envolvente. Esta característica lo hace adecuado para las señales moduladas en amplitud (AM).

Debido a que el detector mide la tensión de pico su respuesta es dependiente a la forma de onda de la señal, por lo que es necesario conocer la misma en el dominio del tiempo para determinar su valor RMS. Para modulaciones complejas este detector es prácticamente inviable.

**Detector con amplificadores logarítmicos.-** Los detectores con amplificadores logarítmicos son utilizados frecuentemente para la medición de potencia en sistemas GSM (Groupe Spécial Mobile - Global System for Mobile communications) y WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access). La función de transferencia de un detector de este tipo tiene una respuesta lineal de la tensión de salida en función de la potencia de entrada en dB. Esto resulta conveniente ya que la mayoría de los estándares de comunicaciones especifican la potencia de transmisión en dBm. Los amplificadores detectores implementan la función logarítmica a través de una aproximación lineal por tramos. En consecuencia no implementan una medición exacta de la potencia de salida lo cual implica una dependencia de la forma de onda de la señal. En sistemas que utilizan varios esquemas de modulación se requieren tablas de calibración.

**Detector de valor eficaz verdadero (RMS detector).-** Un detector RMS tiene una respuesta que es insensible a la forma de la señal y la forma de modulación. Esto es debido a que su funcionamiento se basa en la determinación exacta de la potencia media cuadrática, es decir implementa la ecuación

$$P_{RMS} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{v(t)^2}{R} dt \quad P = \frac{V_{RMS}^2}{R}$$

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int v(t)^2 dt}$$

Los detectores RMS son particularmente adecuados para los estándares de comunicación más recientes, como WCDMA y LTE (Long Term Evolution) que exhiben grandes diferencias entre valor pico y valor medio y diferentes esquemas de modulación (formas de señal). Esta es una de las principales ventajas en comparación a otros tipos de detectores. Por ejemplo, la respuesta del detector RMS para una señal modulada WCDMA de 0 dBm y una portadora no modulada de 0 dBm es esencialmente igual. Esto elimina la necesidad de procedimientos de calibración complejos y tablas de calibración para los diferentes esquemas de modulación utilizados.

## ADL5501

El funcionamiento del circuito ADL5501 (Analog Devices) [3] se basa en un detector RMS que proporciona una muy buena aproximación para la medición de la potencia de RF de una señal con independencia de la forma de onda. Se logra esta función utilizando dos celdas elevadoras al cuadrado de idénticas características equilibradas por la acción de un amplificador de error de alta ganancia.

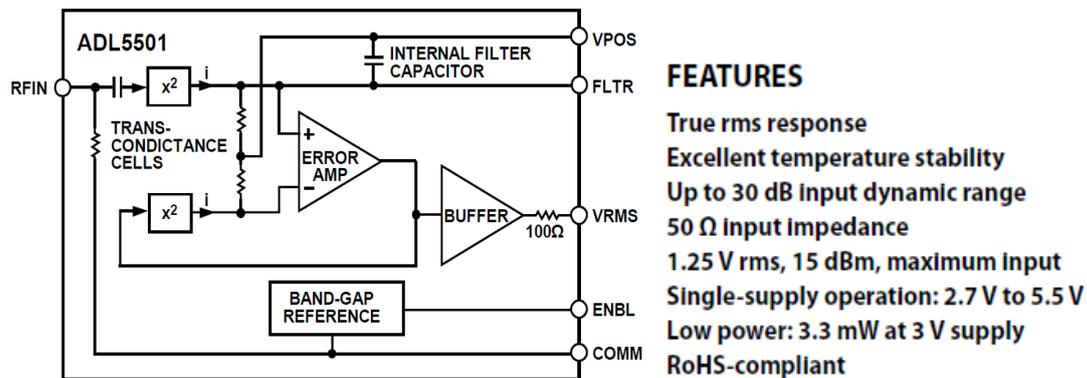


Figura 1.- Diagrama en bloques y características del ADL5501 (detector de valor eficaz verdadero) [3]

La señal a medir es aplicada a la entrada de la primera de las celdas a través de una red adaptadora de entrada. La entrada está diseñada para ofrecer una impedancia de 50 ohm en un rango de frecuencia de 50 MHz a 6 GHz. La señal de entrada es elevada al cuadrado en la primera celda generando a su salida una corriente la cual es aplicada a una carga interna compuesta por un resistor en paralelo con un capacitor, seguido de un filtro pasabajos, del cual se extrae el valor medio. Aunque el circuito responde esencialmente a la tensión, la impedancia de entrada permite calibrar este puerto en términos de potencia equivalente. Por lo tanto a una tensión de entrada de 224 mV RMS sobre 50 ohm corresponde a 1 mW. Debido a que la celda de entrada y la red de acoplamiento de entrada son dependientes de la frecuencia, la ganancia de conversión es función de la frecuencia. La tensión a través del filtro pasabajos, cuya frecuencia de corte puede ser arbitrariamente baja, se aplica a una entrada del amplificador de error. Una segunda celda se utiliza en el lazo de realimentación negativa del amplificador la cual toma parte de la señal de salida del amplificador de error y su salida se aplica a la otra entrada del mismo. Cuando la tensión a la entrada de la segunda celda es igual al valor RMS de la entrada de señal, el lazo está en estado estable y la salida del buffer representa el valor eficaz de la entrada. Los efectos de escala en estas células se anulan; por lo tanto, la calibración general puede ser precisa y la respuesta en conjunto de las células permanece estable respecto a la variación de temperatura, estableciendo una excelente estabilidad de calibración. Las celdas tienen un gran ancho de banda con una respuesta en frecuencia que va desde continua hasta las microondas. Sin embargo el rango dinámico del sistema es pequeño debido en parte al gran rango dinámico de salida inherente a la respuesta cuadrática de las celdas. El capacitor interno del chip posee una frecuencia de corte de aproximadamente 100 KHz, suficiente para la mayoría de las modulaciones digitales actuales tales como CDMA, CDMA2000, WCDMA, QPSK/QAM para OFDM (WLAN, WiMAX e ISDB-T<sub>b</sub>). Para formas de ondas más complejas, que incluyen componentes en frecuencias en la región de los KHz, es posible disminuir la frecuencia de corte del filtro utilizando un capacitor externo. Un filtrado adecuado asegura un error muy pequeño en la salida; sin embargo el ripple residual puede disminuirse con un filtro pasabajos adicional a la salida del circuito detector.

## Características típicas del ADL5501

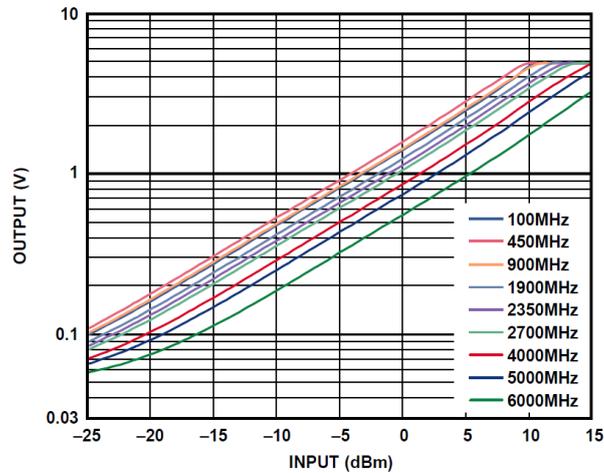


Figura 2.- Tensión de salida en función de la potencia de entrada para diferentes frecuencias [3]

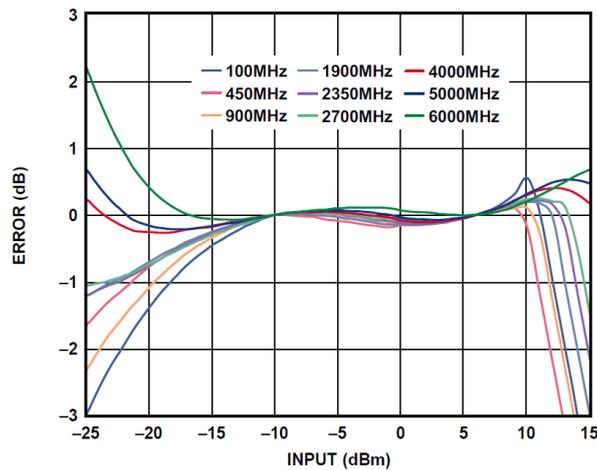


Figura3.- Error en función de la frecuencia de la señal de entrada [3]

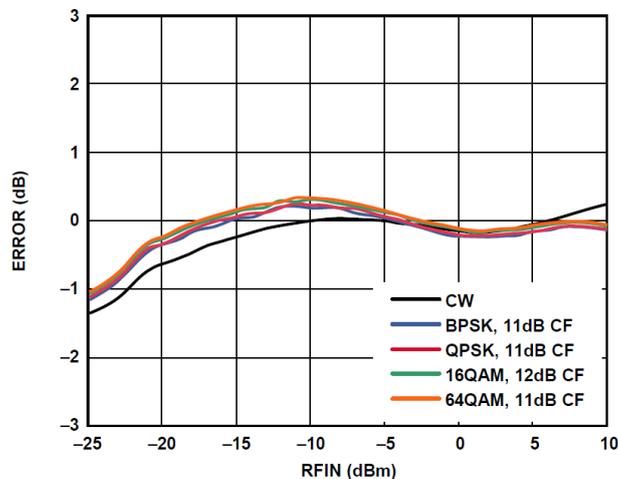


Figura 4.- Error respecto a una señal de referencia de CW para modulaciones OFDM 802.16 a 2.35 GHz, BW=10 MHz y 256 portadoras [3]

## LMH2120

El circuito LMH2120 (Texas Instruments) [4] es un detector de potencia RMS especialmente adecuado para la medición precisa de la potencia de señales de RF moduladas con gran relación valor de pico-valor medio, es decir aquellas con grandes variaciones de la envolvente. Estas señales son típicas de WCDMA y LTE. La topología de medición de valor RMS asegura una medición insensible al tipo de modulación. El funcionamiento del circuito LMH2120 (Texas Instruments) se basa en una configuración que permite medir el valor eficaz verdadero de una señal. La determinación de el valor RMS se logra con un multiplicador analógico, un filtro pasabajos y realimentación negativa. Su tensión de salida es lineal respecto a la potencia de entrada.

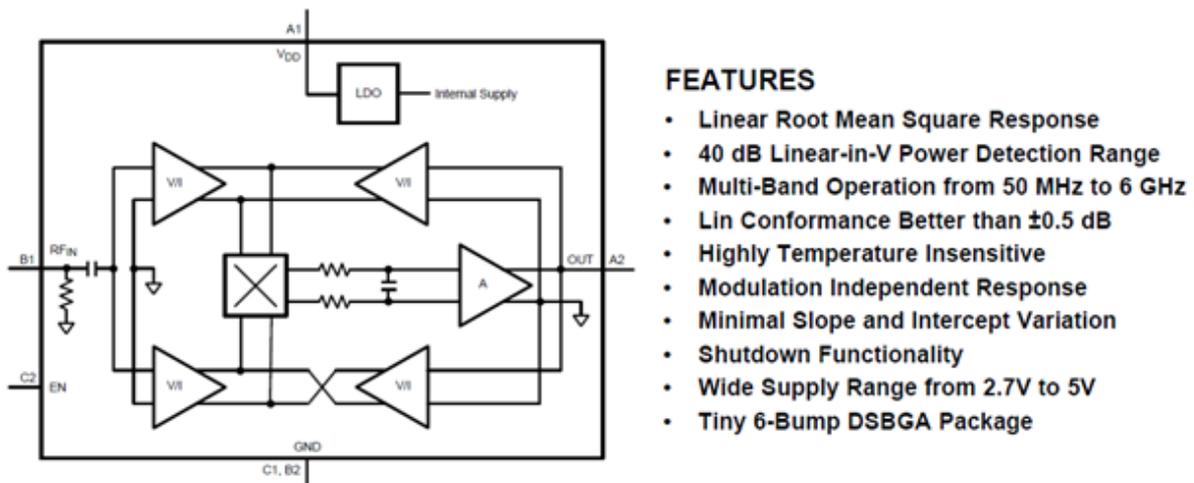


Figura 5.- Diagrama en bloques y características del LMH2120 (detector RMS de respuesta lineal) [4]

La señal a medir  $RF_{IN}$  es aplicada a dos convertidores de tensión/corriente obteniendo a la salida el valor  $i_{RF}$ . Desde la salida  $V_{OUT}$  se realimenta la corriente  $i_{LF}$  hacia el multiplicador. Las dos entradas del multiplicador son alimentadas por:

$$\begin{aligned}
 i_1 &= i_{LF} + i_{RF} \\
 i_2 &= i_{LF} - i_{RF}
 \end{aligned}$$

Donde  $i_{LF}$  es la corriente de realimentación desde la salida de DC e  $i_{RF}$  es la corriente dependiente de la señal de entrada de RF a medir. La salida del multiplicador  $i_{OUT}$  es el producto de estas dos corrientes

$$i_{OUT} = \frac{i_{LF}^2 - i_{RF}^2}{I_0}$$

La corriente  $i_{OUT}$  pasa a través del filtro pasabajos integrándola y obteniendo el término de DC. La entrada del amplificador A actúa como punto nulo del lazo de realimentación negativa. Se cumple entonces que:

$$\int i_{LF}^2 dt = \int i_{RF}^2 dt$$

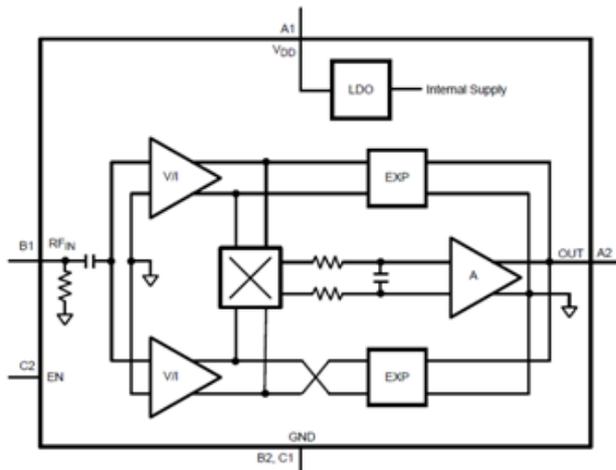
Esto implica que el valor medio de potencia de la corriente relacionada a la tensión de salida del LMH2120 es igual al valor medio de la potencia de la corriente relacionada con la señal de entrada.

Para un sistema con realimentación negativa la función de transferencia está dada por la función inversa del bloque de realimentación. De esta manera para tener una transferencia lineal para este detector de RF, la red de realimentación implementa una función lineal resultando en una función de transferencia total para el LMH2120:

$$V_{OUT} = k \sqrt{\int V_{RF}^2 dt}$$

## LMH2110

El circuito LMH2110 (Texas Instruments) [5] es un detector de potencia RMS de respuesta logarítmica adecuado para la medición precisa de la potencia de señales de RF moduladas con gran relación valor de pico-valor medio, es decir aquellas con grandes variaciones de la envolvente. Estas señales son típicas de WCDMA y LTE. La topología de medición de valor RMS asegura una medición insensible al tipo de modulación. El funcionamiento del circuito LMH2110 (Texas Instruments) se basa en una configuración que permite medir el valor eficaz verdadero de una señal. La determinación de el valor RMS se logra con un multiplicador analógico, un filtro pasabajos y realimentación negativa. Su tensión de salida responde al logaritmo de la potencia de entrada debido a los bloques exponenciales.



### FEATURES

- Logarithmic Root Mean Square Response
- 45 dB Linear-in-dB Power Detection Range
- Multi-Band Operation from 50 MHz to 8 GHz
- LOG Conformance Better than  $\pm 0.5$  dB
- Highly Temperature Insensitive,  $\pm 0.25$  dB
- Modulation Independent Response, 0.08 dB
- Minimal Slope and Intercept Variation
- Shutdown Functionality
- Wide Supply Range from 2.7V to 5V
- Tiny 6-Bump DSBGA Package

Figura 6.- Diagrama en bloques y características del LMH2110 (detector RMS de respuesta logarítmica) [5]

Debido a la realimentación exponencial del LMH 2110 la expresión de la tensión de la salida resulta proporcional al logaritmo del valor eficaz de la tensión de entrada y por lo tanto a la potencia en dB.

$$V_{OUT} = V_0 \log \sqrt{\frac{1}{V_X} \int V_{RF}^2 dt}$$

## Resultados y Discusión

De la comparación preliminar de las especificaciones de los circuitos detectores de potencia de RF de las marcas Linear Technology, Analog Devices, Hittite Microwave Corporation y Texas Instruments se preseleccionaron un detector de Analog Devices ADL5501 y dos de Texas Instruments, el

LMH2120 de respuesta lineal y el LMH2110 de respuesta logarítmica, los cuales fueron descriptos someramente en este trabajo. La respuesta logarítmica es de especial interés para el instrumento en cuestión si bien no es determinante. De la comparación entre ellos surge que su linealidad y errores son similares y dentro del rango de  $\pm 1$  dB. En cuanto al rango dinámico de entrada que manejan los detectores de Texas Instruments el LMH2120 es de 40dB y el LMH2110 es de 45 dB, superior al de Analog Devices que llega solo a los 30 dB. En el ADL5501 el rango de potencia de entrada es de -20 dBm a 8 dBm, en el LMH2120 el rango de potencia de entrada es de -35 dBm a 5 dBm y en el LMH2110 el rango de potencia de entrada es de -40 dBm a 5 dBm. Esta característica resulta de especial interés para el instrumento de medición a construir considerando los valores máximos de densidad de potencia establecidos por la Resolución N°202/95. La impedancia de entrada de todos los detectores está normalizada a 50 ohm resistiva con una componente reactiva capacitiva. La función de transferencia de todos los detectores varía con la frecuencia de operación prácticamente de la misma manera, disminuyendo considerablemente a partir de los 1.9 GHz. El ADL5501 tiene menor variación que los otros detectores en todo su rango de frecuencia útil. Los errores debidos al esquema de modulación son pequeños: en el LMH2120 y LMH2110 se evalúan para WCDMA y LTE, QPSK, 16QAM y 64QAM siendo menores de 0.5dB y para el ADL5501 se evalúan para diferentes modulaciones y estándares QPSK, 8PSK, 16QAM, 64QAM, 802.16OFDM, WCDMA en el orden de 1dB. El ADL5501 se suministra en un encapsulado KS-6 de 2 mm x 1,25 mm y terminales fuera de la línea, el LMH2120 en un encapsulado Tiny 6-bump DSBGA con dimensiones de 1.25 mm x 0.85 mm y terminales debajo del cuerpo y el LMH2110 con el encapsulado Tiny 6-bump DSBGA.

## Conclusiones

De la discusión anterior y considerando los objetivos fijados para el monitor de radiaciones no ionizantes a diseñar y construir se puede concluir que cualquiera de los detectores RMS de radiofrecuencias podría utilizarse. Como característica ventajosa el ADL5501 tiene menor variación de su función de transferencia con la frecuencia. Sin embargo la respuesta logarítmica del LMH2110 de Texas Instruments y su amplio rango dinámico son parámetros deseables para el monitor de RNI ya que debemos medir los valores en un entorno inferior y superior a los valores límites establecidos por la normativa vigente. El rango de potencia de entrada del LMH2110 es adecuado a los valores establecidos para el instrumento de medición. Como otra característica de interés se presenta el pequeño error debido a los diferentes esquemas de modulación digitales de las diferentes señales a medir, lo cual comparte con el LMH2120. La impedancia de entrada del LMH2110 se mantiene en valores muy próximos a los 50  $\Omega$ , impedancia normalizada en la mayoría de los sistemas de RF. Es de notar que las pequeñas dimensiones de los encapsulados son importantes al momento de realizar un circuito de medición práctico por el proceso de soldadura inherente. El rango de frecuencias del LMH2110 es el mayor de los tres llegando a los 8 GHz. Estas características del detector de potencia RMS LMH2110 de Texas Instruments nos permiten preseleccionarlo para utilizarlo en el instrumento monitor de RNI.

## Referencias

- [1] UIT-UNION INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES. (2011) Recommendation UIT-T K.83 Monitoring Field Strengths of Electromagnetic Fields
- [2] GRUPO DE RADIACIONES NO IONIZANTES. Proyecto de Desarrollo Tecnológico y Social “Optimización y Control de las Radiaciones No Ionizantes“. (2013). Secretaría General de Ciencia y Técnica. UNNE
- [3] ANALOG DEVICES. (2009) ADL5501 - 50 MHz to 6 GHz TruPwr Detector. Datasheet.
- [4] TEXAS INSTRUMENTS. (2013) LMH2120 - 6 GHz Linear RMS Power Detector with 40 dB Dynamic Range. Datasheet.
- [5] TEXAS INSTRUMENTS. (2013) LMH2110 - 8 GHz Logarithmic RMS Power Detector with 45 dB Dynamic Range. Datasheet