

Detección de radiación electromagnética visibles

Leopoldo Estrella-Badillo, Teodoro Álvarez-Sánchez, Jesús Antonio Álvarez-Cedillo, Raúl Junior Sandoval-Gómez.

^aInstituto Politécnico Nacional, estrella@ipn.mx, CDMX México.

^bInstituto Politécnico Nacional, talvarezs@ipn.mx, CD Tijuana Baja California México.

^cInstituto Politécnico Nacional, jaalvarez@ipn.mx, CDMX México.

^dInstituto Politécnico Nacional, rsandoval@ipn.mx, CDMX México.

Resumen

Por encima de la frecuencia de las radiaciones infrarrojas se encuentra lo que comúnmente es llamado luz visible, un tipo especial de radiación electromagnética que tiene una longitud de onda en el intervalo de 0,4 a 0,8 micrómetros. Este es el rango en el que el sol y las estrellas similares emiten la mayor parte de su radiación. Probablemente, no es una coincidencia que el ojo humano sea sensible a las longitudes de onda que emite el sol con mayor intensidad. La naturaleza de esta investigación está enfocada principalmente a la detención de la radiación solar que llega a la tierra a través de la atmosfera para determinar las condiciones ambientales prevalentes por la radiación electromagnética visible.

Palabras clave— Radiación electromagnética, campos eléctricos, celda fotovoltaica.

Abstract

Above the frequency of infrared radiation, it is what is commonly called light, a special type of electromagnetic radiation having a wavelength in the range of 0.4 to 0.8 microns. This is the range in which the sun and similar stars emit most of their radiation. It is probably no coincidence that the human eye is sensitive to wavelengths that the sun emits more intensely. The nature of this research is focused mainly on the monitoring of solar radiation reaching the earth through the atmosphere to determine the environmental conditions in the visible electromagnetic radiation.

Keywords— Electromagnetic radiation, electromagnetic fields, photovoltaic cell.

1. INTRODUCCIÓN

La radiación electromagnética es un proceso que se produce en el universo. La radiación nos llega a través del espacio. Las ondas electromagnéticas son de diferente espectro y fuente. Las estrellas y otros objetos estelares generar radiación electromagnética, son partículas cargadas (de electrones y protones).

La nebulosa en el espacio expuesta a campos magnéticos esto producen radiación electromagnética, Así la materia expuesta a fuentes de un campo gravitacional o de la gravedad (como

cerca de un agujero negro) produce radiación electromagnética, a continuación, se expondrá algunos hechos que producen radiaciones electromagnéticas que se han visto o han realizado de una manera desapercibida.

Una característica principal de un sistema sensible a la radiación solar, se puede determinar por la radiación máxima a través de la atmosfera en la superficie de la tierra [1].

A continuación, se tienen un modelo matemático que detecta la radiación electromagnética a través del sensor para condiciones ambientales en la tierra, en la detección mínima y máxima que se representa en la ec. (1)

$$R_{max} = \left[\frac{P_t G A_e \sigma \delta}{P_{min} (16\pi^2)} \right]^{1/4} [m] \quad [1]$$

Donde:

P_t = Potencia pico transmitida de radiación [W];

P_{min} = Potencia de la sensibilidad de detección [W];

σ = Sección transversal de dispersión del sensor [m^2];

G = Ganancia de celda semiconductor [adimensional];

$A_e = G\lambda^2/4\pi$ Área afectada de la zona perceptible [m^2];

λ = Longitud de onda [m];

δ = Factor de pérdida [adimensional].

También incluye la absorción atmosférica, y perdidas en zona de detección. La utilización de la ecuación (1) es un aproximado, cuyas principales características son:

1. La Sección transversal de dispersión (σ). Para el sensor en movimiento, tiene amplias variaciones, en función de la intensidad de frecuencias. En el sistema la sensibilidad del sensor (celda fotovoltaica) a partir de un análisis estadístico, de los sensores colocados en determinadas zonas. Sin embargo, en los parámetros, y sus cálculos se determina dependiendo de la radiación solar que incida y a la sensibilidad del sensor lo que hace que el alcance sea de carácter aleatorio en la medición.

Para sistemas de medición la determina el movimiento del sol y la sección transversal del detector es mucho más crítica, ya que es función del tiempo durante el día y causa fluctuaciones en la intensidad radiación solar detectada. En general para sensores complejos la sección transversal se representa como función del ángulo de movimiento sensorial bajo condiciones rápidas o lentas. Para las fluctuaciones rápidas a un grado 1° de ángulo son periódicas con valores próximos, y para condiciones lentas las fluctuaciones del ángulo son periódicas del orden de 20° o más. Para un cálculo de la sensibilidad máxima, de la sección transversal del detector de radiación solar debe considerarse aleatoria, y puede tomarse el promedio.

2. La sensibilidad del sensor (P_{min}). Este parámetro corresponde al nivel de radiación de potencia mínima que el sensor puede reconocer, la radiación a la entrada del detector, por lo tanto, si la sensibilidad cambia de acuerdo variación en radiación solar. La detección radiación puede

clasificarse en forma general como intrínseco y extrínseco, el primero se genera por los componentes que forman el sensor (fotocelda detectora) y a la banda de frecuencias en la que operan los sensores, básicamente en lo que se refiere a la radiación solar considerando como ruido blanco, que es uno de los parámetros que define la sensibilidad. La radiación solar (ruidos extrínsecos) son de origen natural y parte de este artículo.

El ruido de emisión (Shot noise) [1]: cuando una corriente media I de portadores con carga q cruza una barrera de potencial como las que aparecen en las uniones semiconductoras **NP** (celda solar), se origina una corriente de ruido que recibe el nombre de ruido de emisión. Su densidad espectral de potencia media es constante para frecuencias inferiores a 10^{10} Hz y expresa por la ecuación (2):

$$in^2 = 2ql \quad [2]$$

Este tipo de ruido aparece en los bulbos (válvulas termoiónicas) y en las uniones de los semiconductores de los dispositivos. Fue predicho por Schottky en 1918 [6] [7] y medido por primera vez por Johnson en 1925 [10]. Se analiza primeramente el ruido de emisión en un diodo en su unión.

Cuando la corriente de saturación inversa es considerable, los portadores mayoritarios no pueden cruzar la frontera, mientras que, en cambio, los electrones de la región **P** y los huecos de la región **N** son inmediatamente barridos por el campo eléctrico hacia la región opuesta, densidad de portadores minoritarios puede apreciarse como nula cuando la polarización inversa es considerable. Así lo indica, la concentración de electrones $n_p(0)$ en la región **P** y sobre el borde de la frontera de transición la que es:

$$n_p(0) = n_{p(0)} e^{\frac{eV}{kT}} \quad [3]$$

Para el equilibrio de la concentración de electrones se tiene la siguiente expresión.

$$n_p = n_{p0} \left(1 - e^{\frac{x}{L_n}} \right)$$

Ahora se pretende saber la corriente I de la fotocelda, está dada por [4]:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad [4]$$

dónde:

I = Corriente de flujo a través del diodo

I_0 = Corriente inversa de saturación para la de polarización- inverso del diodo.

e = Constante 2,718 (base de logaritmos Neperianos)

q = $1.602 \cdot 10^{-19}$ C (carga eléctrica del electrón);

V = Tensión aplicada [V];

k = $1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K;

T = temperatura absoluta [K].

kT/q = 26 mV a 25° (ideal)

En la ecuación (4) expresa la corriente del diodo que varía con la aplicación de voltaje, de la temperatura y también de la luminosidad de la radiación solar.

La componente $I_0 e^{qV/kT}$ proviene de los portadores mayoritarios que se transportan de una región a la otra, mientras que $-I_0$ es una corriente de portadores minoritarios generados térmicamente. Al ser los mecanismos de cada componente distintos, las señales de ruido son no correlacionadas y por lo tanto las densidades de potencia media se suman.

Además, en cada una de las uniones puede calcularse según (2) donde q será igual en ambos electrones y huecos tienen la misma carga absoluta, de esta manera:

$$in^2 = 2ql_0 e^{qV/kT} + 2ql_0 = 2q(I + 2I_0) \quad [5]$$

Hay algo que mencionar, el hecho que sorprendente en que aún sin corriente hay ruido. Este se origina porque está presente la corriente de portadores minoritarios generados térmicamente, que debe ser compensada por la corriente mayoritaria, ambas generan ruido, incluye el ruido atmosférico y el ruido espacial, que es consecuencia entre otras causas de la ionización y recombinación de moléculas gaseosas por acción de la radiación solar de iluminación (ruido blanco).

Para grandes polarizaciones inversas es $I = -I_0$, por lo tanto, la ecuación (5) se transforma en

$$in^2 = 2ql_0 \quad [6]$$

y para grandes polarizaciones directas I_0 es despreciable, quedando

$$in^2 = 2ql \quad [7]$$

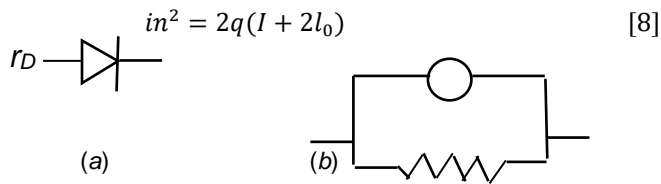
Hasta aquí se ha descrito las distintas maneras de generación de radiación electromagnética con varios fenómenos.

Ahora se enfocará la atención a la medición de la energía solar, esto se realiza por medio del sensor (celda solar). La celda solar es un semiconductor de unión NP que está disponible para la absorción de la radiación electromagnética de manera luminosa solar y es convertida en energía como es la corriente eléctrica, misma que es proporcional a la intensidad de la radiación solar luminosa.

En sistema fotovoltaico se compone de un foco y una celda solar, que se analizara el estudio de un horario de las 6 horas (amanecer) a las 20 horas (atardecer) con la medición de dos parámetros eléctricos de la corriente en corto circuito ec. (4). La tensión de circuito abierto ec. (3).

El modelo equivalente de un diodo con unión tipo NP se muestra en la fig. 1(a), así como su ecuación de polarización (8)

Fig.1. (a) Diodo semiconductor. (b) Modelo equivalente de ruido.



La variable r_D es la resistencia incremental del diodo, que viene dada por la siguiente expresión.

$$r_D = kT / (qI + I_0) \quad [9]$$

Al igual que en el caso de ruido térmico el ruido de emisión puede considerarse como ruido blanco y por lo tanto el valor cuadrático medio en la banda $B = f_2$ es:

$$InB^2 = 2qIB \quad [10]$$

El valor del ruido de emisión de un diodo por el cual circula 1 mA, en la banda de audio es.

$$InB = \sqrt{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 10^{-3} \times 19980} = 2.53 \text{ nA}$$

El valor del espectro de densidad de potencia media es constante con una frecuencia de ($f < 10^{10}$ Hz). Esto era de esperarse, pues la autocorrelación promedio es casi un impulso (debido a la diminuta magnitud de t_0). Entonces t_0 = tiempo medio entre colisiones electrónicas de orden de 10^{-12} s, por lo tanto, su transformada de Fourier es constante.

Haciendo una analogía con la luz blanca, que contiene todas las frecuencias visibles en iguales proporciones, a esto se llama *ruido blanco*. El espectro luminoso de radiación solar comprende de $\lambda = 400 \text{ nm}$ a 784 nm (784×10^{-9}), además la velocidad de la luz al vacío es $3 \times 10^8 \text{ m/s}$.

Entonces ahora se calcula la frecuencia de una onda de luz en el vacío $f = \frac{c}{\lambda}$:

$$f = \frac{3 \times 10^8}{784 \times 10^{-9}} = 385 \times 10^{12} \text{ Hz}$$

$$InB = \sqrt{2 \times 1.6 \times 10^{-19} (1 \times 10^{-3}) 385 \times 10^{12}} = 350 \mu\text{A}$$

$$f = \frac{3 \times 10^8}{400 \times 10^{-9}} = 750 \times 10^{12}$$

$$InB = \sqrt{2 \times 1.6 \times 10^{-19} (1 \times 10^{-3}) 750 \times 10^{12}} = 490 \mu\text{A}$$

Ahora la potencia de radiación solar de (ruido blanco) en la entrada de un detector o sensor se tiene la siguiente expresión:

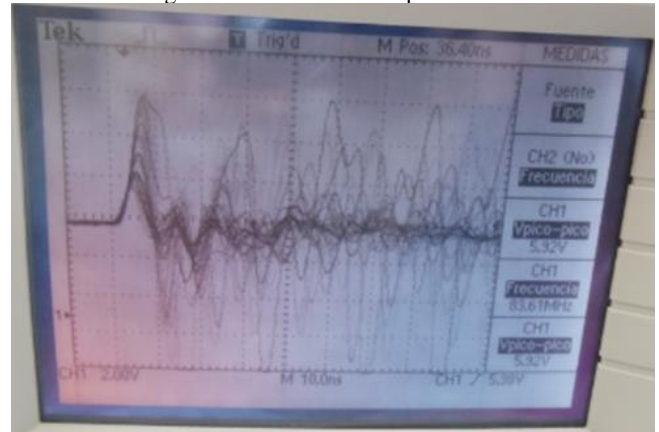
$$P = kT \Delta f (FR) \quad [\text{Watts}] [*] \quad [11]$$

Donde la figura 2 se muestra ruido blanco
 $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ [Joules/K]}$, Constante de Boltzman
 $T =$ Temperatura absoluta del ambiente [K];
 $\Delta f =$ Ancho de banda de ruido [Hz];
 $(FR) =$ Figura de ruido del receptor [a dimensional].

La potencia de radiación (ruido blanco) expresada por la ecuación (11) corresponde a la potencia mínima a partir de la cual la celda solar empieza a reconocer la radiación solar (sensibilidad de la celda solar).

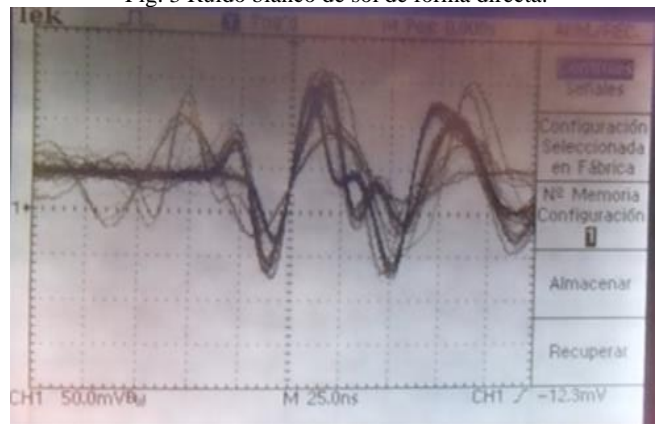
En la figura 2, se captura la pantalla de un osciloscopio modelo 2232 tektronix con la escala de medición de 50 mV y 25 ns , el cual se toman la medición de una celda expuesta a una radiación luminosa de una lámpara artificial.

Fig.2. Ruido blanco de lampara blanca.



Comparando mediciones de radiaciones luminosa de luz en una escala de 2 volts y 10 ns.

Fig. 3 Ruido blanco de sol de forma directa.



Por lo que se observa en la figura 3, aumento de potencia en 40 veces su valor en amplitud, así como el incremento de las frecuencias y el espectro luminoso visible de la luz natural (de sol).

Estas mediciones realizadas se realizaron con en el osciloscopio mencionado que en su pantalla se muestra la radiación electromagnética que afecta al humano.

A continuación se describera espreciones para medir la radiación electromagnética.

Sustituyendo la ecuación (10) en la ecuación (1) se tiene que:

$$R_{max} = \left[\frac{P_t G A_e \sigma \delta}{kT \Delta f (FR) (16\pi^2)} \right]^{1/4} [m] \quad [12]$$

La ecuación (13) tiene la capacidad en detectar la energía solar, como fuente que radia y se expresa como sigue.

$$E_t = P_t \tau_p [Joules] \quad [13]$$

Donde τ_p es el ancho de banda en área de detección.

Se puede sustituir la ec. (13) en la ec. (12) para obtener lo siguiente:

$$R_{max} = \left[\frac{E_t G A_e \sigma \delta}{kT (FR) (16\pi^2)} \right]^{1/4} \left(\frac{1}{\tau_p \Delta f} \right)^{1/4} [m] \quad [14]$$

Para detectar el espectro, del sensor para el detectar y reconocer señales en el intervalo de tiempo igual a τ_p , entonces el alcance máximo (fuente – detector) puede ser determinado por:

$$R_{max} = \left[\frac{E_t G A_e \sigma \delta}{kT (FR) (16\pi^2)} \right]^{1/4} [m] \quad [15]$$

El Factor de Pérdida (δ). En este parámetro se consideran las pérdidas que se presentan en el proceso de detección.

El acondicionamiento de la iluminación solar, y las atenuaciones se deben a condicionar el área o ambiente con las variantes aleatorias que no se pueden controlar y que hay pérdidas de la radiación solar de las reflexiones o atenuaciones por absorción de la potencia en la tierra, agua u otros objetos, la atenuación debido (nubosidad, lluvias, contaminación atmosférica, etc.) y la posición de los sensores son básicamente aleatorias.

Como la detección sensorial el cual interviene los medios naturales, y son de carácter aleatorio, hace que la sensibilidad sea máxima. Que son indispensables en la determinación de la respuesta al incidir la iluminación solar (radiación) sobre una zona determinada.

Para cálculos más aproximados, el alcance se debe determinar

en la detección de la radiación solar por métodos estadísticos. Considerando la relación de la máxima potencia recibida, con respecto a la potencia mínima, el detector reconoce la radiación solar (ruido de fondo), el cual incluye todo tipo de ruido, para el intervalo de tiempo τ_p se definirá un factor de visibilidad [3], dado por:

$$V = \frac{(E_{max}/E_{min})^2}{\tau_p \Delta f} \quad [16]$$

El factor de visibilidad cubre un intervalo de $0 \leq V \leq 1$, el valor típico del efecto Doppler es de 0.7 esto no es muy grande. Entonces se incluyen el factor de visibilidad en las ecuaciones (16) y (15) que se tiene que [2]:

$$R_{max} = \left[\frac{E_t G A_e \sigma \delta V}{kT (FR) (16\pi^2)} \right]^{1/4} [m] \quad [17]$$

Para determinar la distancia de los objetos entre el alcance máximo y el mínimo, se define un alcance óptimo (real) R_0 que es función de la energía reflejada E_R por el objeto, cuya expresión es:

$$R_0 = \left[\frac{E_t G A_e \sigma \delta}{E_R (16\pi^2)} \right]^{1/4} \quad [18]$$

Para obtener la distancia de un objeto en la cobertura de un detector o sensor, se puede normalizar la distancia máxima respecto a la distancia óptima, lo que implica también una normalización de la energía reflejada por el objeto respecto a la sensibilidad del detector. Esta normalización se obtiene sustituyendo las ecuaciones (8) y (9), donde se tiene que:

$$\frac{R_{max}}{R_0} = \left[\frac{kT (FR)}{E_R} \right]^{1/4} \quad [20]$$

Dentro del intervalo del alcance del sensor, la localización de los detectores es aleatoria, entonces el análisis tiene que realizarse de forma probabilística. Para esto se propone que:

$$x = \frac{R_{max}}{R_0} \quad \text{y que} \quad \left[\frac{kT (FR)}{E_R} \right]^{1/4} = \frac{1}{y^{1/4}}$$

por lo que la ecuación (9) se puede expresar como la fig.4:

$$y = \frac{1}{x^4} \quad [21]$$

Para hacer el análisis probabilístico se determina las funciones $F_Y(y)$ en términos de la $F_X(x)$. Ahora sí $y \geq 0$, entonces la ecuación (11) tiene dos soluciones que son:

$$x_1 = -\frac{1}{\sqrt[4]{y}} \quad , \quad x_2 = \frac{1}{\sqrt[4]{y}}$$

Lo anterior se representa en la Fig. (2) como $g(x) \leq y$ para $x \leq x_1$ ó $x \leq x_2$ [4].

La probabilidad de la energía normalizada detectada por el sensor puede expresarse como [4]:

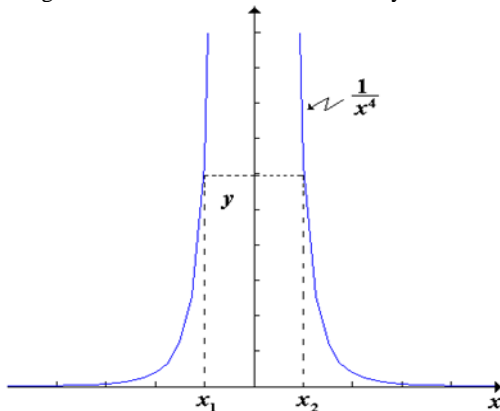
$$F_Y(y) = P(Y \leq y) = P\left\{X \leq -\frac{1}{\sqrt[4]{y}}\right\} + P\left\{X \geq \frac{1}{\sqrt[4]{y}}\right\} \quad [22]$$

Este caso en particular se tiene que:

$$P\left\{X \geq \frac{1}{\sqrt[4]{y}}\right\} = 1 - F_X\left\{\left(\frac{kT(FR)}{E_R}\right)^{1/4}\right\} \quad [23]$$

La ecuación (23) contempla el alcance máximo, teniendo como referencia la sensibilidad del sensor. Sin embargo, bajo condiciones reales el sensor presenta una zona ciega, que limita el alcance mínimo. Entonces, la distancia del sensor en la zona de cobertura se especifica para una distancia ideal R_0 entre la distancia máxima R_{max} , en una región cuya posición de los sensores es aleatoria.

Fig. 4. Sensibilidad de sensor mínimo y máximo.

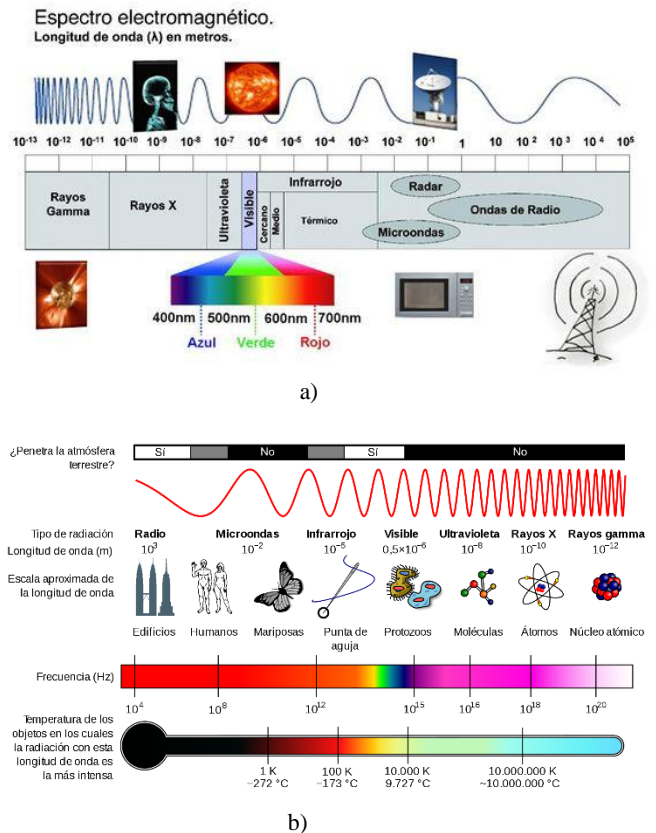


Las funciones de distribución de probabilidad $F_Y(y)$ en términos de $F_X(x)$.

La aleatoriedad de la posición de los sensores no es considerada en el análisis anterior, por lo que al respecto se propone una función de probabilidad de distancia promedio para posición de los sensores en la cobertura atmosférica.

El análisis anterior se aplica normalmente para obtener la función de distribución de detección de ondas para un número de pulsos integrados de acuerdo a la ley cuadrática del detector [3]. En la siguiente figura 5 se presenta el espectro de las radiaciones electromagnéticas que se puede detectar en la tierra con la densidad de probabilidad promedio depende de la posición de sensor que da resultados más confiables.

Fig. 5. Espectro de radiación electromagnética a) [9], b) [10].



Reconocimiento:

Agradecemos las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), Instituto Politécnico Nacional a través de la Secretaría de Investigación y Posgrado con los proyectos SIP 20230215, SIP 20231468. Además, a la Unidad Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas y Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital. Asimismo, el “Programa de estímulos al desempeño de la investigación” (EDI), el “Programa de estímulos al desempeño docente” (EDD) y la “Comisión de Operación y promoción de actividades académicas” (COFAA).

6. REFERENCIAS

[1] Miyara, F., & Lahoz, L. A. (2020). Introducción al Análisis Frecuencial y al Ruido Eléctrico. Rosario, Argentina.
 [2] Marcum, J. I. (1947). A statistical theory of target detection by pulsed radar. RAND CORP SANTA MONICA CA.
 [3] Marcum, J. (2019). A statistical theory of target detection by pulsed radar. IRE Transactions on Information Theory, 6(2), 59-267.
 [4] Papoulis, A., & Unnikrishna Pillai, S. (2021). Probability, random variables and stochastic processes.

[5] Parsons, J. D., & Parsons, P. J. D. (2000). The mobile radio propagation channel (Vol. 2). New York: Wiley.

[6] Linnartz, J. P. (2019). Narrowband land-mobile radio networks. Artech House, Inc.

[7] Hess, G. C. (2020). Land-mobile radio system engineering. The Artech House mobile communications library.

[8] Linnartz, J. P. (2019). Narrowband land-mobile radio networks. Artech House, Inc.

[9] Particle Data Group. (2020). Review of particle physics. The European Physical Journal C-Particles and Fields, 3(1-4), 1-783.

[9] Yenny Aranguren Howor Cordero. (2023). Redición electromagnética,

https://issuu.com/howarcordero/docs/ondas_electromagn_ticas

[10]<https://recursossantateresa.blogspot.com/2019/10/radiacion-electromagnetica-parametros.html?spref=pi>

Leopoldo Estrella-Badillo. Es ingeniero en comunicaciones y electrónica egresado del Instituto Politécnico Nacional México (1970) de la ESIME. Tiene estudio de maestría en telecomunicación IPN-ESIME Zacatenco (2010).

Teodoro Álvarez-Sánchez. Es profesor que trabaja en computación paralela y sistema aplicado Multicore/Manycore. Recibió su maestría en sistemas digitales en 1994 y también es Ph.D. estudiante de Ciencias de la Computación (CIC-IPN y University of California Irvine), es profesor de tiempo completo en el Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital (CITEDI). Su investigación incluye el modelo de consistencia de memoria, programación paralela, sistemas IoT, IA, ML y DL.

Jesús Antonio Álvarez-Cedillo. Es ingeniero en comunicaciones y electrónica egresado del Instituto Politécnico Nacional - México (1987). Recibió el P.H.D. Licenciado en EDUCACIÓN (2016) de la Universidad de Baja California, Magíster en Informática del IPN-UPIICSA (2002). Tiene un posdoctorado en Tecnología Avanzada (2017) del IPN-CIITEC. Sus áreas de interés son Educación, Tecnología, Pymes, Tramitación Paralela. Es autor de artículos científicos (JCR y SCOPUS), libros, capítulos y ha participado en congresos nacionales e internacionales. Forma parte de la Red Nacional de Medio Ambiente y Ecología del IPN y de la Red de Cómputo.

Raúl Junior Sandoval-Gómez. Doctor en Administración Pública (2016), Doctor en Filosofía de la Educación HC. (2007) Maestría en Ciencias, Maestría en Administración, Maestría en Gestión Educativa HC. (2007) Ingeniero Químico Industrial (1975) Diplomado en Gestión de Proyectos de Innovación Educativa (España, 2006), Diplomado en Potenciación Gerencial (1997), Diplomado en Desarrollo Directivo (2000) Profesor de Carrera Profesional - Investigador de nivel Medio Superior; Superior y Posgrado (1980 a la fecha). Director de Educación Media Superior

(2005 - 2008); Jefe de Investigación de UPIICSA. Director de CECyT N° 2 (1996-2003), Subdirector Administrativo de CECyT N° 2 (1993-1996). En la iniciativa privada: Gerente de Producción, Gerente de Abastecimiento, Gerente de Materiales, Gerente de Operaciones y Gerente de Marketing para diversas Empresas Transnacionales (1974-1993).