

Redes de Ingeniería

E-ISSN: 2248-762X

Vol. 8 No. 1

Enero-Junio 2017

redesingenieria.ud@correo.udistrital.edu.co

revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/REDES/index



**UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**

DIRECTIVAS

Carlos Javier Mosquera S. (E)

Rector

Roberto Ferro Escobar

Decano Facultad de Ingeniería

REVISTA REDES DE INGENIERÍA

M.Sc. Jorge Enrique Salamanca Céspedes

Editor de la revista, Universidad Distrital Francisco José de Caldas – Colombia

COMITÉ EDITORIAL

Dr. Juan Manuel Cueva Lovelle

Universidad de Oviedo - España

Dr. Oscar Sanjuán

ElasticBox - Estados Unidos

Dr. Ruben Aristides Gonzalez Crespo

Universidad Internacional de la Rioja – UNIR - España

COMITÉ CIENTÍFICO

Dr. Giovanni Mauricio Tarazona Bermudez

Universidad Distrital Francisco José de Caldas - Colombia

Dr. Cristina Pelayo

Universidad de Oviedo - España

Dr. Daniel Burgos

Universidad Internacional de la Rioja- Unir - España

Dr. Edward Rolando Núñez

Universidad Carlos III de Madrid - España

Dr. I-Hsien Ting

National University of Kaohsiung - China

Dr. Jordán Pascual

Universidad de Oviedo - España

Dr. Luis Joyanes

Universidad Pontificia de Salamanca - España

Dr. Luz Andrea Rodríguez

Universidad de los Libertadores - Colombia

Dr. Manuel Pérez

Universidad de Vigo - España

Dr. María Mercedes Larrondo

Florida Atlantic University - Estados Unidos

Dr. Pablo Jojoa

Universidad del Cauca - Colombia

Dr. Paulo Gaona

Universidad Distrital Francisco José de Caldas - Colombia

Dr. Rafael Bello

Universidad Central de las Villas - Cuba

Dr. Raul Ramos

Universidad Industrial de Santander - Colombia

Dr. Roberto Ferro Escobar

Universidad Distrital Francisco José de Caldas - Colombia

Dr. Wilfrido Moreno

University of South Florida - Estados Unidos

PhD. Vicente García Díaz

Universidad de Oviedo -España

COMITÉ EVALUADOR

PhD. Rafael Torres Amaris

Universidad Industrial de Santander – Colombia

PhD. Jorge Enrique Espindola Díaz

Universidad Pedagógica Y Tecnológica De Colombia – Colombia

M.Sc. Mónica Espinosa Buitrago

Universidad Santo Tomás - Colombia

M.Sc. Jaime Vitola Oyaga

Universidad Santo Tomás - Colombia

MBA. Daniel Orozco

Pontificia Universidad de Chile - Chile

PREPARACIÓN EDITORIAL

Edna Johanna Cañas

Gestora editorial

Jenny Alexandra Jiménez

Corrección de Estilo

David Mauricio Valero

Diagramación

REVISTA REDES DE INGENIERÍA

Redes de Ingeniería es una revista electrónica Institucional adscrita a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Es una revista de carácter semestral que publica los resultados de Investigación, revisión, reflexión de la comunidad académico-científica los meses Junio y Diciembre de cada año. Posee un sistema de divulgación netamente electrónico y su primer número fue publicado en Junio del 2010.

Redes de Ingeniería es una revista arbitrada mediante un proceso de revisión entre pares de doble ciego. Las opiniones expresadas de esta publicación pueden ser reproducidas citando la fuente.

COBERTURA TEMÁTICA

Las líneas de publicación de la revista están enmarcadas en las áreas de las Telecomunicaciones, Electrónica, Sistemas, Bioingeniería, Eléctrica, Medio Ambiente, Educación, Industrial, Geomática; además de todos aquellos temas que converjan hacia la Ingeniería.

MISIÓN

La revista Redes de Ingeniería tiene el objetivo de servir como medio de divulgación de los resultados obtenidos a través procesos de investigación, reflexión, indagación en entornos Educativos y Empresariales en temas de actualidad en “pro” del mejoramiento de la calidad de vida de la sociedad en general.

PÚBLICO OBJETIVO

Investigadores, docentes, estudiantes y demás profesionales de las ramas de la Ingeniería que deseen estar a la vanguardia de las teorías y/o tecnologías que rigen y regirán el mundo moderno desde un enfoque científico.

REPRODUCCIÓN

Los textos de los artículos son publicados bajo la responsabilidad de los autores y no reflejan el pensamiento de la revista, ni comprometen de ninguna manera a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

INDEXACIÓN

La revista Redes de Ingeniería es una publicación electrónica registrada en EBSCO HOST, en el índice bibliográfico e-revistas, Actualidad Iberoamericana, Índice de Revistas Latinoamericanas en ciencias PERIÓDICA y Latindex.



Redes de Ingeniería
E-ISSN: 2248-762X
 Vol. 8 No. 1
 Enero-Junio 2017

T abla de Contenido

EDITORIAL 4

Algoritmo para la estimación de la frecuencia instantánea en señales de fase variante en el tiempo usando la transformación local polinomial de Fourier

Algorithm for the estimation of the instantaneous frequency in time-varying phase signals using the local polynomial Fourier transform

Herbert Enrique Rojas Cubides, María Carolina Forero Mejía

5-17

Esquemas de calidad de servicio en redes Li-Fi enfocados en ambientes de quinta generación

Quality of service schemes in Li-Fi networks focus on 5th generation environments

Jesús Paternina, Octavio Salcedo

18-28

Identificación de funciones complementarias para la estación terrena satelital de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

Identification of complementary functions for the satellite ground station of the Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

María Paula Maury Atencia, Oscar Fernando Vera Cely

29-35

Sistema de monitorización de contaminación ambiental alimentado con energía solar fotovoltaica para una estación de autobús

Monitoring system of environmental pollution powered by photovoltaic solar energy for a bus station

Eneil Quintero Arenas, Sergio Basilio Sepúlveda Mora, Sergio Iván Quintero Ayala

36-46

Uso de conceptos estructurantes para la enseñanza de circuitos eléctricos en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Use of structuring concepts for electrical circuits teaching in the Engineering Faculty at the Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Jorge Enrique Salamanca Céspedes, Adriana Patricia Gallego Torres

47-55



El equipo editorial de la revista *Redes de Ingeniería* perteneciente a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, presenta a la sociedad de la ciudad de Bogotá D.C., de la región, del país y del mundo, la producción académica de los diversos sectores que dejan huella con sus aportes a la comunidad académica, a partir de artículos que dan cuenta de diferentes estados de procesos y proyectos de investigación, entre otros.

Quienes con sus artículos aportan a nuestra revista dan muestra del potencial que tenemos los que nos desempeñamos en el mundo académico; así, es necesario que quienes estamos vinculados a las universidades de una u otra forma aportemos a la producción académica, por ningún motivo es posible concebir que los docentes universitarios no tengan producción desde sus diferentes posiciones y con los diferentes grados de formación, pues a mayor grado de formación se esperarían que la producción aumentara, es parte de lo que la sociedad espera.

Como siempre, este es un espacio de reconocimiento de los saberes de una comunidad, un espacio de disertación y de aprobación de los nuevos conocimientos y resultados de la actividad académica y científica.

En el último resultado del ranking U-Sapiens, la Universidad Distrital se encuentra en uno de los primeros puestos de las universidades de la capital y dentro de las veinte primeras de Colombia, lo cual debe motivarnos a seguir en la línea de la investigación y de la producción académica, pues somos una universidad joven con buenos resultados; siguiendo la idea anterior, cabe resaltar que nuestras directivas se deben esforzar en conseguir más y mejores recursos para que, junto con la expansión de nuestro campus, se dé la expansión de los aportes que hagan de nuestra universidad la más grande y la mejor de Bogotá D.C., correspondiente a una sociedad que espera de nosotros los mejores resultados.

Cuando en la región ganemos el reconocimiento, seguro ganaremos la confianza de los diferentes gremios para trabajar junto al sector productivo y lograr hacer de nuestra región la más grande.

Jorge Enrique Salamanca Céspedes
Editor Revista *Redes de Ingeniería*
Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas



Algoritmo para la estimación de la frecuencia instantánea en señales de fase variante en el tiempo usando la transformación local polinomial de Fourier

Algorithm for the estimation of the instantaneous frequency in time-varying phase signals using the local polynomial Fourier transform

Herbert Enrique Rojas Cubides¹ María Carolina Forero Mejía²

Para citar este artículo: Rojas, H. y Forero, M. (2017). Algoritmo para la estimación de la frecuencia instantánea en señales de fase variante en el tiempo usando la transformación local polinomial de Fourier. *Revista Redes de Ingeniería*. 8(1), 5-17, doi: <https://doi.org/10.14483/2248762X.10089>.

Recibido: 18-febrero-2016 / Aprobado: 14-julio-2017

Resumen

La transformación local polinomial de Fourier (LPFT) es una representación tiempo-frecuencia (TFR) que generaliza los resultados obtenidos por la transformación de Fourier de corto tiempo (STFT); esta herramienta matemática puede ser empleada para estimar la frecuencia instantánea (IF) ($\omega_1(t) = d\varphi(t)/dt$) y sus derivadas ($\omega_m(t) = d^{m-1}\omega_1(t)/dt^{m-1}$) en señales no estacionarias o señales de fase variante en el tiempo ($\varphi(t)$). Varias publicaciones presentan diferentes métodos para calcular la LPFT; sin embargo, estos trabajos no describen de manera completa un algoritmo para su implementación computacional o requieren del cálculo de funciones o transformaciones adicionales. Este artículo propone un algoritmo basado en la definición de la aproximación local polinomial (LPA) y el uso del periodograma local polinomial (LPP) como estimador de la IF y sus derivadas; asimismo, se presenta la validación del algoritmo propuesto y se consideran los errores (SR-MSE) en el cálculo de los estimados de la LPFT. Finalmente, se determinan los costos computacionales a

partir de un caso de estudio. Los resultados muestran que el error en el cálculo de la LPFT disminuye dependiendo del ancho de la función ventana v de la resolución dada a los posibles estimados de $\omega_m(t)$, aunque esto provoque un incremento en la cantidad de operaciones realizadas.

Palabras clave: aproximación local polinomial, estimadores no paramétricos, frecuencia instantánea, periodograma local polinomial, transformación local polinomial de Fourier.

Abstract

The local polynomial Fourier transform (LPFT) is a time-frequency representation (TFR) that generalizes the results obtained by the short-time Fourier transform (STFT). This mathematical tool can be used to estimate the instantaneous frequency (IF) ($\omega_1(t) = d\varphi(t)/dt$) and its derivatives ($\omega_m(t) = d^{m-1}\omega_1(t)/dt^{m-1}$) into non-stationary signals or time-varying phase signals ($\varphi(t)$). Several publications present different methods for

1. Candidato a doctor en ingeniería eléctrica; profesor asociado Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo eléctrico: herojasc@udistrital.edu.co
2. Ingeniera eléctrica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: mcforerom@correo.udistrital.edu.co

calculating the LPFT. However, these studies do not fully describe an algorithm for its computational implementation or require the calculation of additional functions or transformations. This paper proposes an algorithm based on the definition of the polynomial local approximation (LPA) and the use of the polynomial local periodogram (LPP) as an estimator of the FI and its derivatives. Likewise, the validation of the proposed algorithm is presented and errors (SRMSE) are considered in the calculation of the LPFT estimates. Finally, computational costs are determined from a case study. The results show that the error in the LPFT calculation decreases depending on the bandwidth of the window function and the resolution given to the possible $\omega_m(t)$ estimates, although this process causes an increase in the number of operations performed.

Keywords: instantaneous frequency, local polynomial approximation, local polynomial Fourier transform, local polynomial periodogram, non-parametric estimators.

INTRODUCCIÓN

El procesamiento digital de señales (DSP) facilita la extracción de información y de las características de una señal que no son fácilmente perceptibles durante su registro [1]; este proceso incluye la adquisición de la señal bajo, el alistamiento y organización de los datos, la selección de la técnica que se usará para la extracción de la información y la estimación de características particulares de la señal [2].

Respecto a las técnicas usadas para analizar la señal y procesar sus características, estas pueden aplicarse en el dominio del tiempo o el dominio de la frecuencia. Una alternativa que integra las ventajas de estos métodos, son las que combinan el análisis en el tiempo y la frecuencia, conocidas como representaciones tiempo-frecuencia (TFR); estos métodos facilitan la extracción de las características de una señal a partir del análisis de algunos parámetros tales como: los niveles de amplitud en bandas tiempo-frecuencia, la concentración de energía, los coeficientes de descomposición, etc. [3].

En función del enfoque que se le quiera dar al análisis, las TFR pueden ser categorizadas en dos grupos: las que emplean funciones tiempo frecuencia (TFF) y las que se basan en distribuciones tiempo-frecuencia (TFD). En el primer grupo se encuentran las TFR lineales, las cuales se caracterizan por ser expresadas en forma de integrales, usan una función que actúa como el núcleo (kernel) y evitan la aparición de términos cruzados, lo cual facilita la interpretación de singularidades. La transformación de corto tiempo de Fourier (STFT), la transformación de wavelets (WT), la transformación S (ST) y la transformación armónica de corto tiempo (STHRT) son algunas de las TFR lineales más usadas en los últimos años.

Estas herramientas matemáticas se enfocan en la estimación de la frecuencia instantánea (IF) de la señal, la cual es una generalización del término frecuencia constante aplicada a señales estacionarias o periódicas, pero extendida a señales cuyo ángulo de fase varía con respecto al tiempo. Este concepto de IF se vuelve mucho más relevante si los cambios en la fase son irregulares, pues bajo esta condición, las nociones de periodicidad y frecuencia pierden completamente su sentido; adicionalmente, si se tiene en cuenta que en ciencias e ingeniería es común el análisis y procesamiento de señales de fase variante, señales multicomponentes y señales que presentan rápidas variaciones de amplitud, la estimación de la IF en este tipo de señales se torna una problemática de estudio permanente.

En las últimas décadas, la aplicación de TFR para la extracción de información y la estimación de la IF ha fijado su atención en algunas transformaciones que rotan el plano tiempo-frecuencia (transformaciones rotadas); estas técnicas aprovechan algunas de sus propiedades como la buena concentración de energía y la identificación de variaciones tiempo-frecuencia, para conocer información relevante de la señal [3], [4]. Algunos ejemplos de estas son: la transformación Radon-Wigner (RWT), la transformación fraccional de Fourier (FRFT) y la transformación local polinomial de Fourier (LPFT).

La LPFT es una generalización matemática de la STFT que conserva sus propiedades de linealidad y simplicidad. La LPFT se basa en el teorema de aproximación de Weierstrass [4] y ha sido usada en aplicaciones donde las señales bajo estudio son, por lo general, no-estacionarias y variantes en el tiempo [5]; adicionalmente, la LPFT se relaciona con el periodograma local polinomial (LPP), el cual es una distribución de energía tiempo-frecuencia sobre un espacio de $(m + 1)$ dimensiones, donde m es el orden polinomial (grado) de la LPFT.

La ventaja de la LPFT sobre otras TFR lineales es que utiliza una función polinomial en su exponente complejo para describir las características de la IF $-\omega_1(t)$ en señales de fase variante en el tiempo, conocidas también como señales de fase polinomial (PPS). Mientras otras técnicas como la STFT, la WT o la distribución de Wigner-Ville (WVD) se enfocan en obtener los estimados de $\omega_1(t)$ con una buena resolución, la LPFT proporciona información de $\omega_1(t)$ y de sus variaciones respecto al tiempo $-\omega_m(t) = d^m \omega_1(t) / dt$. Este proceso permite estimar con mayor precisión las variaciones tiempo-frecuencia de la señal, mejora la concentración de energía y aumenta la resolución de la IF y, en general, del espectro de frecuencia [5].

Debido a que su desarrollo es relativamente reciente, la LPFT ha recibido considerable atención en la última década y ha sido usada en variedad de aplicaciones tales como: voz, audio, radar, sonar, señales biológicas, señales geofísicas, supresión de interferencias en comunicaciones, entre otros. Una síntesis de estas aplicaciones se puede encontrar en [6].

Por lo general, el proceso de cálculo de la LPFT se asocia con la búsqueda de los coeficientes $\bar{\omega}(t) = \{\omega_1(t), \omega_2(t), \omega_3(t), \dots, \omega_m(t)\}$ que aproximan de mejor manera la fase de la señal. En la literatura, es posible encontrar varios métodos para calcular la LPFT y estimar la IF en señales de fase variante en el tiempo; no obstante, las alternativas más usadas para esta tarea se basan

en la transformación polinomial tiempo-frecuencia (PTFT) y el concepto de la aproximación local polinomial (LPA) [6], [7], [8], [9].

La PTFT es una herramienta desarrollada para el análisis de señales multicomponentes; esta técnica convierte una señal unidimensional de entrada en una salida multidimensional, a partir de la cual pueden obtenerse los coeficientes polinomiales de la LPFT [6]. Empleando la PTFT, la LPFT puede ser calculada así: (a) usar una función ventana (ρ_h) para dividir la señal en cierto número de segmentos, (b) modelar cada segmento como una PPS de m -orden, (c) estimar los parámetros de la fase para cada segmento usando la PTFT (d) calcular la LPFT con los parámetros obtenidos y el ancho de ventana seleccionado.

Este método tiene un alto costo computacional, ya que antes de proceder con la LPFT se debe estimar la PTFT para cada segmento de la señal, determinar la función multidimensional y encontrar su máximo; debido a esto, se han desarrollado algunos algoritmos rápidos para la PTFT basados en la transformación de fase cuadrática [10], el algoritmo Radix-2 [11], el algoritmo Radix-3 [12] y el algoritmo Split-Radix [13]. La desventaja de algunos de estos métodos es que solo funcionan cuando el número de muestras de la señal es de potencia dos. De manera que cuando esto no se cumple, se debe volver al proceso convencional que incrementa la complejidad computacional.

Por otra parte, la LPA es una técnica basada en la teoría de aproximación, propuesta y aplicada en estadística para el procesamiento escalar y el análisis multidimensional de datos. Debido a que la LPFT y el LPP guardan relación con el concepto de la LPA, esta última puede ser empleada para obtener los estimados del vector $\bar{\omega}(t) = \{\omega_1(t), \omega_2(t), \omega_3(t), \dots, \omega_m(t)\}$, empleando el LPP como estimador de los puntos de mayor concentración de energía en la LPFT, los cuales coinciden con la IF y sus derivadas. La

ventaja de este método, a diferencia del basado en la PTFT, es que su implementación facilita el cálculo directo de la LPFT y no requiere de funciones o transformaciones adicionales, reduciendo así la cantidad de pasos y operaciones que se deben realizar.

Aunque el problema de calcular la LPFT usando la LPA ya ha sido abordado en otros trabajos [7], [14], la mayoría de estos estudios se ha centrado en el análisis del error y la covarianza de las estimaciones, dejando de lado el desarrollo de métodos para el cálculo de la LPFT. Este artículo propone un algoritmo que facilita la implementación computacional de la LPFT para el análisis de señales no estacionarias o variantes en el tiempo; el algoritmo integra el concepto de la LPA y el cálculo simultáneo de los estimados de la IF y sus derivadas. Asimismo, se presenta una breve introducción a la LPFT y se valida el algoritmo propuesto con ayuda de algunas simulaciones; finalmente, se analizan los costos computacionales y se calculan los errores de los estimados de la LPFT en función de parámetros como: el tiempo de muestreo (T_s), la duración de la función ventana (h) y la resolución establecida para los posibles estimados del vector $\bar{\omega}(t)$, denotadas como $\Delta\omega_r = \Delta\omega_1, \Delta\omega_2, \dots, \Delta\omega_m$.

LA TRANSFORMACIÓN POLINOMIAL DE FOURIER Y EL PERIODOGRAMA LOCAL POLINOMIAL

La LPFT es una generalización de STFT con un polinomio en su exponente compleja y es una técnica que puede ser usada para determinar la IF de señales variantes en el tiempo y PPS. Esta transformación se define matemáticamente de la siguiente forma [5]:

$$Y_h(\bar{\omega}, t) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t+u) \rho_h(u) e^{-j\theta(u, \bar{\omega})} du \quad (1)$$

$$Y_h(\bar{\omega}, t) = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} y(t+nT_s) \rho_h(nT_s) e^{-j\theta(u, \bar{\omega})}$$

Dónde, $y(t+u)$ es la señal bajo estudio T_s , es el tiempo de muestreo de la señal, $u = nT_s$, $\rho_h(u)$ es una función ventana que debe satisfacer algunas propiedades: $[\rho_h(u) \geq 0; \rho_h(0) = \max \rho_h(u); \rho_h(u) \rightarrow 0$ cuando $u \rightarrow \infty; \int_{-\infty}^{\infty} \rho_h(u) du = 1]$, h es el ancho de banda o duración de la ventana y la función $e^{-j\theta(u, \bar{\omega})}$ es el núcleo de la transformación, el cual es definido como:

$$\theta(u, \bar{\omega}) = \omega_1 u + \omega_2 \frac{u^2}{2} + \dots + \omega_m \frac{u^m}{m!} \quad (2)$$

A partir de esta definición, se puede establecer un conjunto de coeficientes $\bar{\omega}(t, h)$ con la información de la IF y sus derivadas de manera que [8]:

$$\bar{\omega}(t) = (\omega_1(t), \omega_2(t), \omega_3(t), \dots, \omega_m(t)) \quad (3)$$

Donde, $\bar{\omega} \in R^m$ y m es el grado de la LPFT. A partir de la definición mostrada en la ecuación (1), se puede notar que $Y_h(\bar{\omega}, t)$ es una función periódica de $\bar{\omega}(t, h)$, con periodos iguales a $2\pi s! / T^s$, para $s = 1, 2, \dots, m$; de esta manera, el rango de valores que puede asumir cada estimador que hace parte del vector $\bar{\omega}(t, h)$ es [8]:

$$Y_h(\bar{\omega}, t) = Y_h\left(\omega_1 + \frac{2\pi}{T}, \omega_2 + \frac{4\pi}{T^2}, \dots, \omega_m + \frac{2\pi m!}{T^m}, t\right) \quad (4)$$

De manera similar al periodograma que se obtiene a partir de la STFT, el cual es definido como una distribución de energía en el plano tiempo-frecuencia $(t - \omega)$, el LPP puede ser interpretado como una distribución de energía tiempo-frecuencia de una señal sobre el espacio $\{t - (\omega_1(t), \omega_2(t), \omega_3(t), \dots, \omega_m(t))\}$ y se define matemáticamente así:

$$I_h(\bar{\omega}, t) = |Y_h(\bar{\omega}, t)|^2 \quad (5)$$

El LPP permite establecer la manera en que la energía de una señal se distribuye y, además, puede ser usado para estimar la IF de una señal [7], [14]. Se puede notar que para el caso particular en el que $m = 1$, la definición de $Y_h(\bar{\omega}, t)$ en la ecuación (1)

se reduce a la definición convencional de la STFT, y el periodograma polinomial $I_h(\bar{\omega}, t)$ en la ecuación (5) convergerá al periodograma convencional en el plano tiempo-frecuencia.

LA APROXIMACIÓN LOCAL POLINOMIAL APLICADA AL CÁLCULO DE LA LPFT

Aunque el problema de calcular la IF de una señal puede ser resuelto de diferentes maneras, la LPA puede ser aplicada en las definiciones de la LPFT y el LPP para aproximar la fase variante de una señal en el tiempo; de hecho, la LPA utiliza series de Taylor truncadas o limitadas hasta un orden m para obtener una función polinomial cercana a la fase de la señal bajo estudio. Posteriormente, la LPA utiliza dicha expansión de manera local para aproximar la fase de la señal sobre un pequeño intervalo de tiempo.

Así, esta expansión local es usada para calcular los estimados de la fase de la señal para un solo instante de tiempo t , por lo que para el siguiente instante de tiempo, estos cálculos deben ser repetidos.; esto determina el carácter no-paramétrico de la estimación punto a punto en que se basa la LPA y, por consiguiente, el cálculo de la LPFT.

Es importante aclarar que el uso de la LPA garantiza replicar las propiedades de cada estimado de $\bar{\omega}(t, h)$ con respecto a las componentes polinomiales de la IF; de esta forma, para cada instante de tiempo se obtienen un conjunto de coeficientes de la función polinomial que hace parte del exponente complejo de la LPFT. Esta es la diferencia principal entre aplicar la LPA no paramétrica y el uso de estimados paramétricos donde los coeficientes de la serie polinomial son constantes en todos los intervalos de tiempo analizados [15], [16], [17].

A partir de las definiciones presentadas en la sección anterior, el modelo de señal definido en este trabajo para aplicar la LPA debe ser de la forma:

$$y(t) = A \exp(j\varphi(t)) \quad (6)$$

Donde, $\varphi(t)$ es una función arbitraria que expresa la fase polinomial de la señal y A representa la amplitud de la misma. De esta manera, la IF de la señal es definida como:

$$IF = \omega_1(t) = d\varphi(t)/dt \quad (7)$$

Para que la LPA pueda considerarse como un método adecuado para estimar la IF y pueda ser integrada con los conceptos de la LPFT y el LPP, la función de la fase polinomial $\varphi(t)$ debe ser diferenciable respecto al tiempo. A partir de la ecuación (2) y de la ecuación (7), es posible afirmar que para mejorar la precisión en el cálculo de las características tiempo-frecuencia de una señal la LPFT debe ser de orden $m \geq 2$, de lo contrario, todas las definiciones presentadas convergerán a la definición convencional de la STFT.

ALGORITMO PARA EL CÁLCULO DE LA LPFT Y EL LPP USANDO LA LPA

El objetivo de aplicar la LPA en el cálculo de la LPFT y el LPP es determinar el argumento $\varphi(t)$ de la señal $y(t)$ definida en la ecuación (6); este argumento contiene la IF de la señal y sus respectivas derivadas con respecto al tiempo, los cuales se definen como los estimados $\hat{\omega}(t, h)$ de la LPFT. Para determinar estos valores en cada instante de tiempo, el algoritmo se basa en la construcción de vectores, matrices o arreglos finitos $(\underline{\omega})$ de r –dimensiones (con $r = 1, 2, \dots, m$) formados por los posibles valores que pueden tomar los estimados de la IF y sus derivadas. Posteriormente, la LPA prueba todas las combinaciones posibles en los coeficientes de $\bar{\omega}(t, h)$ y busca los puntos de mayor concentración de energía en el LPP aplicando el siguiente problema de optimización [7], [14]:

$$\hat{\omega}(t, h) = \underset{\bar{\omega} \in Q \subset R^m}{\operatorname{arg\,max}} I_h(\bar{\omega}, t) \quad (8)$$

La adecuada localización de $\hat{\omega}(t, h)$ usando el concepto de la LPA se asegura mediante la función ventana ρ_h ; esta función solo considera las observaciones en la vecindad del punto central t sobre el cual se está calculando la aproximación local. Debido a esto, existen diferentes formas de resolver el problema de optimización presentado en la ecuación (8). En este artículo se propone el siguiente procedimiento:

- Seleccionar el orden m del polinomio para $\theta(u, \bar{\omega})$ definido en la ecuación (2).
- Seleccionar una resolución o tamaño de paso ($\Delta\omega_m$) con el fin de variar el valor de los posibles estimados de la IF y sus derivadas. Puede seleccionarse una misma resolución para todos los estimados $\bar{\omega}(t)$ en conjunto o por separado.
- Variar de manera simultánea cada uno de los coeficientes asociados a los estimados, desde cero o un valor límite inferior en pasos $\Delta\omega_m$ y hasta el límite superior establecido.
- Calcular el LPP para todas las combinaciones de $\bar{\omega}(t, h)$.
- Usar la ecuación (8) para determinar el conjunto de estimados $\bar{\omega}(t, h)$ en los cuales el LPP muestra su valor máximo.
- Calcular el LPP general o el LPP normalizado según las necesidades del estudio.
- Repetir los pasos (d) a (f) para cada instante de tiempo.
- Evaluar el comportamiento del LPP simple o normalizado y su relación con la función ventana y el tiempo de muestreo.

El algoritmo completo para la implementación computacional de la LPFT para órdenes $m \leq 3$ se muestra en el Anexo 1. Al aplicar este algoritmo se debe tener presente que el proceso para determinar los estimados $\bar{\omega}(t)$ debe realizarse para cada instante de tiempo t ; además, el nivel de precisión con el que se desee conocer el comportamiento de la IF dependerá del orden polinomial definido para calcular la LPFT y, por

consecuente, de los coeficientes que se integran gracias a la LPA. Por esta razón, dependiendo del tipo de señal a analizar y de la resolución $\Delta\omega_m$ definida para cada uno de los coeficientes de $\bar{\omega}(t, h)$, será conveniente o no escoger un polinomio de gran orden.

VALIDACIÓN DEL ALGORITMO PROPUESTO

Señal de análisis

Con el fin de aplicar la LPA y los estimadores simultáneos en el cálculo de la LPFT y el LPP, se ha definido una señal variante en el tiempo cuya expresión matemática es:

$$y(t) = e^{j(2\pi t + 4\pi t^2)} \quad (9)$$

$$\varphi(t) = 2\pi t + 4\pi t^2$$

Al evaluar la señal bajo estudio se puede observar que su fase posee una primera derivada $IF = \omega_1(t) = d\varphi(t)/dt = 2\pi + 8\pi t$ [1/s], la cual varía en función del tiempo; además, cuenta con una segunda derivada $\omega_2(t) = d\omega_1(t)/dt = 8\pi$ [1/s²], la cual es constante en el tiempo.

Si se revisa la definición de la LPFT — ecuaciones (1) y (2) — puede notarse que el argumento $\theta(u, \bar{\omega})$ del kernel de transformación que mejor se ajusta a esta señal es un polinomio de orden $m = 2$; de esta manera, el núcleo $\theta(u, \bar{\omega})$ de la LPFT será:

$$\theta(u, \bar{\omega}(t)) = \omega_1(t) \cdot u + \omega_2(t) \cdot \frac{u^2}{2} \quad (10)$$

A partir de este análisis, el algoritmo propuesto para el cálculo de la LPFT deberá buscar los estimados $\hat{\omega}_1(t)$ y $\hat{\omega}_2(t)$ para cada instante de tiempo. Debido a que el orden del polinomio que compone el kernel de la LPFT es quien define la complejidad del cálculo de la IF y sus derivadas, en aquellos casos en los que se desconozca la expresión

matemática o la naturaleza de la señal bajo estudio, se sugiere iniciar el proceso evaluando el comportamiento de $\omega_1(t)$ y, posteriormente, analizar sus derivadas partiendo de un orden bajo hasta que una de estas muestre un comportamiento constante respecto al tiempo. En este sentido, lo recomendable es que el orden del polinomio del kernel sea igual a la cantidad de variaciones de la IF más uno; sin embargo, la experiencia muestra que es posible obtener buenos resultados para señales variantes en el tiempo con polinomios de órdenes bajos reduciendo la cantidad de cálculos realizados [6], [8], [18].

Parámetros de simulación

Siguiendo el algoritmo propuesto, a continuación, se muestran los parámetros que se definieron para las simulaciones:

- Duración de la señal: $0 \leq t \leq 1$ [s].
- Tiempos de muestreo de la señal:
- $T_s = \{0.1, 0.01, 0.002\}$ [s].
- Definir los límites para los estimados:
- $0 \leq \hat{\omega}_1 \leq 30$ [1/s] y $0 \leq \hat{\omega}_2 \leq 30$ [1/s²].
- Resolución de los estimados locales ($\Delta\hat{\omega}_m$): en este caso, $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2 = \{0.05, 0.1\}$.
- Tipo de ventana $\rho_h(u)$: rectangular simétrica, es decir $\rho_h(u) = 1$ si $|u| \leq u_h/2$.
- Duración de la ventana
- $(u_{h_s}) = \{0.51, 0.91, 4.1, 20.1, 50.1, 80.1, 100.1\}$ [s]

En el caso de la resolución usada para la búsqueda de los estimados, se definió que los parámetros $\Delta\omega_1$ y $\Delta\omega_2$ sean de igual magnitud (aunque tienen diferentes unidades); esto se hizo para reducir la cantidad de operaciones realizadas y ajustar la simulación usando una sola variable. En total, se estudiaron 42 casos analizando el comportamiento de la LPFT, la magnitud del LPP, los estimados de la IF ($\hat{\omega}_1$) y su primera derivada ($\hat{\omega}_2$), el error de los estimados obtenidos por el algoritmo y los tiempos de cómputo empleados para el cálculo de la LPFT.

Resultados de simulación

En la Figura 1, la Figura 2 y la Figura 3, se muestran algunos de los resultados obtenidos de las simulaciones. Como ya se mencionó, con el fin de evitar la influencia de una función ventana con un único valor máximo (por ejemplo, función Gaussiana), se utilizó una función ventana rectangular. La Figura 1 muestra la distribución de energía de la señal, definida en (9), en función de la IF $\omega_1(t)$ y de su primera derivada $\omega_2(t)$. Teniendo en cuenta la duración de la señal y el periodo de muestreo, se puede apreciar en cada simulación diez LPP, uno para cada instante de tiempo t .

En la Figura 1 se puede observar que al aumentar la duración de la función ventana el LPP se tiende a concentrar; esto proporciona una mayor resolución al momento de identificar los estimados $\hat{\omega}(t)$. En la Figura 1(a), la Figura 1(b) y la Figura 1(c) cada LPP muestra un único valor máximo para cada instante de tiempo evaluado; este valor corresponde al punto de mayor concentración de energía de la señal y posee un conjunto de estimados $\hat{\omega}_{1_{max}}(t)$ y $\hat{\omega}_{2_{max}}(t)$. Ahora bien, cuando la duración de la ventana aumenta por encima de $u_h = 50.1$ [s], Figura 1(d), ya no se diferencia con claridad un solo valor máximo en el LPP, lo cual se relaciona con la pérdida de resolución en el cálculo de la LPFT; esto hace que los estimados de la frecuencia calculados presenten un mayor error y no sean confiables.

Para la señal de prueba, la mejor solución local se presenta con una ventana de duración $u_h = 20.1$ [s], tal y como se muestra en la Figura 1(c). Este resultado se debe a que los valores de la IF y los de su primera derivada tienen un único máximo y el espectro de energía muestra un LPP más concentrado.

La Figura 2 muestra la vista superior de los LPP presentados en la Figura 1, desde esta perspectiva se confirma que a medida que aumenta la duración de la ventana (hasta $u_h < 50.1$ [s]) el LPP presenta

una mejor resolución y se facilita la identificación de los valores máximos de cada estimado ($\hat{\omega}_1$ y $\hat{\omega}_2$). Si se analizan los valores de $\hat{\omega}_1(t)$, se observa que estos presentan un comportamiento lineal con

respecto al tiempo, mientras que su primera derivada se mantiene constante en $25.13 \approx 8\pi [1/s^2]$. Estos resultados concuerdan con las definiciones matemáticas presentadas en sección 5.1.

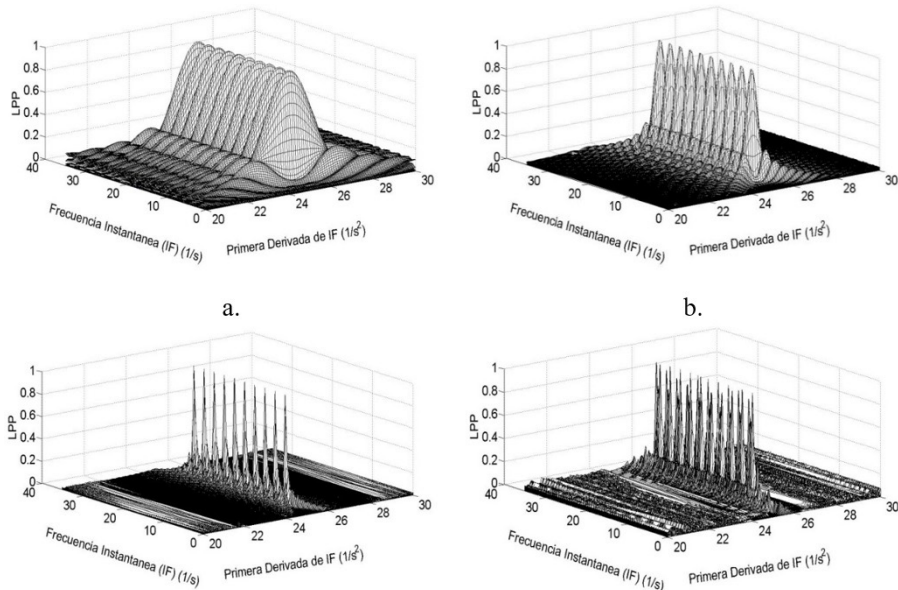


Figura 1. LPP normalizado en función de la IF ($\omega_1 = 2\pi + 8\pi t$) y su primera derivada ($\omega_2 = 8\pi$) para la señal de interés $T_s = 0.1[s]$ y $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2 = 0.1$ (a) $u_h = 4.1[s]$ (b) $u_h = 8.1[s]$ (c) $u_h = 20.1[s]$ (d) $u_h = 50.1[s]$

Fuente: elaboración propia.

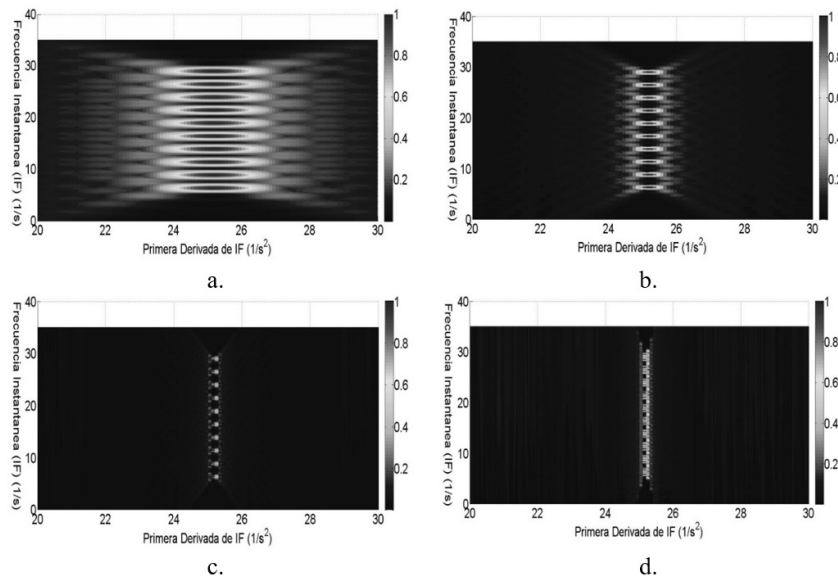


Figura 2. Vista superior del LPP en función de la IF ($\omega_1 = 2\pi + 8\pi t$) y su primera derivada ($\omega_2 = 8\pi$) para la señal de interés $T_s = 0.1[s]$ y $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2 = 0.1$ (a) $u_h = 4.1[s]$ (b) $u_h = 8.1[s]$ (c) $u_h = 20.1[s]$ (d) $u_h = 50.1[s]$

Fuente: elaboración propia.

Debido a que el algoritmo propuesto para calcular la LPFT permite conocer el valor de la IF para cualquier valor de t , los LPP obtenidos para un caso particular pueden ser analizados al observar la variación de la IF con respecto al tiempo. La Figura 3 muestra los puntos de mayor concentración de energía de $\hat{\omega}_1$ con respecto al tiempo; estos puntos se presentan en $\omega_{1,c}(t) = \{6.3, 8.8, 11.3, 13.8, 16.3, 18.8, 21.4, 23.9, 26.4, 28.9\} [s^{-1}]$ para $t = \{0, 0.1, 0.2, \dots, 0.9, 1.0\} [s]$, respectivamente.

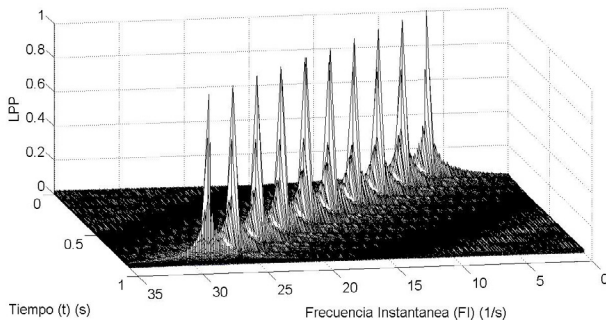


Figura 3. LPP normalizado en función de la IF (ω_1) y el tiempo (t) con $T_s = 0.1 [s]$, $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2 = 0.1$ y $u_h = 20.1 [s]$.

Fuente: elaboración propia.

ANÁLISIS DE ERROR

Para evaluar la precisión con la que se calcularon los estimados de la IF, se utilizó como indicador la raíz cuadrada del error medio cuadrático (RMSE); este indicador permite obtener un valor global del error para todos los intervalos de tiempo en vez de obtener errores individuales de $\hat{\omega}_1(t)$ y $\hat{\omega}_2(t)$ para

cada instante. El RMSE se define de la siguiente manera:

$$SRMSE_m = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{s=1}^N (\omega_m(t) - \hat{\omega}_{m,c}(t))^2} \quad (12)$$

Donde, $\omega_m(t)$ son los valores teóricos y $\hat{\omega}_{m,c}(t)$ los resultados obtenidos en la simulación. La Tabla 1 y la Tabla 2 muestran el SRMSE calculado para los dos valores de $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2 = \{0.1 \text{ y } 0.05\}$. Todos los errores son calculados sobre el segmento $0 \leq t \leq 1 [s]$, para los tres tiempos de muestreo y las siete duraciones de ventana previamente establecidas.

Los resultados muestran que para cada tiempo de muestreo analizado el SRMSE se mantiene constante para ventanas en el rango $0.51 [s] \leq u_h < 50.1 [s]$ y luego aumenta, este comportamiento muestra que para el caso analizado no es necesario utilizar ventanas de gran duración para obtener errores pequeños.

Adicionalmente, si se comparan los resultados presentados en la Tabla 1 y la Tabla 2, se observa que para una duración de ventana $u_h < 50.1 [s]$ el SRMSE es menor a 0.03 para una resolución $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2 = 0.1$ y es inferior a 0.014 cuando la resolución de los estimados es $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2 = 0.05$. Esto permite concluir que a medida que se reducen los pasos de $\Delta\omega_1$ y $\Delta\omega_2$, menores serán los

Tabla 1. SRMSE de los estimados de la IF con $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2 = 0.1$ variando $T_s [s]$ y la duración de la ventana $u_h [s]$.

$T_s [s]$ \ $u_h [s]$	0.51*	0.91*	4.1*	20.1*	50.1	80.1	100.1
0.100	0.02601	0.02601	0.02601	0.02601	0.37897	0.92145	1.22927
0.010	0.02928	0.02928	0.02928	0.02928	0.37530	0.92513	1,23454
0.002	0.02928	0.02928	0.02928	0.02928	0.37531	0.92513	1,23514
0.001	0.02881	0.02881	0.02881	0.02881	0.37529	0.92513	1,23514

* SRMSE constante con respecto a T_s

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. SRMSE de los estimados de la IF con $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2 = 0.05$ variando T_s [s] y la duración de la ventana u_h [s].

T_s [s] \ u_h [s]	0.51*	0.91*	4.1*	20.1*	50.1	80.1	100.1
0.100	0.01400	0.01400	0.01400	0.01400	0.13849	0.38835	0.56178
0.010	0.01339	0.01339	0.01339	0.01339	0.13873	0.38862	0.56178
0.002	0.01338	0.01338	0.01338	0.01338	0.13874	0.38862	0.56178
0.001	0.01338	0.01338	0.01338	0.01338	0.13874	0.38862	0.56178

* SRMSE constante con respecto a T_s **Fuente:** elaboración propia.

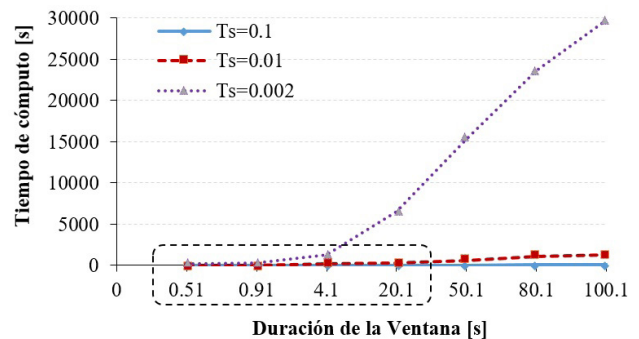
errores que se obtendrán en la estimación de la IF y sus derivadas; sin embargo, es conveniente evaluar qué implicaciones tiene reducir los pasos de $\Delta\omega_1$ y $\Delta\omega_2$ (mejorar la resolución de los estimados) en los costos computacionales. Este análisis se presenta en la siguiente sección.

COSTOS COMPUTACIONALES

Como se mencionó anteriormente, el orden polinomial m es uno de los parámetros que aumenta el tiempo de cómputo en el cálculo de la LPFT; sin embargo, la resolución de los estimados $\Delta\omega_1$ y $\Delta\omega_2$, la duración de la ventana (u_h) y el número de muestras de la señal son parámetros que también influyen en la cantidad de operaciones necesarias para obtener la LPFT de una señal. La Figura 4 muestra el comportamiento del tiempo de cómputo en función de la duración de la ventana (u_h). Para estas pruebas, se varió el número de muestras de la señal manteniendo fija su duración (entre 0 y 1 [s]), esto se consiguió cambiando el periodo de muestreo ($T_s = 0.1$ [s] para 10 muestras, $T_s = 0.01$ [s] para 100 muestras y $T_s = 0.002$ [s] para 500 muestras); además, se ajustó la resolución de los estimados en $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2 = 0.1$. Para las simulaciones se usó un ordenador con procesador de cuatro núcleos, velocidad de 2.4 GHz y memoria RAM de 8 GB.

Se puede observar en la Figura 4 que a medida que la duración de la ventana y el periodo de muestreo

aumentan, los tiempos de cálculo se incrementan. En el caso de la señal bajo estudio, es posible obtener tiempos de cómputo por debajo de los 100 [s] cuando se analiza la señal de diez muestras o de 100 muestras, junto con ventanas de duración $u_h \leq 50.1$ [s]. Por otra parte, cuando la señal tiene 500 muestras se obtienen tiempos de cómputo por debajo de los 300 [s] usando ventanas con ancho $u_h \leq 4.1$ [s].

**Figura 4.** Tiempo computacional del cálculo de la LPFT en función de la duración de la ventana para diferentes tiempos de muestreo.**Fuente:** elaboración propia.

En la Figura 4 se resalta con un cuadro punteado las duraciones de ventana que permiten obtener los estimados de la IF en tiempos menores a 60 segundos; esta franja coincide con el rango en el cual el valor del SRMSE es menor a 0.03 (Tabla 1). Esto confirma que el intervalo u_h óptimo para el análisis de la señal de prueba es $u_h \leq 50.1$ [s].

Por otra parte, la manera en que se comporta el tiempo computacional en función del período de muestreo se muestra en la Figura 5. Para estas simulaciones se usaron diferentes valores de $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2$, manteniendo constante la duración de la ventana en $u_h = 20.1$ [s]. Se puede observar que cuando $\Delta\omega_m$ disminuye (mejorando la resolución), los tiempos de cómputo aumentan; esto se debe al aumento en la cantidad de valores de $\bar{\omega}_1$ y $\bar{\omega}_2$ que se evalúan durante el cálculo de la LPFT. Si se comparan estos tiempos con los resultados del SRMSE (Tabla 1 y Tabla 2), puede notarse como al disminuir $\Delta\omega_1$ y $\Delta\omega_2$ de 0.1 a 0.05 el SRMSE disminuye de 0.03 a 0.014, respectivamente. Esta diferencia muestra que para reducir los tiempos de cómputo de la LPFT es conveniente evaluar de manera conjunta el tipo de señal analizada, el número de muestras y los valores fijados para $\Delta\omega$.

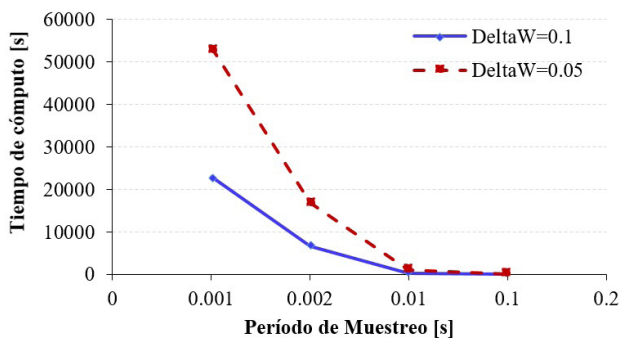


Figura 5. Tiempo computacional del cálculo de la LPFT en función del período de muestreo para diferentes

$\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2$ y con $u_h = 20.1$ [s].

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado en detalle el proceso de aplicación de la LPFT para el análisis de una señal de fase variable en el tiempo y la estimación de la frecuencia instantánea (IF) y sus derivadas sobre el espacio $t - \bar{\omega}(t, h)$; para este fin, se propuso y validó un algoritmo para el cálculo de la LPFT basado en la aplicación de la aproximación local polinomial (LPA), la combinación de

estimados simultáneos y el cálculo del periodograma local polinomial (LPP).

A partir de las simulaciones realizadas, se observó que para la obtención de resultados confiables en los estimados de $\bar{\omega}(t, h) = (\omega_1(t), \omega_2(t), \omega_3(t), \dots, \omega_m(t))$ no es necesario utilizar anchos de ventana grandes o una alta resolución en los estimados ($\Delta\omega_1$ y $\Delta\omega_2$); lo anterior es importante al momento de definir el valor de las constantes de paso ($\Delta\omega$) y los límites de evaluación de los estimados, más si se tiene en cuenta que en ciertas aplicaciones el número de muestras de una señal depende de la ventana de tiempo preestablecida y el periodo de muestreo con que se adquiere. En esos casos en los que se registran señales, discretizadas con un número de muestras fijo, la única manera de reducir el tiempo de cómputo será modificando la resolución de los estimados $\Delta\omega_m$.

Finalmente, se observó que el aumento en la resolución de los estimados ($\Delta\omega$), el aumento en la duración de la ventana (u_h) y el aumento en el número de muestras incrementan los tiempos de cómputo en el cálculo de la LPFT.

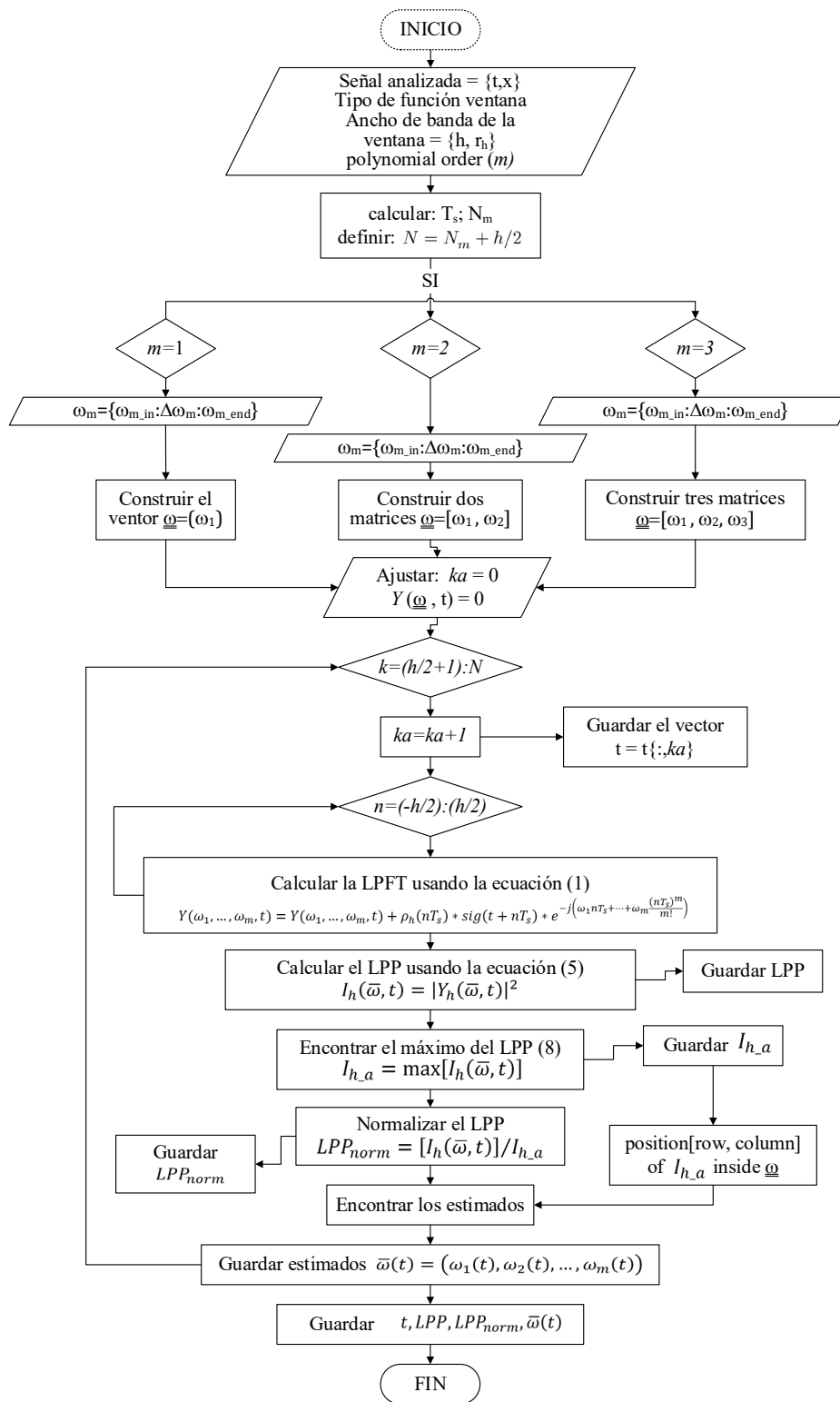
REFERENCIAS

- [1] M. Bollen y I. Gu, *Signal processing of power quality disturbances*. New York, USA: IEEE Press Series on Power Engineering, 2006. <https://doi.org/10.1002/0471931314>
- [2] J. Proakis y D. Manolakis, *Digital signal processing: principles, algorithms and applications*, 3rd ed. Prentice-Hall of India, 2000.
- [3] M. Bastiaans, "On rotated time-frequency kernels". *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 9, nº 11, pp. 378–381, 2002. <https://doi.org/10.1109/LSP.2002.805118>
- [4] E. Sejdić, I. Djurović, y J. Jiang, "Time–frequency feature representation using energy concentration: An overview of recent advances". *Digit. Signal Process.*, vol. 19, nº 1, pp. 153–183, ene. 2009.

- [5] V. Katkovnik, "A new form of the Fourier transform for time-varying frequency estimation". En *Proc URSI International Symposium on Signals Systems and Electronics ISSSE 95*, 1995, pp. 179–182. <https://doi.org/10.1109/ISSSE.1995.497962>
- [6] X. Li, G. Bi, S. Stankovic, y A. M. Zoubir, "Local polynomial Fourier transform: A review on recent developments and applications". *Signal Processing*, vol. 91, n° 6, pp. 1370–1393, jun. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2010.09.003>
- [7] V. Katkovnik, "Local polynomial periodograms for signals with the time-varying frequency and amplitude". *1996 IEEE Int. Conf. Acoust. Speech, Signal Process.*, vol. 3, pp. 1399–1402, 1996.
- [8] V. Katkovnik, "Discrete-time local polynomial approximation of the instantaneous frequency". *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 46, n° 10, pp. 2626–2637, 1998. <https://doi.org/10.1109/78.720366>
- [9] X. Li y G. Bi, "The reassigned local polynomial periodogram and its properties". *Signal Processing*, vol. 89, n° 2, pp. 206–217, feb. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2008.08.006>
- [10] M. Z. Ikram, K. Abed-Meraim, y Y. Hua, "Fast Quadratic Phase Transform for Estimating the Parameters of Multicomponent Chirp Signals". *Digit. Signal Process.*, vol. 7, n° 2, pp. 127–135, abr. 1997. <https://doi.org/10.1006/dspr.1997.0286>
- [11] G. Bi, Y. Wei, G. Li, y C. Wan, "Radix-2 DIF fast algorithms for polynomial time-frequency transforms". *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 42, n° 4, pp. 1540–1546, oct. 2006. <https://doi.org/10.1109/TAES.2006.314595>
- [12] G. Bi y Y. Ju, "Radix-3 fast algorithms for polynomial time frequency transforms". *Signal Processing*, vol. 88, n° 9, pp. 2316–2322, sep. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2008.03.018>
- [13] G. Bi y Y. Wei, "Split-Radix Algorithms for Arbitrary Order of". vol. 55, n° 1, pp. 134–141, 2007.
- [14] V. Katkovnik, "Nonparametric estimation of instantaneous frequency". *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 43, n° 1, pp. 183–189, 1997. <https://doi.org/10.1109/18.567676>
- [15] S. Peleg y B. Porat, "The Cramer-Rao lower bound for signals with constant amplitude and polynomial phase". *Signal Process. IEEE Trans.*, vol. 39, n° 3, pp. 1989–1992, 1991. <https://doi.org/10.1109/78.80864>
- [16] P. Djuric y S. Kay, "Parameter estimation of chirp signals". *Acoust. Speech Signal Process. ...*, vol. 3, n° 17, pp. 2118–2126, 1990. <https://doi.org/10.1109/29.61538>
- [17] D. Rife y R. Boorstyn, "Single tone parameter estimation from discrete-time observations". *Inf. Theory, IEEE Trans.*, vol. 1, n° 5, 1974.
- [18] X. Li y G. Bi, "Uncertainty principle of the second-order LPFT". en *2009 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 2009, pp. 325–328.



Anexo 1. Algoritmo para el cálculo de la LPFT



Fuente: elaboración propia.



Esquemas de calidad de servicio en redes Li-Fi enfocados en ambientes de quinta generación

Quality of service schemes in Li-Fi networks focus on 5th generation environments

Jesús Paternina¹ Octavio Salcedo²

Para citar este artículo: Paternina, J. y Salcedo, O. (2017). Esquemas de calidad de servicio en redes Li-Fi enfocados en ambientes de quinta generación. *Revista Redes de Ingeniería*. 8(1), 18-28, doi: <https://doi.org/10.14483/2248762X.12056>.

Recibido: 23-mayo-2017 / **Aprobado:** 9-agosto-2017

Resumen

Este documento, corresponde a una validación de las necesidades que tienen las muy recientes redes Li-Fi con respecto a servicios en tiempo real, los cuales requieran calidad de servicio, apuntando a características propias de las futuras redes de quinta generación. Este trabajo sirvió de base para establecer el aseguramiento de calidad de este tipo de redes en una metodología que se describirá en detalle en una futura publicación.

Palabras clave: 5G, Li-Fi (*light fidelity*), VLC (*visible light communication*), VoIP.

Abstract

This paper corresponds to a validation of the needs of the very recent Li-Fi networks with respect to real-time services that require quality of service, pointing to features of future 5th generation networks. This work served as a basis to establish the quality assurance of this type of networks in a methodology that will be described in detail in a future publication.

Keywords: 5G, Li-Fi (*Light Fidelity*), VLC (*Visible Light Communication*), VoIP.

-
1. Candidato a magister en Ciencias de la Información y las Comunicaciones por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Docente asociado en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Correo electrónico: jmpaterninad@udistrital.edu.co
 2. Doctor en Ingeniería Informática por la Universidad Pontificia de Salamanca, España. Docente de planta en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Correo electrónico: osalcedo@udistrital.edu.co

INTRODUCCIÓN

Las necesidades de comunicación de los seres humanos han evolucionado a lo largo de la historia, conforme evoluciona la tecnología y los recursos que se proveen para la interacción de las sociedades. Desde aquellos remotos tiempos en los que un cable submarino conectaba a dos continentes, hasta las ahora sofisticadas y cada vez más elaboradas redes de comunicaciones basadas en internet, los esfuerzos en ingeniería han tenido que resolver muchos retos inherentes en los procesos de comunicaciones basados en el esquema de transmisión de un mensaje a través de un medio determinado; sin embargo, ahora este mensaje demanda muchos más requerimientos, complejizando de esta manera los algoritmos y metodologías que garanticen una verdadera experiencia del servicio excepcional [1].

El objeto de esta investigación son los servicios en tiempo real, normalmente conocidos como servicios de video llamada, voz sobre red IP, *streaming* e IoT, sobre redes Li-Fi en los futuros entornos de quinta generación, basados en los estudios de la 5G PPP *Architecture Working Group*; estos servicios en tiempo real requieren una infraestructura confiable y robusta, la cual ofrezca una completa satisfacción del usuario para el uso de aplicaciones y servicios que cada día aumentan de forma considerable en el panorama de tecnologías de usuario final. El uso de las aplicaciones está orientado a los usuarios individuales a través de redes sociales o apps con fines particulares, como WhatsApp o Skype, pero esto no excluye a los usuarios corporativos que cada vez requieren plataformas más eficientes, robustas y a la vez flexibles, como apoyo a su objeto de negocio. Es un hecho que la tecnología es el apalancamiento fundamental para el desarrollo económico de cualquier organización en cualquier industria, y qué mejor que las redes inalámbricas para proyectar el crecimiento de conectividad que se avecina, además de, lo mejor de todo, asegurarlo como una realidad.

Todo esto solo confirma la necesidad de evaluar las posibilidades de interconexión a través de redes pensando en las nuevas posibilidades, como en este caso las redes Li-Fi y su posible integración con escenarios proyectados hacia quinta generación.

No es un secreto que el espectro electromagnético está saturado para posibilidades de comunicaciones y nuevas tecnologías, pero son precisamente las nuevas redes, basadas en conceptos ópticos, las que ofrecen una muy buena alternativa para garantizar calidad de servicio que supla la alta demanda de usuarios que existen ahora y la que se estima para un futuro próximo. Aquí es cuando un concepto que se había utilizado para comunicaciones personales se reviste de especial importancia, este concepto es el de VLC (*visible light communication*). Las comunicaciones VLC están basadas en diodos emisores de luz que actúan como transmisores, proveyendo un enlace básico de comunicaciones de una sola vía; la luz LED ilumina sus propias atoceldas y transmite flujos de video en el *downlink* hacia múltiples terminales móviles [2], dependiendo de la topología implementada; así, la evolución natural de esta red básica personal y limitada era la red Li-Fi (*light fidelity*), en la cual se establece un robusto sistema de comunicaciones óptico multidireccional, integrado con un sistema de iluminación, perfecto para evolucionar junto con el esquema de las *smartcities* y las redes 3G, 4G y 5G de tendencia mundial. Una propuesta de este esquema se observa en la Figura 1.

ANTECEDENTES

Aspectos generales

Como se mencionó en el apartado anterior, el espectro de radiofrecuencia convencional está limitando las posibilidades de velocidad de los usuarios para aplicaciones del tipo de *internet of things*, por ejemplo. La integración entre las redes de comunicaciones del espectro convencional como las inalámbricas celulares o Wireless con redes ópticas de

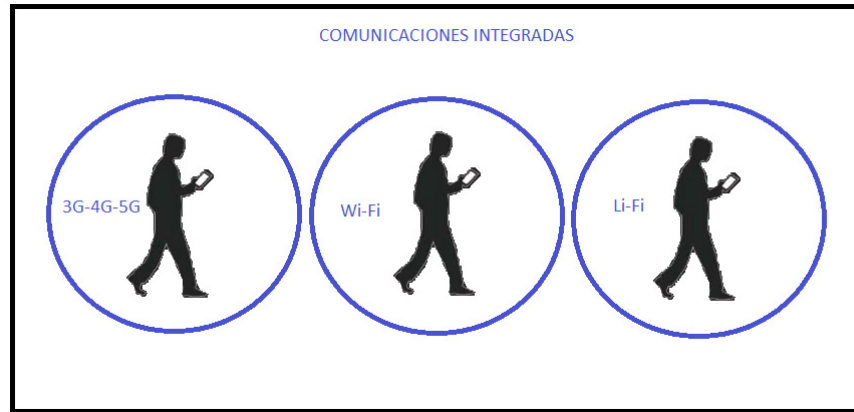


Figura 1. Un sistema integrado de comunicaciones.

Fuente: elaboración propia.

tipo Li-Fi, es cuestión de desarrollo de dispositivos y algoritmos de detección de redes; el balanceo de cargas pasa a ser de esta manera un concepto fundamental, donde la cohabitabilidad de dispositivos para tránsito entre diferentes redes lleva a plantearse en la comunidad científica algoritmos como el propuesto en [3], que permite autonomía en los usuarios con respecto a la selección de los equipos proveedores de control o *access point*, de acuerdo con sus necesidades.

En [4], se realiza un enfoque D2D sobre redes LTE para optimizar la operación del *uplink* y el *downlink* para situaciones de emergencia, asegurando la conectividad y pensando en las señales de video en tiempo real con QoS. El enfoque hacia las redes de emergencia orienta la investigación hacia una solución de clúster, en la que se busca que solo un celular que se llama “cabeza de cluster” tenga la posibilidad de comunicación con la estación base; el control hacia los demás cluster se realizara a través de este dispositivo, primando de esta manera su necesidad de comunicación orientado hacia la posibilidad de interconexión inmediata en situaciones de emergencia.

En [5], se realiza un análisis de servicios de video y la QoS aplicada a redes LTE; este tratamiento consta, básicamente, de un grupo de imágenes

que se codifican y se agrupan en tramas que posteriormente se transmitirán. No se realiza ningún tipo de marcado y las retransmisiones se efectúan cuando se vence algún tiempo de transmisión y no se recibe trama alguna; así, al no recibirse alguna trama, la métrica del sistema calcula cierta distorsión.

Es necesario discutir en este apartado acerca de las tendencias en redes orientadas específicamente a las *next generation networks* (NGN) desde el punto de vista de la movilidad. El legado de estas redes viene desde aquellas de cuarta generación como LTE y WiMAX, y las recomendaciones de la ITU con respecto a la calidad de servicio establecida desde las capas de transporte, aporta un punto de partida importante para aplicar condiciones de calidad de servicio en las redes *light Fidelity*; puntualmente, en estas redes de cuarta generación se presentan varios estudios de calidad de servicio que podrían ser punto de partida para futuras redes de quinta generación. Por otro lado, en [6] se propone un *framework* que provee una clasificación de tráfico óptimo para interoperabilidad, con unos buenos resultados en simulación para ambientes aislados; esto confirma que una buena base para el análisis de calidad de servicio en las redes Li-Fi está presente en estos estudios previos.

Concepto formal del balanceo de cargas aplicado a redes

El balanceo de cargas está presente desde hace décadas en la arquitectura de computadores, específicamente en la forma en que se distribuye *payload* (carga útil) entre un servidor a través de varios de sus recursos físicos; posteriormente, en redes de computadores, este concepto se adaptó a las necesidades de las interfaces con respecto al manejo dinámico del flujo de información, pero, básicamente, este concepto permite optimizar los recursos del sistema para obtener réditos en términos de rendimiento, tanto del procesamiento de la información como en los tiempos de respuesta y vida útil de los elementos físicos [7]. Desde el punto de vista de redes de distinta tecnología, este concepto permite que el usuario mantenga un nivel de servicio óptimo con la interoperabilidad de redes que detectarán el paso entre ellas, haciendo el proceso imperceptible para la aplicación que utiliza la infraestructura.

En sistemas de telecomunicaciones, algunos de los elementos de identificación de umbrales realizan un análisis de información con respecto a las métricas que ha almacenado, tomando posteriormente decisiones con base en la mejor ruta de tránsito; si sus métricas para múltiples enlaces son las mismas, el balanceo de cargas le permite al sistema manipularlas para obtener el mayor rendimiento en términos de tráfico de datos [8].

Perspectiva de redes de quinta generación

Antes de discutir acerca de las redes de quinta generación, es necesario tener presentes las redes anteriores; la tercera generación de redes y servicios, en su momento, llegó a ofrecer mejores oportunidades en cuanto al tipo de aplicaciones multimedia y servicios que se ajustaban a las necesidades de calidad de comunicaciones para usuario final. Las partes principales de los estándares estaban alineadas y los servicio 3G

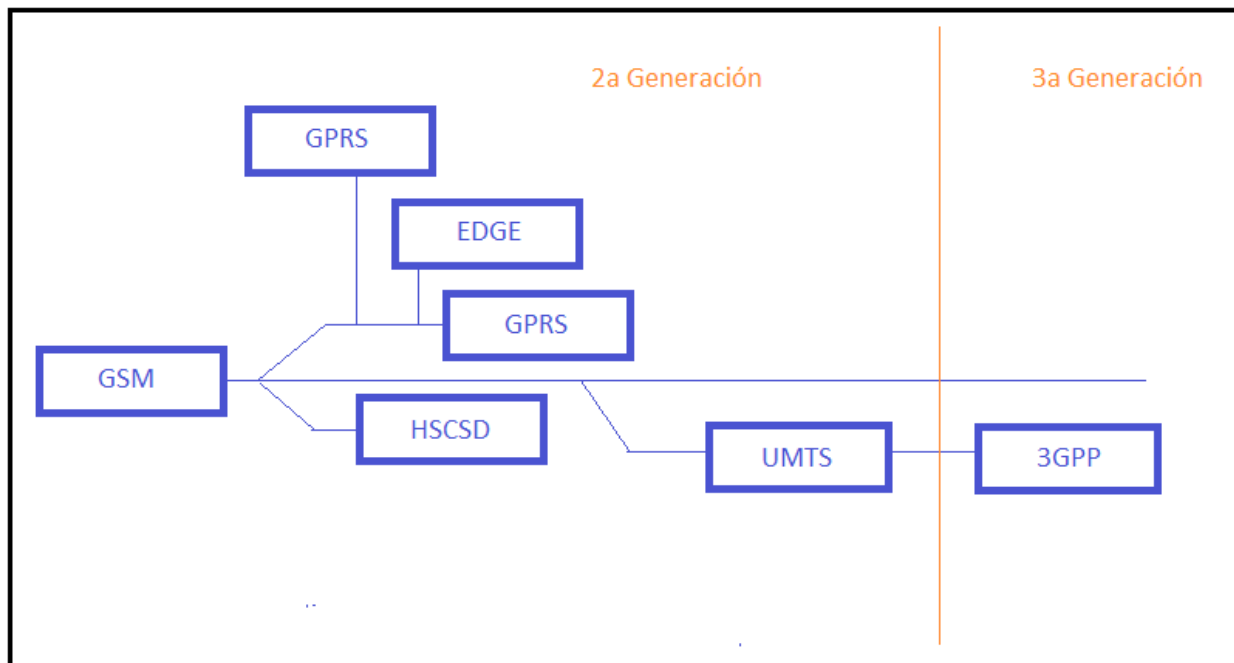


Figura 2. Evolución de escenarios hacia 3G.

Fuente: elaboración propia.

iniciaban, pero mientras ocurría la evolución 3G, algunos operadores seguían implementando soluciones interinas 2.5 G por un periodo de tiempo. Se presentaron varios escenarios de evolución de las redes 2G a las 3G que se muestran en la Figura 2, siendo de especial interés para este artículo la red GSM, que iniciaba con mayores posibilidades de ancho de banda [9].

En [10], se realiza una estimación de las capacidades que tendrán que soportar las redes móviles con respecto a la actualidad, planteando cifras por el orden de un aumento de mil veces con contar con los dispositivos de IoT, los cuales están cada vez más presentes dentro de las necesidades de los usuarios finales. Información relevante estima que el rango de frecuencias de trabajo para redes de quinta generación estarán por el orden de los 300 GHz como límite, integrándose en los pronósticos el umbral de frecuencias de las redes Li-Fi; adicionalmente, el aumento de la cantidad de dispositivos de interacción y aplicaciones de contenidos multimedia, permiten plantear para estas redes velocidades acorde con el ancho de banda planteado, es decir, por el orden de los GBps para los usuarios finales, con requerimientos de baja latencia y eficiencia en el tiempo de uso de los equipos. Este parámetro de latencia pasa a ser uno de los más importantes para el planteamiento de calidad de servicio en las redes Li-Fi.

Los patrones de direccionamiento se están adicionando por el incremento de dispositivos de internet de las cosas; esto se está presentando en los estándares para redes celulares y se estudia en detalle en [11]. Es aquí donde la interoperabilidad e intercambio de información entre aplicaciones exigen cambios importantes en las tecnologías; además, la estructura rígida de los modelos de datos está migrando hacia modelos dinámicos con las necesidades del mercado y usuarios. Otras áreas de estandarización en las que se observa un interés pronunciado, corresponden a la seguridad para IoT y conectividad para áreas amplias con baja potencia; se clasifican de esta manera cuatro grandes

tópicos en los que la investigación exige una migración hacia estándares: *networking* incluyendo 5G, interoperabilidad semántica, seguridad y conectividad para áreas amplias con baja potencia.

Integración de internet de las cosas (internet of things-IoT) y 5G

Las aplicaciones en las que el concepto de internet de las cosas puede integrarse con redes de nueva generación abarcan un espectro muy amplio; sin embargo, identificando nuevas tendencias y, en algunos casos, la relación con temas de sostenibilidad, es posible relacionar algunos casos relevantes que pueden aprovecharse y continuar evolucionando sobre redes de tipo Li-Fi.

Uno de los escenarios más importantes es el que se relaciona con las necesidades de la industria energética. Dadas las preocupaciones significativas con respecto a las emisiones de carbono de los combustibles fósiles, el calentamiento global y la crisis de la energía (todos estos temas de sostenibilidad y cuidado del medio ambiente), los recursos energéticos distribuidos renovables (DER), se plantean como una solución consciente que necesita la integración con las redes inteligentes, lo que hará que el suministro de energía sea más fiable, disminuyendo de esta manera el costo adicional y las pérdidas de transmisión [12]. Uno de los principales desafíos técnicos en la planeación de un sistema de potencia, control y operación con DER, es la regulación de tensión en el nivel de distribución; este problema estimula el despliegue de sensores y ejecutores en redes inteligentes, con el fin de que la regulación de la tensión se puede controlar a un nivel aceptable. Aquí, el trabajo con redes de quinta generación es fundamental para optimizar el recurso ambiental e impulsar el uso de recursos renovables.

Se estima que a finales del 2020, 50 000 millones de dispositivos IoT se conectarán a las redes móviles, aumentando drásticamente el volumen de

datos circulando en estas redes a un ritmo muy alto en comparación con el tráfico convencional. No es un secreto que las redes de 4G han casi alcanzado el límite teórico de la cantidad de *bits* que pueden incluirse en una cantidad dada del espectro, por lo que algunos científicos han comenzado a buscar frecuencias más altas donde el uso de la radio es más ligero. Samsung ha estimado que los reguladores del gobierno podrían liberar hasta 100 GHz del espectro de ondas milimétricas para comunicaciones móviles, alrededor de 200 veces más que las redes móviles de la actualidad; este exceso de espectro permitiría canales de mayor ancho de banda y mayores velocidades de datos. Los productos inalámbricos que utilizan ondas milimétricas ya existen para las transmisiones con línea de vista fija, un nuevo estándar inalámbrico de interior conocido como WiGig pronto permitirá la transferencia de datos entre dispositivos multigigabit en una misma habitación [13].

Por otro lado, la demanda de espectro se ha incrementado dramáticamente con la llegada de modernas aplicaciones Wireless. El espectro compartido, considerado como un mecanismo crítico para redes 5G, se visualiza desde el punto de vista de la escasez de espectro y el alcance de velocidades de acceso altas, garantizando la calidad de servicio. Desde la perspectiva de redes licenciadas, la interferencia generada por todos los usuarios secundarios puede minimizarse; desde el punto de vista de redes secundarias, existe una necesidad de asignación de redes para usuarios secundarios que en términos generales se desea que reduzca interferencias, habilitando la interacción de un mayor número de usuarios secundarios. En la actualidad, es posible encontrar selecciones de redes y mecanismos de asignación de canales con el fin de incrementar los ingresos al acomodar usuarios secundarios sufriendo sus preferencias, mientras al mismo tiempo, se respetan las políticas del operador de la red primaria. Existen soluciones con respecto a la interferencia acumulada para usuarios licenciados y la cantidad que los usuarios deben

pagar por el uso de la red primaria, estas soluciones se enfocan en generar un precio bajo para usuarios secundarios con un QoS específico, sujeto a las restricciones de interferencia de la red disponible con canales libres; por otro lado, se usa el enjambre de partículas y una versión modificada del algoritmo genético para apoyar la solución del problema planteado anteriormente. [14]

En este escenario, se integra una red convencional RF con dispositivos Li-Fi, enmarcados dentro de comunicaciones de luz visible. Se diseñaron *access point* de tipo VLC con FPGA (*Fiel Programable Gate Array*) que finalmente proveerán una conexión a internet convencional.

Así, 5G no será un avance significativo con respecto a 4G. Las cuatro generaciones previas de tecnología celular han quebrado paradigmas en cuanto a su compatibilidad en retrospectiva; de hecho, 5G necesitaría un cambio de paradigma que incluya altas frecuencias de portadora con anchos de banda masivos, densidades de dispositivos extremas en las estaciones base y números de antenas sin precedentes. Sin embargo, a diferencia de las cuatro generaciones previas, la quinta generación será altamente integradora: se unirá cualquier interface de aire y espectro 5G con LTE y WiFi para proveer cubrimiento universal y experiencias de usuario casi sin límites. Para soportar esto, el *core* de la red deberá alcanzar altos niveles de flexibilidad e inteligencia, además, la regulación del espectro debe ser mejorada, junto a las eficiencias de costo y energía, que traerán consideraciones cada vez más críticas [15].

Por último, debe incluirse dentro de cualquier análisis de 5G la densificación de red como mecanismo clave para la evolución de las redes inalámbricas en la próxima década; la densificación de red incluye densificación sobre el espacio (despliegue denso de celdas pequeñas) y frecuencia (usando grandes porciones del espectro de radiofrecuencia en distintas bandas). La densificación espacial a gran escala, efectiva en términos de

costos se obtiene con redes autoorganizadas y el manejo eficiente de la interferencia entre celdas. Los beneficios de la densificación de red solo se pueden obtener si se complementa con tecnologías posteriores y se incluye el uso de receptores avanzados capaces de cancelar la interferencia [16].

TRABAJOS RELACIONADOS

Pruebas con sensores

El concepto *Wireless Sensors Networks* (redes de sensores inalámbricos), corresponde a una red autoconfigurable compuesta por un pequeño número de nodos sensores, distribuidos espacialmente y comunicados entre sí a través de señales de radio, para monitorear el mundo físico y controlar diversas condiciones en distintos puntos, entre ellas la temperatura, el sonido, la vibración, la presión y movimiento o los contaminantes [17]. Estas redes, muy usadas en contextos agrícolas, tendrían un gran impacto con la integración de redes híbridas RF y Li-Fi.

Los dispositivos de este tipo de redes son muy compactos y utilizan unas baterías parecidas a las de los terminales celulares, lo que permite su distribución sin restricciones por la posibilidad de cargarse con paneles solares [17]. En una etapa inicial de reconocimiento de señales, esta tecnología puede ser de gran utilidad para evaluar el desempeño de la red en determinados sitios fijos, los cuales posteriormente serán validados sobre ubicaciones móviles.

Seguridad y vehículos

Unos de los procesos más relevantes en el tema de seguridad sobre redes inalámbricas es la identificación por radiofrecuencia; esta tecnología se utiliza para identificar un elemento, seguir su ruta de movimiento y calcular distancias gracias a una etiqueta especial que emite ondas de radio, la cual se adjunta o se encuentra incorporada al objeto.

La tecnología RFID permite la lectura de etiquetas, incluso cuando estas no se encuentran en una línea visual directa y puede, además, penetrar finas capas de materiales (pintura, nieve, etc.). La etiqueta de radiofrecuencia (transpondedor, etiqueta RFID) está formada por un chip conectado a una antena, ambos contenidos en un rótulo (etiqueta RFID o rótulo RFID). Un dispositivo lo lee y, luego, captura y transmite la información; para facilitar a los usuarios utilizar la RFID en múltiples aplicaciones que permitan etiquetar y revocar algunas aplicaciones de forma segura y de manera eficiente, un esquema de solicitud de revocación seguro RFID es propuesta en [18]. Los usuarios son anónimos por completo en el esquema. El esquema propuesto no solo permite ser utilizado en multiaplicación de etiquetas RFID, sino también ser utilizado en una sola aplicación etiqueta RFID; además, en comparación con otros sistemas existentes, el esquema proporciona un mayor nivel de seguridad y tiene una ventaja de rendimiento.

Una implementación de la tecnología del esquema es que con la adopción de la función de *hash* y un número aleatorio se genera el módulo correspondiente mediante el uso de un típico mecanismo de desafío-respuesta. El esquema propuesto reduce la sobrecarga de almacenamiento y proporciona un mayor nivel de seguridad, se garantiza una menor complejidad computacional y la etiqueta complejidad comunicación de todo el protocolo.

El esquema puede lograr el anonimato completo y facilitar a los usuarios utilizar la etiqueta RFID multiaplicación, además de revocar algunas aplicaciones de forma segura y eficiente de acuerdo con las necesidades reales de los usuarios. En comparación con otros sistemas existentes, el sistema propuesto proporciona un mayor nivel de seguridad y tiene una ventaja de rendimiento en términos de complejidad. Por último, el sistema propuesto se puede utilizar en la etiqueta RFID de múltiples aplicaciones para promover el desarrollo en 5G [19].

Es importante mencionar que el estándar IEEE.802.15.7, trata acerca de la comunicación VLC, definiendo arquitecturas de red, capa física y mecanismos de acceso al medio. Uno de los problemas principales de Li-Fi se presenta en los llamados terminales ocultos [18]; esto hace referencia a la pérdida de LOS (*line of sight*) cuando se presenta un obstáculo entre el transmisor y el receptor, o al ángulo de los lentes de recepción cuando es limitado. La forma de contrarrestar estos efectos es adoptando RTS/CTS (*request to send/clear to send*) o adoptando protocolos HT-free como MS-Aloha (el cual requiere una sincronización absoluta); sin embargo, no se identifica una solución estándar en la actualidad [20]. Actualmente, existen análisis acerca de la posibilidad de integración de sistemas de posicionamiento GNSS (*Global Navigation Satellite System*) con redes Li-Fi, esto para aumentar la precisión en distancias, por ejemplo, entre dos vehículos [21]. La medición del tiempo diferencial de arribo (TDoA) se presenta con una técnica conocida como multilateración, que consiste en medir la diferencia en términos de distancia de estaciones con posiciones conocidas que emiten señales al mismo tiempo.

En la Figura 3, se muestra la interacción de multilateración en dos vehículos para integración entre redes VLC y GNSS con enfoque geométrico.

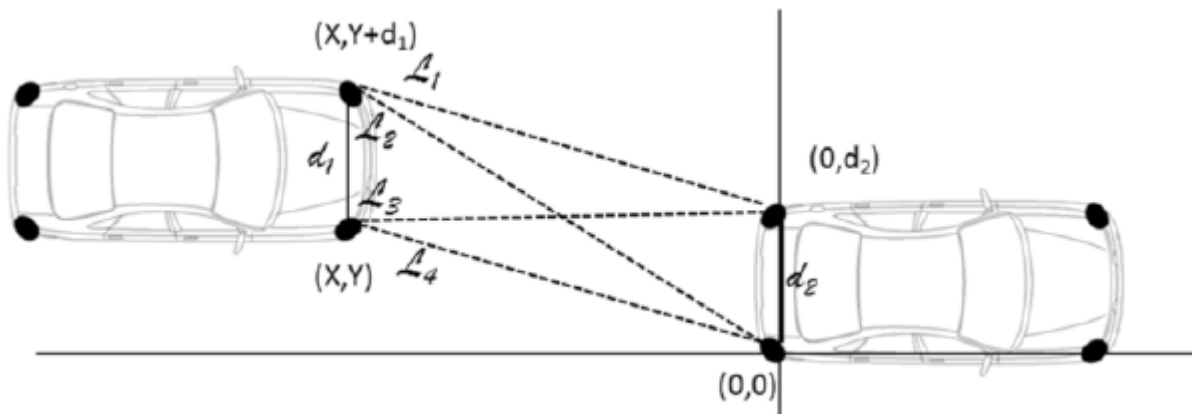


Figura 3. Geometría de multilateración.

Fuente: [18].

Escenarios de simulación

Es conocido que el *software* Matlab permite establecer escenarios primarios de simulación antes de plantear esquemas en soluciones open source como ns-2 o licenciadas como Opnet (Riverbed) o Estinet, por mencionar algunas; ejemplos de simulación en Matlab para redes de comunicaciones inalámbricas se encuentran en [22]. Adicionalmente, en [22] se integran diseños para una amplia gama de instrumentos de RF y dispositivos de radio de giro (DEG) definido por *software*; se muestra la posibilidad de verificar diseños en Matlab mediante el uso de señales de radio en vivo a través de la generación de forma de onda y pruebas en aire. Para efectos de este ejercicio, la simulación de extremo a extremo de los estándares WLAN y LTE permite determinar ciertos comportamientos que podrían equipararse para condiciones de redes físicas diferentes, esto permite determinar el rendimiento del sistema, cambiando los parámetros, incluyendo el ancho de banda, los modos MIMO, la modulación y el sistema de codificación.

Por último, durante la transmisión y recepción de señales de audio y vídeo en directo a través del aire, se determina todo el proceso de generación de forma de onda, la configuración de los parámetros de transmisión de la señal y de adquisición,

recuperación de datos IQ en Matlab y, finalmente, la medición y el análisis de los datos recibidos en Matlab y Simulink. Es claro que este esquema de configuración puede adaptarse a condiciones de redes Li-Fi desde el punto de vista de calidad del servicio, orientado a las características de ancho de banda y velocidades de transmisión de las futuras redes de quinta generación.

Para complementar los escenarios de simulación, se incluye dentro del análisis un cuadro comparativo con algunas de las herramientas de simulación más utilizadas en la comunidad científica, con el objetivo de establecer, de acuerdo con las necesidades puntuales de las redes de tipo li-Fi, cuál podría desarrollar de una mejor manera un esquema satisfactorio. Esta información se muestra en la Tabla 1.

CONCLUSIONES

Las posibilidades de desarrollo e investigación en materia de redes Li-Fi, teniendo en cuenta las tendencias de quinta generación, son generosas, ya que las perspectivas mundiales apuntan a un crecimiento importante del tráfico multimedia en

comunicaciones móviles, en especial *Device to Device*. Uno de los campos que lograron identificarse en el análisis realizado comprende los recursos energéticos distribuidos renovables, en línea con los proyectos sostenibles amables con el medio ambiente; esta línea de investigación, con la integración de conceptos de IoT, seguramente marcará caminos que permitan unir esfuerzos científicos para el uso de energías renovables con nuevas propuestas en redes de comunicaciones.

Teniendo en cuenta lo anterior, se incluyen los *Wireless Sensors Networks* para la industria agrícola, que si bien no se perfila para un uso de redes de tipo Li-Fi, con los servicios proyectados para redes de quinta generación permitirán el análisis en tiempo de real de una mayor cantidad de información, muy valiosa no solo para el monitoreo de cultivos, sino también para la atención y prevención de desastres naturales. Por último, los escenarios de QoS para las nuevas redes ópticas, permiten identificar una posibilidad de mejorar los procesos desarrollados sobre redes 4G y WiMAX, como punto de partida para satisfacer las necesidades en las redes Li-Fi con entornos de quinta generación.

Tabla 1. Herramientas de simulación para escenarios Li-Fi.

Herramienta	Observaciones
<i>Opnet (Riverbed)</i>	Requiere licencia y no permite modificación de librerías y protocolos. Tiene un tiempo de aprendizaje alto pero su robustez lo hace muy confiable.
NS-2	No requiere licenciamiento. Tiene una comunidad de apoyo entusiasta. Permite modificación de protocolos y los cambios en modelos desde el punto de vista de codificación es muy ágil. Es confiable y altamente utilizado por la comunidad académica.
<i>Omnet ++</i>	No requiere licenciamiento. Es confiable y altamente utilizado por la comunidad académica. Configuración modular y programación basada en C++. Se requiere un esfuerzo importante para crear los escenarios de simulación, pero en foros especializados concuerdan en que es la herramienta más robusta.
<i>Estinet</i>	Requiere licencia. Tiene un tiempo de aprendizaje corto, pero no permite modificación de librerías.

Fuente: elaboración propia.

REFERENCIAS

- [1] Savage Neil. *Li-Fi Gets ready to compete with Wi-Fi*. [En línea]. Disponible en: <http://spectrum.ieee.org>, 2014.
- [2] Jiang, J., Huo, Y., Jin F., Zhang, P., Wang, Z., Xu, Z., Haas, H. y Hanzo, L. "Video Streaming in the Multiuser Indoor Visible Light Downlink". *Univ. Of Sci. & Technol., Hefei, China. IEEE Access*, volume, 3, 2015.
- [3] Yunlu Wang, Xiping Wu and Harald Haas, " Distributed Load Balancing for Internet of Things by using Li-Fi and RF Hybrid Network". *IEEE 26th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications-(PIMRC): Mobile and Wireless Networks*, 2012.
- [4] Fan, K., Gong, Y., Yintang, H. "RFID secure application revocation for IoT in 5G". *State Key Laboratory of Integrated Service Networks Xidian University Xi'an, China*, IEEE Trustcom/BigDataSE/ISPA, 2015.
- [5] Elias Yaacoub, " On the Use of Device-to-Device Communications for QoS and Data Rate Enhancement in LTE Public Safety Networks". *IEEE Qatar Mobility Innovations Center (QMIC), Qatar Science and Technology Park, Doha, Qatar. Workshop on Visible Light Communications and Networking*, 2014. <https://doi.org/10.1109/WCNCW.2014.6934892>
- [6] Esmailpour, A., Victor, J. y Rodriguez, P. "Integrated QoS provisioning for unified LTE-WiMAX networks". *Department of Electrical and Computer Engineering, The University of New Haven, West Haven, CT, USA. International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, 2016.
- [7] Iqbal, M. Ashraf; Saltz, Joel; Bokhari, Shahid. *Performance Tradeoffs in static and Dynamic strategies*, NASA, 1986.
- [8] CISCO, *How Does Load Balancing Work?*. 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/ip/border-gateway-protocol-bgp/5212-46.html>
- [9] Guo, Y., Antoniou, Z. y Dixit, S. "Resource management and quality of service in third generation wireless networks". *Nokia Res. Center, Espoo, Finland*. 2002. *IEEE Communications Magazine*, volume:39 , issue, 2.
- [10] Shilpa Talwar, Debabani Choudhury, Konstantinos Dimou, Ehsan Aryafar, Boyd Bangerter, Kenneth Stewart, "Enabling Technologies and Architectures for 5G Wireless". *IEEE Intel Corporation, Santa Clara, CA*, 2015.
- [11] Elloumi, O., Song, J., Ghamri-Doudane, Y. y Leung, V., "IoT _ M2M From Research To Standards The Next Steps". *IEEE communications Magazine*, 2015.
- [12] Rana, M., Li, L y Su, S. "Kalman Filter Based Microgrid State Estimation and Control Using the IoT with 5G Networks". Faculty of Engineering and Information Technology University of Technology, Sydney, Broadway, NSW 2007, Australia. *IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2015. <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2015.7380989>
- [13] Rappaport T., Sun, S., Mayzus, R., Zhao, H., Azar, Y., Wang, K., Wong, G., Schulz, J., Samimi, M. y Gutierrez, F. " Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!". 1NYU WIRELESS, Polytechnic Institute of New York University, New York, NY 11201, USA, *Advanced Technology Group Samsung Electronics America*. IEEE Access, 2013.
- [14] Ejaz, W., Ejaz, N., Kim, H., Anpalagan, A., Jo, M. y Hasan, N. "Network Selection and Channel Allocation for Spectrum Sharing in 5G Heterogeneous Networks". *Department of Electrical and Computer Engineering, Dhofar University, Salalah, Oman. IEEE Access*, Volume, 4, 2016.
- [15] Buzzi, S.; Choi, W.; Hanly, S.; Lozano, A.; Soong, A.; Zhang, J. y Andrews, J. "What Will 5G Be? ". *Univ. Of Texas at Austin, Austin, TX, USA. Selected Areas in Communications, IEEE Journal*, volume:32, issue, 6, 2015.

- [16] Bhushan, N., Li, J., Malladi, D., Gilmore, R., Brenner, D., Damnjanovic, A., Sukhvasi, R., Patel, C. y Geirhofer, S. "Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G". *Qualcom Technologies incorporated. IEEE Communications Magazine*, volume, 52, issue, 2, 2014.
- [17] Archila, D., Santamaría, F. "Estado del arte de las redes de sensores inalámbricos". *Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), Tunja, Colombia, REVISTA DIGITAL TIA*, Volumen 2, número 1, julio-diciembre, 2013.
- [18] Scopigno, R., Autolitano, A., Acarman, T., Yaman, C. y Topsu, S. (2015) "The potential benefits of on-board Li-Fi for the cooperation among vehicles". Istituto Superiore Mario Boella, Multi-Layer Wireless Dept., Torino, Italy. 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). <https://doi.org/10.1109/ICTON.2015.7193411>
- [19] Houman Zarrincoub. 5G/LTE/WLAN: Waveform Generation, Simulation, Measurement and over the air Testing with MATLAB. [En línea]. Disponible en: <http://www.mathworks.com/videos/5glte wlan-waveform-generation-simulation-measurement-and-over-the-air-testing-within-matlab-117661.html?requested-Domain=www.mathworks.com>, 2016
- [20] Arquitectura 5G. 2016. [En línea]. Disponible en: http://www.w3ii.com/es/5g/5g_architecture.html
- [21] Zhu, H., Zhang, M., Wang, C., Guo, X. y Zhang, Y. "Design of a visible light Internet access system". *State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, 100876, China. Seventh International Conference on Ubiquitous and Future Networks*, 2015.
- [22] Ejaz, W., Ejaz, N., Kim, H., Anpalagan, A., Jo, M. y Hasan, N. "Network Selection and Channel Allocation for Spectrum Sharing in 5G Heterogeneous Networks". *Department of Electrical and Computer Engineering, Dhofar University, Salalah, Oman. IEEE Access*, volume, 4, 2016.





Identificación de funciones complementarias para la estación terrena satelital de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

Identification of complementary functions for the satellite ground station of the Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

María Paula Maury Atencia¹ Oscar Fernando Vera Cely²

Para citar este artículo: Maury, P. y Vera, O. (2017). Identificación de funciones complementarias para la estación terrena satelital de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. *Revista Redes de Ingeniería*. 8(1), 29-35, doi: <https://doi.org/10.14483/2248762X.11177>.

Recibido: 16-noviembre-2016 / **Aprobado:** 9-junio-2017

Resumen

La Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia Uptc, posee una estación terrena con funciones de seguimiento a satélites de órbita LEO, pero según datos estimados por Genso [1] el tiempo de visibilidad de los satélites que describen órbitas LEO es de cinco minutos en promedio cada vez que pasa, estiman la comunicación con los satélites durante el 3% de su vida útil por lo que la estación terrena permanece inactiva la mayor parte del tiempo. La presente investigación surge de la necesidad de darle mayor utilidad a dicha infraestructura, para ello se realizó una investigación de tipo exploratorio implementando un protocolo de revisión de literatura, se caracterizó la infraestructura existente y de las señales a recibir, esto permitió la identificación de funciones y aplicaciones en tierra que podrían incrementar el porcentaje de uso de la estación, sin dejar de realizar las funciones satelitales para las cuales fue diseñada.

Palabras clave: aplicaciones, comunicaciones UHF, diseño tradicional monolítico, antenas UHF, módem, transceptor.

Abstract

The Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia Uptc has a ground station with low-orbit satellite (LEO) tracking functions, but according to data estimated by GENSO [1] the visibility time of satellites that describe LEO orbits is 5 minutes in average each time it passes, it is estimated that communication with satellites during 3% of its useful life so the earth station remains inactive most of the time, the present research arises from the need to give greater utility to such infrastructure, an exploratory research was carried out, implementing a literature review protocol, the characterization of the existing infrastructure and the signals to be received were carried out. This allowed the identification of functions and applications on land that could increase the percentage of use of the station without ceasing to perform the satellite functions for which it was designed.

Keywords: applications, communications UHF, modem, traditional monolithic design, transceiver, UHF antennas.

1. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Correo electrónico: maria.maury@uptc.edu.co
2. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Correo electrónico: oscar.vera@uptc.edu.co

INTRODUCCIÓN

El grupo de investigación en Informática, Electrónica y Comunicaciones INFELCOM de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia Uptc, ha desarrollado desde el año 2010 trabajos de investigación relacionados con comunicaciones satelitales y, en particular, en lo que atañe al segmento terrestre encargado de recibir las señales provenientes de los satélites. La estación terrena satelital de la Uptc fue implementada siguiendo el diseño tradicional monolítico, por lo que está formada esencialmente por cuatro componentes: antenas, mecanismo de posicionamiento, transceptor y módem [1].

Antenas

Una antena es un dispositivo con la capacidad de radiar y capturar ondas electromagnéticas, de acuerdo con la función que realicen de transmisión o recepción. En el transmisor la antena convierte la energía eléctrica que contiene la información en ondas electromagnéticas y en el receptor la antena convierte las ondas electromagnéticas en energía eléctrica, de tal forma que pueda ser interpretada la información [2]. La estación terrena de la Uptc cuenta con dos antenas Yagi, una que opera en la banda de muy alta frecuencia (VHF) y la otra en la banda de ultra alta frecuencia (UHF).

Mecanismo de posicionamiento

El mecanismo de posicionamiento es un sistema que permite ajustar la orientación de las antenas para poder realizar seguimiento a los satélites. Dichos sistemas de posicionamiento ajustan los ángulos de azimut y elevación.

La elevación es el ángulo requerido para elevar la antena desde el horizonte (90° en el ecuador), y azimut es el ángulo horizontal necesario para hacer girar la antena desde el polo norte geográfico hasta encontrar el satélite, tal como se puede ver en la Figura 1. Los valores de estos ángulos no

son constantes, sino que dependen de la ubicación geográfica de la estación y la trayectoria seguida por el satélite con que se desea realizar el enlace, este proceso es realizado en la estación terrena de la Uptc a través de un rotor de referencia G-5500 de Yaesu y su respectiva unidad de control.

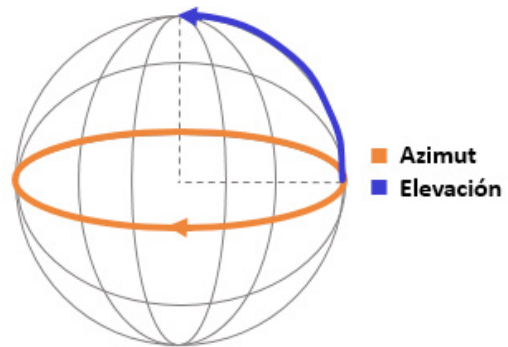


Figura 1. Ángulos de elevación y azimut.

Fuente: elaboración propia.

Transceptor

El transceptor es el equipo encargado de trasladar la señal de información hacia una portadora con frecuencias de operación óptimas para los radios de enlaces satelitales [1].

Módem

El módem es un dispositivo que, utilizando un esquema de modulación para señales de radio analógicas, procesa la información que se desea transmitir o recibir desde la estación terrena [1]. En la estación terrena de la Uptc se cuenta con un equipo que realiza tanto las funciones de módem como las de transceptor para VHF y UHF.

La estación terrena satelital de la Uptc actualmente ejecuta funciones de seguimiento a satélites de órbita baja y recepción de señales provenientes de los mismos; sin embargo, para que se pueda establecer un enlace satelital se requiere disponibilidad de satélites a fin de establecer comunicación con ellos y línea de vista entre la estación terrena y el satélite. En los trabajos realizados en la Uptc no

se ha incursionado en el segmento espacial y por tanto no se cuenta con satélites propios disponibles para establecer enlaces de comunicación de forma recurrente, entonces el uso de la estación terrena se ha limitado a la realización de seguimientos ocasionales a satélites cuya predicción de trayectoria coincida con la ubicación geográfica de la estación, pero dadas las características de la infraestructura que posee la estación terrena satelital Uptc, esta podría ser usada en otras funciones o aplicaciones en tierra. Identificado este problema se realiza el presente trabajo con la finalidad de contribuir a incrementar el porcentaje de uso de la estación terrena sin que se vean afectadas las funciones satelitales para las cuales fue concebida.

El presente trabajo muestra inicialmente una descripción de la estación terrena satelital Uptc; en segundo lugar se presentan las bandas de frecuencia compatibles con la infraestructura existente; acto seguido, se muestran las funciones y alternativas para el uso de la estación en aplicaciones en tierra; en la sección siguiente se realiza un análisis de respuesta en frecuencia de las señales que maneja la estación Uptc; y, finalmente, se entrega la conclusión del trabajo.

Estación terrena satelital de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

Una estación terrena satelital es “la parte encargada de establecer comunicación con una o varias estaciones espaciales; o con una o varias estaciones terrenas, mediante el empleo de uno o varios satélites reflectores” [3]. La estación terrena satelital de la Uptc, con miras a cumplir la función para la cual fue diseñada, realiza las funciones que se describen a continuación:

A. Seguimiento (tracking)

Esta función permite establecer la posición del satélite en su órbita. Usando el sistema de posicionamiento con que cuenta la estación se orientan las antenas de forma que se tenga línea de vista con

el satélite. La estación terrena de la Uptc utiliza un software de predicción para establecer la trayectoria de los satélites con respecto a la ubicación geográfica de la estación [4], y con base en esos datos, realizar los ajustes de orientación de las antenas.

B. Recepción de señales

Esta función implica la adquisición de señales provenientes de los satélites en la banda UHF. Para la realización de esta función la estación terrena cuenta con una antena Yagi para UHF, un amplificador de bajo ruido y un radio que realiza las funciones de transceptor y módem.

En la revisión de antecedentes se encontró que todos los trabajos de investigación relacionados con la Estación Terrena Satelital de la Uptc se limitan exclusivamente a las funciones de seguimiento y recepción de señales provenientes de satélites de órbita baja, los resultados y aspectos más relevantes de dichos proyectos se encuentran en trabajos como el de Espíndola y Mesa [3], quienes plantearon un diseño del sistema de comunicaciones para la estación terrena y dieron recomendaciones para la fase de implementación; Espíndola, Ferro y Mesa [5] propusieron un software con el propósito de realizar el direccionamiento autónomo de las antenas de dicha estación empleando técnicas de inteligencia artificial. No se encuentra evidencia ni recomendaciones para investigaciones futuras en dichos trabajos relacionadas con realización de otras funciones desde la estación terrena de la Uptc.

Bandas de operación permitidas para la estación

En Colombia, el Ministerio de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones es el ente regulador de todo el sector de las comunicaciones, por tanto se realizó la revisión de las bandas de frecuencia que pueden ser usadas de forma libre para fines sin ánimo de lucro, como el caso del presente

proyecto de investigación, y que se encuentran dispuestas en el Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia (CNABF) en la categoría de radioaficionados, se compararon estas frecuencias legalmente permitidas con las de operación de las antenas que hacen parte de la estación terrena de la Uptc, dando como resultado las frecuencias de operación mostradas en la Tabla 1:

Tabla 1. Rango de frecuencias para operación de la estación terrena Uptc.

Rango de frecuencias	Uso
UHF: 430 - 440 MHz	Radioaficionados
VHF: 145 – 148 MHz	Radioaficionados

Fuente: elaboración propia.

FUNCIONES Y APLICACIONES COMPLEMENTARIAS PARA LA ESTACIÓN TERRENA SATELITAL DE LA UPTC

A partir de una revisión documental acerca de estaciones terrenas se identificaron funciones alternativas para el aprovechamiento de este tipo de infraestructuras, monitoreo de señales en bandas UHF o VHF dentro del marco legal aplicable a este tipo de comunicaciones en Colombia.

Con las características de los equipos existentes en la estación terrena satelital Uptc se encontraron funciones y aplicaciones que podrían ser implementadas en tierra para dar un mayor uso a la infraestructura existente, sin dejar de realizar las actividades de seguimiento a satélites para las cuales fue diseñada originalmente. Se muestra a continuación el listado de funciones que actualmente no se ejecutan en la estación y que contribuirían dar mayor uso a la misma.

Procesamiento

Por procesamiento de datos se entienden habitualmente las técnicas eléctricas, electrónicas o

mecánicas usadas para manipular datos y lograr en ellos una transformación, en dicha transformación el sistema de procesamiento convierte al dato en información [6]. Teniendo en cuenta que actualmente en la estación terrena Uptc solo se reciben señales beacom provenientes de los satélites de órbita baja, sería conveniente diseñar un sistema de procesamiento para la decodificación y posterior uso de la información, esta función sería aplicable tanto para señales provenientes del segmento espacial como para señales en tierra.

Monitoreo

El monitoreo es el proceso continuo de recolección y análisis de datos cualitativos y cuantitativos que permite la observación de un proceso en funcionamiento, examinando el transcurso del mismo por medio de ciertas variables seleccionadas; tiene como propósito descubrir fortalezas o debilidades a fin de establecer líneas de acción, permitiendo brindar correcciones y reorientaciones técnicas en la ejecución, con base en los objetivos planteados en un programa o proyecto [7]. La implementación de esta función adicional en la estación terrena de la Uptc implicaría el desarrollo de un sistema de procesamiento para las señales recibidas y la transmisión de las mismas hacia la estación en las bandas de operación de la estación.

Telemando

Utilización de las telecomunicaciones para la transmisión de señales destinadas a iniciar, modificar o detener el funcionamiento de los dispositivos de un equipo [7]. Dado que no se cuenta con satélite propio o alianzas con instituciones que tengan satélites y permitan la realización de operaciones de telemando, no se podrían realizar este tipo de funciones en el segmento satelital, pero sí sería posible implementar esta función en tierra con otros dispositivos que operen en la banda UHF.

Telemedida

Aplicación de las telecomunicaciones que permite indicar o registrar automáticamente medidas a distancia del instrumento de medida [7]. Esta funcionalidad adicional se podría implementar tanto para los enlaces satelitales como para enlaces en tierra, requiere el procesamiento de las señales y que la transmisión de las mismas se haga en las frecuencias de operación de la estación terrena.

Enlaces (voz y datos)

Si se establecen una o varias de las funcionalidades descritas en este ítem, se puede adicionalmente establecer enlaces (voz y datos) con otras estaciones o centros de procesamiento para compartir la información obtenida en la estación terrena Uptc.

Aplicaciones adicionales para la estación terrena de la Uptc

Además de las funciones complementarias que ya se describieron, el presente trabajo permitió la identificación de aplicaciones puntuales que podrían ser implementadas para aumentar el porcentaje de uso de la estación terrena de la Uptc, o podrían usarse para futuros trabajos de investigación, tales como: telemetría de variables en cultivos, sistemas de comunicación para personas con audición deficiente, control de dispositivos inalámbricos, telemetría biomédica, monitoreo de sistemas de alarmas y sensores, telemetría y telecontrol de medidores, identificación automática de elementos, entre otras.

RESULTADOS DE MEDICIÓN DE RESPUESTA EN FRECUENCIA DE LAS SEÑALES COMPATIBLES CON LA ESTACIÓN TERRENA UPTC

Con el fin de soportar la selección de las aplicaciones adicionales a la infraestructura existente de la estación terrena satelital Uptc se realizaron

mediciones con la ayuda del analizador de espectros, con el propósito de determinar el comportamiento en frecuencia de las señales que pueden ser captadas por las antenas con que cuenta la estación, en la figura 2 se muestra el espectro en el rango de frecuencias de 430 MHz a 440 MHz.

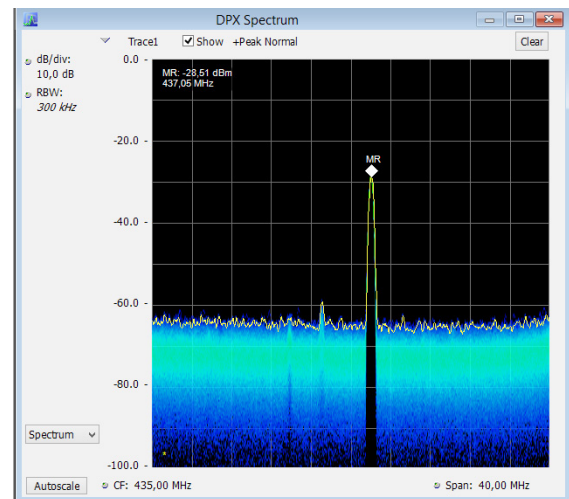


Figura 2. Respuesta en frecuencia en la banda UHF
Fuente: elaboración propia.

En el momento de realizar la medición se utilizó el transceptor kenwood TM-D700 con que cuenta la estación sintonizado a una frecuencia de 437.05 MHz, en la figura 2 se observa que en esta frecuencia la potencia de la señal tiene mayor intensidad reflejada en una potencia de -28.51 dBm.

Con la ayuda de la función de espectrograma con que cuenta el analizador de espectros tektronix RSA306 con el que se realizaron las medidas es posible visualizar la existencia de otras dos señales captadas por la estación, en la figura 3 se muestra el espectrograma en el cual se puede observar al lado izquierdo del marcador MR las dos señales captadas de menor potencia.

DISCUSIÓN

El presente trabajo tiene como objetivo principal la identificación de funciones o aplicaciones alternativas para la estación terrena de la Uptc con miras

a darle un mayor tiempo o porcentaje de uso a la misma, y se encontraron funciones complementarias y aplicaciones en tierra que se pueden implementar con la infraestructura existente.

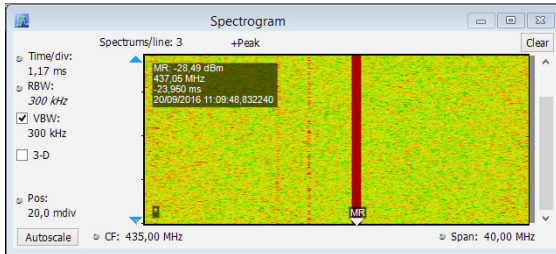


Figura 3. Espectrograma de la banda UHF.

Fuente: elaboración propia.

Con base en la respuesta en frecuencia producto de las mediciones realizadas sobre la banda UHF, se infiere que la estación puede funcionar perfectamente como estación de monitoreo o radio base para aplicaciones que transmitan en el rango de frecuencias comprendidas entre los 430 y los 440 MHz.

El valor agregado del presente trabajo radica en la identificación de nuevas funcionalidades para una estación terrena de seguimiento a satélites, pero sin dejar de realizar las tareas para las cuales fue diseñada e implementada originalmente, en la revisión de antecedentes se encontró que trabajos como el de Espíndola, Nonsoque y Molano [4], Salas et al. [8], Pérez y Hernández [9], entre otros, dan cuenta del uso de las estaciones terrenas exclusivamente para seguimiento a satélites; sin embargo, García y Rivera [10], González [11], Aparicio y otros [12] exploran la posibilidad de usar las estaciones terrenas en aplicaciones de telemetría y telemedicina.

La aplicabilidad de la estación terrena se podría ampliar en gran medida, y el presente trabajo da una visión de los trabajos que se podrían realizar para explotar al máximo el potencial de la infraestructura, no solo de la estación terrena satelital de la Uptc sino de todas las estaciones que hayan sido construidas usando el modelo tradicional monolítico.

CONCLUSIONES

El presente trabajo describe la infraestructura de la estación terrena satelital de la Uptc, bandas de operación y funciones que realiza la misma actualmente, a partir de la necesidad de dar un mayor uso a dicha estación se realizó el análisis de la banda de frecuencias de 430MHz a 440 MHz y se obtuvo una respuesta positiva en cuanto a los niveles de potencia que puede captar la estación y se concluye que la infraestructura existente puede ser utilizada con sistemas que utilicen frecuencias de portadora que estén en la banda de UHF.

De igual forma, el análisis realizado permitió identificar funciones y aplicaciones adicionales que se pueden llegar a implementar para aprovechar de manera más eficiente la infraestructura de la estación terrena satelital Uptc. Como proyecto a corto plazo, se implementará el sistema de monitoreo desde la estación terrena de las señales provenientes de un sistema de sensores de variables meteorológicas.

REFERENCIAS

- [1] Vera, O. Análisis de desempeño del protocolo AX.25 en el enlace de la estación terrena satelital Uptc. Tesis de maestría, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, 2015.
- [2] Tomasi, W. Sistemas de comunicaciones electrónicas. Phoenix, Arizona: Pearson Education, 2003. 948 pp.
- [3] Espíndola J. y Mesa J., "Implementación de estación terrena para seguimiento a picosatélites de órbita LEO", Ventana Informática, vol 26, 2012, p. 77-91.
- [4] Nonsoque, C., Molano J. y Espíndola, J. "Montaje e implementación de una estación terrena satelital para el seguimiento de satélites de órbita baja". Tenth LACCEI Latin American and Caribbean Conference - International Competition of Student Posters and Papers (LACCEI'2012), Jul. 23-27, 2012.

- [5] J. E. Espíndola Díaz, R. Ferro Escobar, y J. A. Mesa Lara, "Direccionamiento automático de antenas en estaciones terrenas de seguimiento a picosatélites," *Tecnura*, vol. 17, no. 35, pp. 26–37, 2013. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2013.1.a02>
- [6] Muñoz J., Castañeda J. y Ruíz G., Diseño e Implementación de un Controlador de Temperatura y Monitoreo de Señales para la automatización de equipos de refrigeración. Tesis de Ingeniería electrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Buenaventura, Bogotá, D.C., Colombia, 2006.
- [7] Cuellar G. Aspectos técnicos de los sistemas de información. Universidad del Cauca, S.f. [En línea]. Disponible en: <<http://fccea.unicauca.edu.co/old/procesamiento.htm>>
- [8] Salas, M. et al. "Nueva Estación Terrena para seguimiento de satélites LEO". Actas del XXIII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI), 2008, De 22-24 Septiembre de 2008.
- [9] Perez, O. y Hernández, M. "Diseño e Implementación de una estación terrena en la Universidad panamericana Bogotá para seguimiento de Satélites en la banda de Radioaficionados". III Simposio Nacional y II Internacional de investigación y emprendimiento, 12 pp., 2014.
- [10] García, D. y Rivera, H. Diseño del sistema de comunicaciones de la estación terrena sede Neiva Cubesat UD. Tesis de Ingeniería electrónica, Facultad de Ingeniería,, Universidad Surcolombiana, Neiva, Colombia, 2007
- [11] González, R. Propuesta para el cálculo de un enlace en un sistema de comunicación satelital (SCPC- FDMA) utilizando el estándar ATSC para aplicaciones en Telemedicina. Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, 2009.
- [12] Aparicio, L., Cerquera y Pérez, C. Diseño, simulación e implementación de una estación terrena cubesat UD-USCO. Convenio de cooperación académica Universidad Surcolombiana–Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Neiva, 2014





Sistema de monitorización de contaminación ambiental alimentado con energía solar fotovoltaica para una estación de autobús

Monitoring system of environmental pollution powered by photovoltaic solar energy for a bus station

Eneil Quintero Arenas¹ Sergio Basilio Sepúlveda Mora² Sergio Iván Quintero Ayala³

Para citar este artículo: Quintero, E., Sepúlveda, S. y Quintero, S. (2017). Sistema de monitorización de contaminación ambiental alimentado con energía solar fotovoltaica para una estación de autobús. *Revista Redes de Ingeniería*. 8(1), 36-46, doi: <https://doi.org/10.14483/2248762X.11872>.

Recibido: 19-abril-2017 / **Aprobado:** 3-agosto-2017

Resumen

Para incentivar y mejorar el uso de las estaciones de autobuses, se ha realizado el diseño de un sistema ecológico y tecnológico en el cual, por medio de sensores, se miden las variables climatológicas de humedad, temperatura, ruido, nivel de rayos ultravioleta y de gas carbónico. Estos parámetros son adquiridos por un microcontrolador para su posterior envío al sistema embebido Raspberry Pi 3, que procesa la información y genera la interfaz gráfica compuesta de cinco ventanas que se visualizan secuencialmente en una pantalla LED. La energía requerida para el funcionamiento de los dispositivos electrónicos es de 3922,4 Wh/día, y será suministrada por un sistema fotovoltaico autónomo. Con el uso del software PVSyst se ha validado el diseño del sistema FV obteniendo una energía anual de 1172 kWh.

Palabras clave: estación de autobús, Raspberry Pi, sistema embebido, sistema fotovoltaico.

Abstract

In order to encourage and improve the use of bus stations, we designed an ecological and technological system. The climate variables of humidity, temperature, noise, ultraviolet rays and carbonic dioxide levels are sensed; this information is acquired by a microcontroller, then these variables are sent to the Raspberry Pi 3 embedded system which processes the data and generates a graphical interface composed of 5 screens displayed sequentially on an LED display. The energy required for the operation of the electronic devices is 3922.4 Wh/day, and it will be supplied by an off-grid photovoltaic system. With the use of PVSyst software, the design of the PV system has been validated, obtaining an annual power of 1172 kWh.

Keywords: Bus station, embedded system, photovoltaic system, Raspberry Pi.

1. Universidad Francisco de Paula Santander. Correo electrónico: eneilquintero@ufps.edu.co
2. Profesor e investigador del Departamento de Electricidad y Electrónica, Universidad Francisco de Paula Santander. Correo electrónico: sergio.sepulveda@ufps.edu.co
3. Universidad Francisco de Paula Santander. Correo electrónico: sergioivanqa@ufps.edu.co

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la mayor parte de la energía eléctrica se produce a partir de recursos no renovables, que en su mayoría son limitados y causan emisiones de gases de efecto invernadero [1]; por lo tanto, la generación de energías limpias tales como la eólica, marítima, geotérmica, biomasa y solar [2], se ha convertido en una necesidad mundial debido a la creciente demanda energética que agota rápidamente los recursos no renovables [3] [4] [5].

En Colombia, la energía solar fotovoltaica es un tema que se ha ido desarrollando paulatinamente [6] [7] [8], incluyendo la ciudad de Cúcuta, lo que hace necesario profundizar en el conocimiento de esta tecnología ecológica y poder estar al nivel de las grandes ciudades y los países desarrollados. El avance de la tecnología ha llevado a aprovechar la radiación electromagnética que el sol emite sobre la Tierra; el efecto fotoeléctrico permite transformar la energía solar en energía eléctrica de corriente continua [9].

La energía fotovoltaica es el proceso de convertir la luz del sol directamente en energía eléctrica por medio de células solares, sin perjudicar el medio ambiente, sin generar basuras y sin dañar la salud. El sol ofrece la posibilidad de detener o al menos minimizar el cambio climático y el agotamiento de los recursos naturales; por otro lado, invertir en la energía solar ofrece beneficios económicos [10] para las empresas que incursionen en este ámbito.

La energía solar puede aprovecharse en dos direcciones, una orientada a los sistemas conectados a la red y la otra a los sistemas autónomos; estos últimos están conformados por una serie de elementos básicos para su correcto funcionamiento y control, tal como se observa en la Figura 1 [9].

Las instalaciones solares fotovoltaicas constan de paneles solares, que a su vez contienen células solares individuales hechas de materiales

semiconductores como el silicio (cristalino y amorfo). Cuando brilla el sol, una célula solar produce una corriente y un voltaje para generar energía eléctrica. Una variedad de materiales puede satisfacer los procesos en la obtención de energía fotovoltaica, pero la mayor parte en la conversión de esta energía, es la utilización de materiales semiconductores en forma de una unión PN [11].

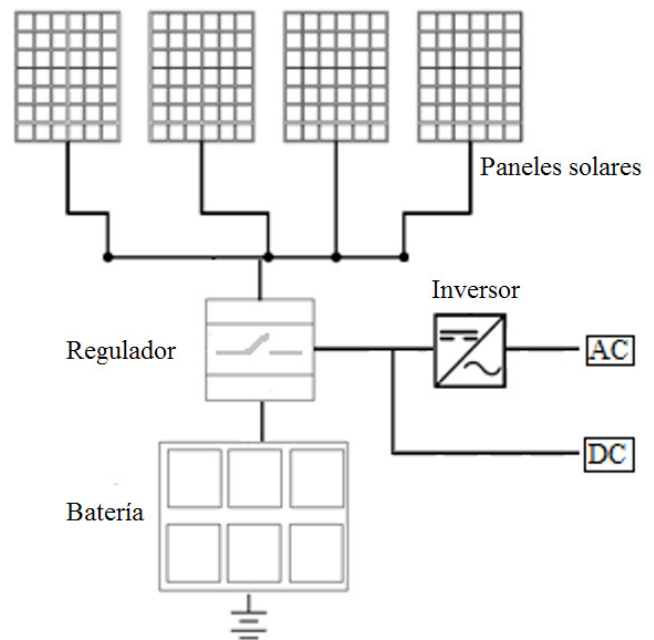


Figura 1. Esquema general de un sistema fotovoltaico autónomo.

Fuente: adaptado de [9].

La ciudad de Cúcuta actualmente demanda un gran flujo vehicular de transporte público con un porcentaje considerable de usuarios que lo utilizan, además de tener un clima tropical con unos niveles de contaminación variables; con esta situación, se observa la falta de estaciones de autobús y la ausencia de medios o equipos para que los usuarios conozcan variables climatológicas relacionadas con el nivel de contaminación ambiental. En países como los Estados Unidos existen iniciativas tales como soofa [12], que tiene el propósito de monitorizar variables de contaminación mediante el uso de sensores embebidos con el fin de crear ciudades inteligentes.

En este trabajo se propone un sistema electrónico alimentado con energía solar fotovoltaica, que permite monitorizar variables físicas relacionadas con la contaminación ambiental, en una estación de autobús de la ciudad. El sistema permite complementar otros estudios sobre movilidad vehicular que se han desarrollado previamente en San José de Cúcuta [13].

MÉTODOS

Análisis de la situación actual en la ciudad

Se identificaron los tipos de tecnologías que actualmente componen el sistema de energía solar fotovoltaica y que puede variar de acuerdo con su localización y su utilidad; para ello se realizó un recorrido con el fin de verificar la operación y el funcionamiento de los sistemas de energía solar fotovoltaica instalados en la ciudad. A continuación, se listan algunas empresas donde se ha implementado este tipo de tecnología.

- Canchas QATAR (sector Los Patios).
- Supermercado JM (sector Los Patios).

- Restaurante donde Juana (sector Villa del Rosario).

Por otra parte, se realizó un recorrido para observar algunas estaciones de autobuses presentes en la ciudad para comprobar su estado y el uso que los usuarios le dan al momento de utilizar este servicio. A continuación, se mencionan algunas estaciones de autobús principales presentes en la ciudad.

- Estación de autobús Centro, ubicada en la calle 13 entre avenidas 5 y 6.
- Estación de autobús Parque Colón, ubicada en la avenida 3 entre calles 12 y 13.
- Estación de autobús Fuente Luminosa, ubicada en la calle 8 con avenida 0.
- Estación de autobús Guaimaral, ubicada en la avenida Guaimaral cerca al Hospital.

Dentro de este recorrido se observó el poco uso de estas estaciones debido al mal estado de algunas, además de la falta de cultura ciudadana al momento de utilizar este medio, donde la mayoría de personas las utilizan para conversar con sus conocidos, aparte de la poca señalización de estas estaciones, como se observa en la Figura 2.



Figura 2. Estaciones de autobús instaladas en la ciudad de Cúcuta.

Fuente: elaboración propia.

Arquitectura del sistema electrónico

En la Figura 3 se observa la arquitectura del sistema electrónico, el cual está conformado por: los sensores, para realizar las mediciones climáticas en la estación; el microcontrolador PIC 16F877A, para la adquisición de la información de los sensores; la tarjeta Raspberry Pi 3, encargada del procesamiento de la información, y la pantalla LED, que permite la visualización de la información a los usuarios.

En la Tabla 1 se indican las variables climatológicas a medir junto con sus respectivos sensores, los cuales se encuentran conectados con el microcontrolador para realizar el proceso de adquisición de datos; la información es transmitida a través del protocolo de comunicación I2C hacia la tarjeta Raspberry Pi 3, encargada de procesar y ejecutar la interfaz gráfica, la cual a través del puerto HDMI será visualizada en la pantalla LED por los usuarios de la estación de autobús.

Para la adquisición de los datos medidos por los sensores, se ha empleado el PIC 16F877A, utilizando sus puertos analógicos; para el envío de la información hacia la Raspberry Pi se han empleado los puertos SCL y SDA. En la Figura 4 se observa el diagrama de flujo que describe el algoritmo empleado para esta tarea.

Tabla 1. Variables climatológicas.

Variables climatológicas	Sensor
Ruido	LM393
Humedad	HSM 20G
Temperatura	HSM 20G
Dióxido de carbono	MQ 135
Radiación ultravioleta	UVM 30A
Tiempo	Módulo RTC

Fuente: elaboración propia.

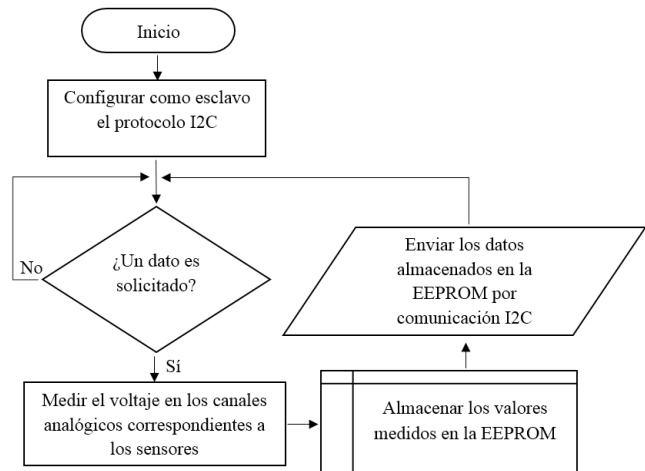


Figura 4. Diagrama de flujo del microcontrolador.

Fuente: elaboración propia.

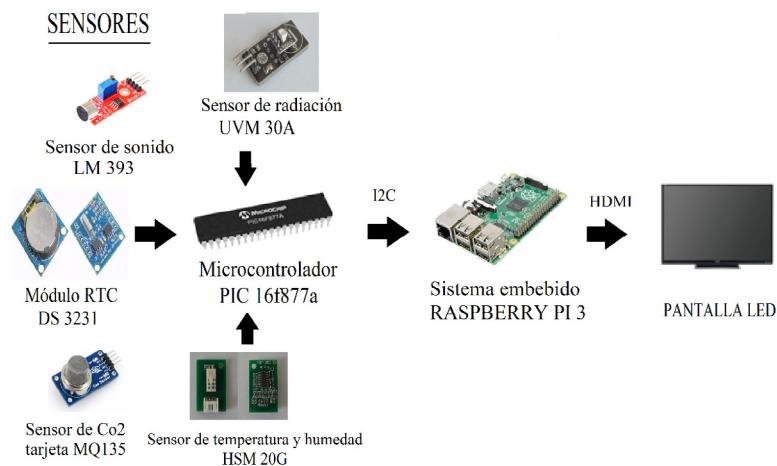


Figura 3. Arquitectura del sistema electrónico.

Fuente: elaboración propia.

Para realizar la interfaz gráfica se ha empleado la tarjeta Raspberri Pi 3, la cual se encarga de recibir la información enviada por el PIC mediante la comunicación I2C. Para el desarrollo del algoritmo se ha empleado el lenguaje de programación Python, haciendo uso de la librería TKinter para crear cinco ventanas de usuario para la visualización de la información recibida respecto al estado de las variables climatológicas y los tiempos de llegada de los buses a la estación. Para definir el consumo de energía medio diario de la estación de autobús, se tuvo en cuenta el tiempo estimado de trabajo diario de los equipos eléctricos y electrónicos que se observan en la Tabla 2. El diagrama esquemático del circuito y los códigos fuente del microcontrolador y la tarjeta Raspberry Pi se encuentran en un repositorio público en la plataforma GitHub con el nombre de upervisión-ambiental.

Teniendo en cuenta la eficiencia de los componentes que conforman el sistema fotovoltaico, siendo estas del 90% para el inversor, 95% para el cableado y 95% para las baterías se obtiene un consumo de energía de 3922,4 Wh/día, lo cual equivale a 163,4 Ah/día, usando un voltaje de corriente directa de 24 V en el banco de baterías.

Para realizar el diseño del sistema fotovoltaico, se requiere determinar la radiación solar incidente en la ubicación donde se realizará la instalación, para ello se ha consultado el atlas de radiación solar en

Colombia del IDEAM [14], seleccionando la estación satelital autónoma de la Universidad Francisco de Paula Santander de la ciudad de Cúcuta, la cual se encuentra a una Latitud de 7°53'56,7" N, Longitud 72°29'15,1"W y a 311 metros sobre el nivel del mar. Estos datos corresponden a la radiación solar diaria promedio de los meses de enero a diciembre desde el 2006 al 2014.

Teniendo en cuenta estos datos, se determinaron cuáles son los meses con valores de radiación solar más bajos, tal como se muestra en la Figura 5, en la que se observa la curva de radiación en función de las diferentes horas del día para los doce meses del año; por lo tanto, se seleccionó el mes de marzo con la radiación solar más baja 4.660 Wh/m², utilizando su equivalente en horas solar pico se determinó que la radiación solar para el mes más crítico es de 4,66 HSP.

Para calcular el número de baterías, se consideraron dos días de autonomía en los cuales el sistema funcionará de forma normal en ausencia total de sol. Se calcula la capacidad total del sistema de acumulación, considerando los días de autonomía y teniendo en cuenta una máxima profundidad de descarga del 50% empleando la ecuación 1, obteniendo una capacidad total de 726,22 Ah.

$$\text{Capacidad total Ah} = \frac{\text{corriente del sistema} \cdot \text{Días de autonomía}}{\text{Máx. profundidad de descarga} \cdot \text{Corrección por temperatura}} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Tabla 2. Consumo de energía diario.

Descripción	Nº de componentes	Potencia (W)	Potencia total (W)	Horas de funcionamiento diario	Total Energía necesaria (Wh)
Circuito electrónico	1	10	10	24	240
Pantalla LED	1	69	69	24	1.656
Luminarias LED	2	20	40	12	480
Toma corrientes	3	15	45	18	810
Energía total del circuito					3.186

Fuente: elaboración propia.

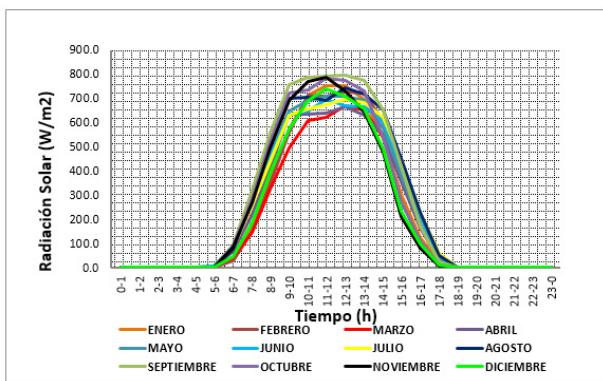


Figura 5. Radiación solar promedio de los doce meses del año.

Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta las 4,66 horas solares pico calculadas previamente, se determina la cantidad de paneles solares que formarán el arreglo fotovoltaico, teniendo en cuenta la corriente que el sistema consume durante todo el día (163,4 A) se tiene que los paneles deben suministrar una corriente instantánea de 35,02 A. Para suplir esta corriente se emplean cuatro paneles solares en paralelo.

Para conocer el número de reguladores que forman parte del sistema, se aumenta en 2 % la corriente pico máxima del generador fotovoltaico, obteniendo una corriente de 43,7 A del regulador.

La potencia del inversor está condicionada a la potencia global de los componentes de la estación de

autobús, en donde el consumo total instantáneo es de 164 W, teniendo en cuenta un factor de seguridad de 25%, la potencia nominal mínima del inversor es 205 W.

Para validar los cálculos realizados se ha realizado su respectiva simulación en el software PVsyst [15] para determinar el comportamiento del sistema fotovoltaico autónomo; con base en lo anterior, se establece si cumple con los requerimientos de potencia de los equipos a alimentar.

RESULTADOS

Según los criterios de diseño expuestos previamente, se han seleccionado los componentes que integran el sistema fotovoltaico autónomo tal como se muestran en la Tabla 3.

Para garantizar un correcto funcionamiento, es necesario el diseño de las protecciones adecuadas para cada uno de los componentes, tal como se indica en la Tabla 4.

En la Figura 6 se indica el diagrama de interconexión de los componentes que forman parte del sistema fotovoltaico autónomo encargado de suministrar la potencia necesaria para el correcto funcionamiento de los dispositivos de la estación de bus.

Tabla 3. Componentes del sistema fotovoltaico autónomo.

Descripción	Referencia del componente	Especificaciones técnicas	Nº de componentes
Paneles fotovoltaicos	UP-M320P-W	- Corriente máxima: 8,72 A - Potencia máxima: 320 W - Voltaje máximo: 36,7 V	4 (1 en serie, 4 en paralelo)
Baterías	DC-12-250AH generic	- Capacidad: 250Ah - Voltaje nominal: 12V	6 (2 en serie, 3 en paralelo)
Regulador de carga	Schneider electric	- Voltaje: 24 V - Corriente: 60 A	1
Inversor	GE INVERTER 300/24	- Voltaje: 24 V - Potencia: 300 W	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Protecciones del sistema fotovoltaico autónomo.

Equipo	Protección	Corriente nominal (A)	Voltaje nominal (V)
Panel fotovoltaico	Fusible	13,47A	55,58V
Arreglo fotovoltaico	Fusible	44,9A	55,58V
Batería	Fusible	67,35A	55,58V
Inversor	Interruptor automático bipolar	3A	110V

Fuente: elaboración propia.

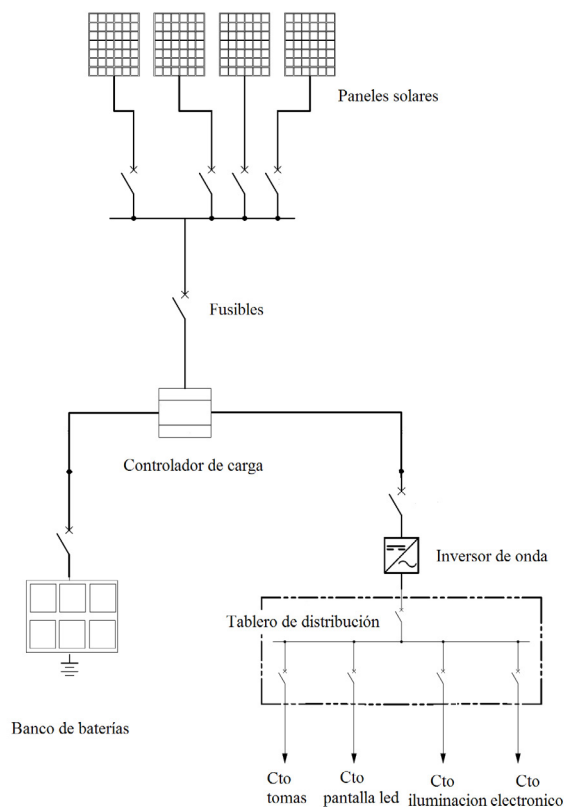


Figura 6. Diagrama de interconexión del sistema fotovoltaico autónomo.

Fuente: elaboración propia.

Empleando el *software* PVsyst se han ingresado los valores de las especificaciones técnicas de cada uno de los componentes seleccionados, determinando el comportamiento del sistema fotovoltaico

a lo largo de un año. En la Figura 7 se observan las pérdidas que sufre el sistema, calculando una potencia total de 1172 kWh al año.

En la Figura 8 se observa el diseño de la vista lateral de la estación de autobús con cada uno de sus componentes enumerados como sigue: (a) paneles solares, (b) lámparas LED, (c) toma corriente, (d) tablero del inversor, (d) regulador de carga, (e) baterías, (f) sistema electrónico, (g) pantalla LED.

La interfaz principal de usuario que observarán los peatones se aprecia en la Figura 9, en ella se encuentra el estado de las variables climatológicas de la estación. En la Figura 10 se indica la secuencia de ventanas que se visualizarán en la pantalla LED, cada una de ellas ha sido diseñada utilizando la librería TKinter de Python y son ejecutadas por la tarjeta Raspberry Pi 3.

DISCUSIÓN

Al momento de desarrollar varias tareas simultáneamente, como se evidenció en el presente trabajo, es necesario tener la capacidad de procesamiento multitarea. El sistema electrónico utilizado permitió desarrollar la simulación de los sensores de manera óptima para su posterior visualización de variables medidas, logrando informar de manera oportuna a los usuarios que hacen uso de las estaciones de autobús.

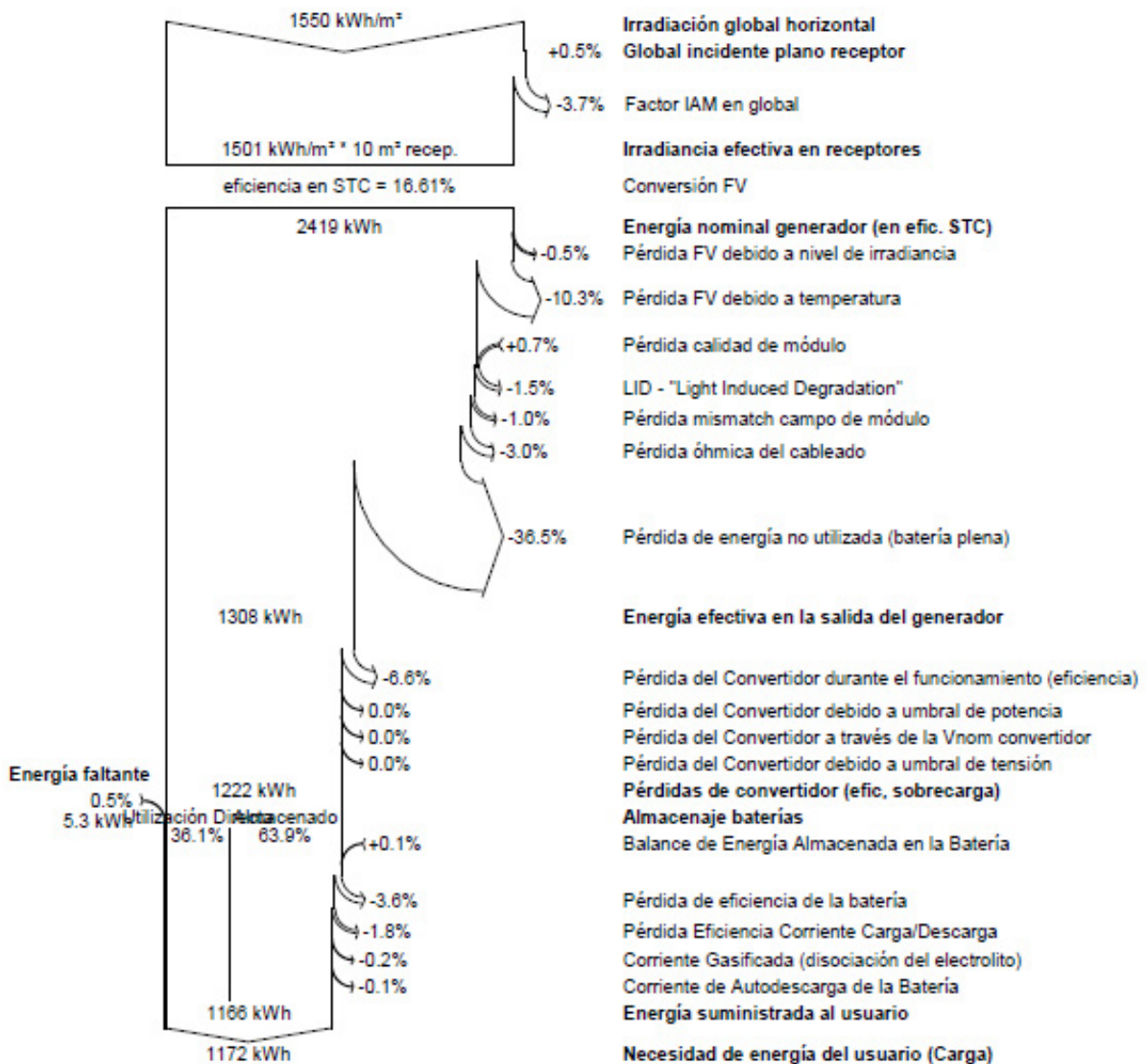


Figura 7. Diagrama de pérdidas anuales para el sistema autónomo.

Fuente: elaboración propia.

En el presente proyecto se ha utilizado la tarjeta Raspberry Pi 3 para llevar a cabo la recepción de los datos y soporte en la ejecución del algoritmo, brindando de manera constante la actualización del sistema, logrando así enviar la información para posteriormente ser visualizada en la pantalla LED, lo cual mejoró la eficiencia del proceso; todo esto soportado en el principio del procesamiento de multitarea, haciendo uso de las interrupciones.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos del diseño del sistema autónomo, si se implementa se lograrían establecer puntos ecológicos de energía para los ciudadanos, de tal manera que el ahorro y reducción de costos sería significativo, además de incentivar a las personas a hacer un uso más frecuente de las estaciones tecnológicas de autobús; por otro lado, ofrece

la posibilidad de integrar la red ciudadana y el sistema de transporte público y la opción de cargar los dispositivos móviles en el momento que se requiera.

Realizar las interfaces gráficas de manera didáctica, es una manera eficaz de lograr que los

usuarios entiendan y observen las diferentes variables climatológicas y las rutas de autobús, de este modo se mejora eficientemente el servicio de transporte público en la ciudad, contribuyendo con una mejor calidad de vida de sus habitantes.

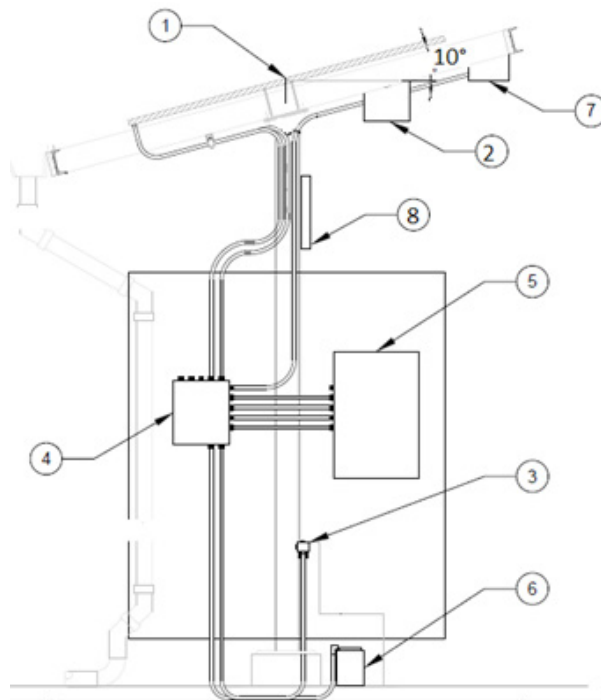


Figura 8. Vista lateral de la estación de autobús.

Fuente: elaboración propia.



Figura 9. Interfaz gráfica principal.

Fuente: elaboración propia.

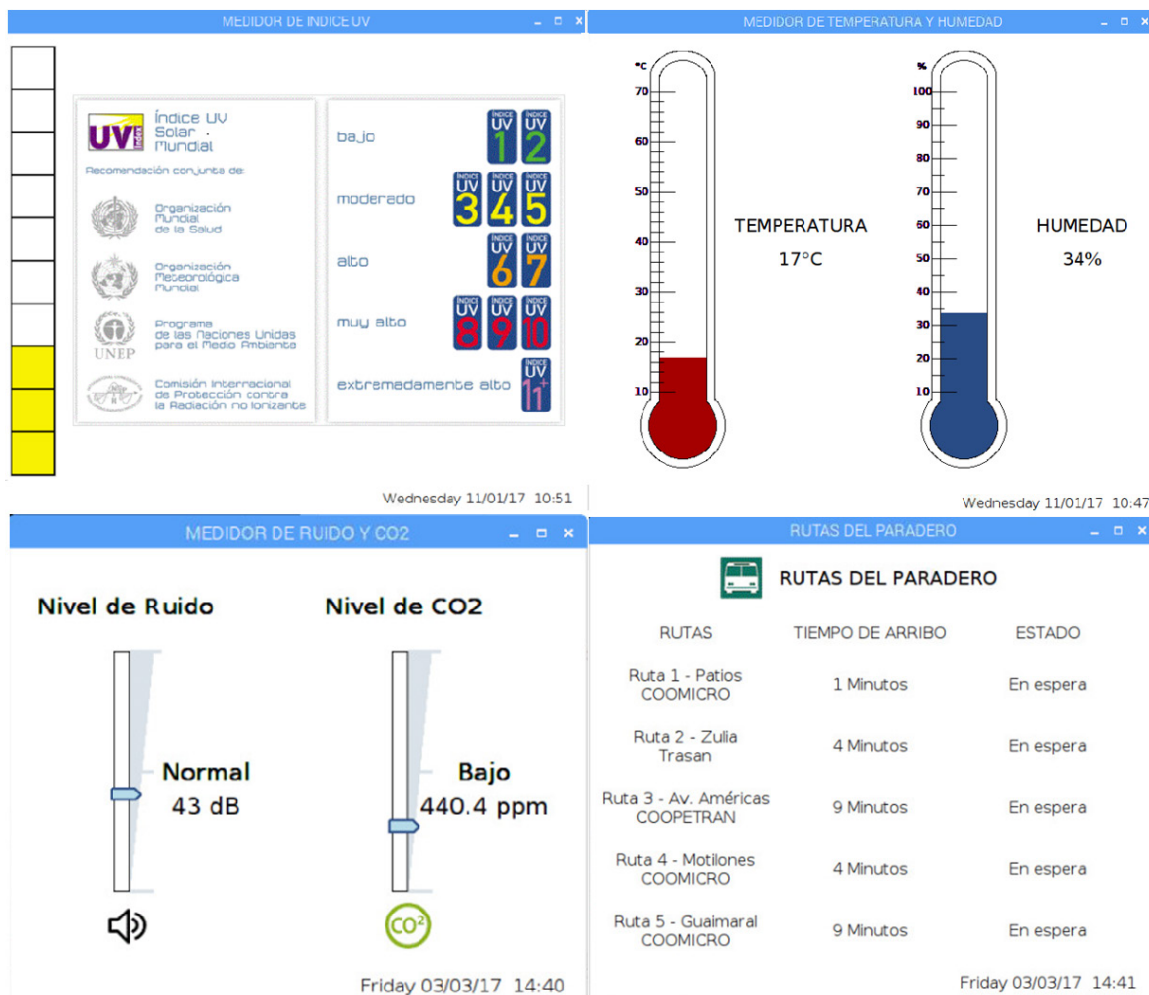


Figura 10. Secuencia de ventanas de la interfaz gráfica.

Fuente: elaboración propia.

REFERENCIAS

- [1] M. A. Mantilla Villalobos, J. F. Petit Suárez y G. Ordóñez Plata, "Control directo de potencia aplicado a sistemas fotovoltaicos conectados a la red". *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, pp. 47-60, 2014.
- [2] C. G. Rodríguez-Borges y A. Sarmiento-Sera, "Dimensionado mediante simulación de sistemas de energía solar fotovoltaica aplicados a la electrificación rural". *Ingeniería Mecánica*, vol. 14, n° 1, pp. 13-21, 2011.
- [3] L. Herrera, A. Miranda, E. I. Arango-Zuluaga, C. A. Ramos-Paja y D. González-Montoya, "Dimensionamiento de sistemas de generación fotovoltaicos localizados en la ciudad de Medellín". *Tecno Lógicas*, pp. 289-301, 2013.
- [4] C. A. Correa Flórez, G. A. Marulanda García y A. F. Panesso Hernández, "Impacto de la penetración de la energía solar fotovoltaica en sistemas de distribución: estudio bajo supuestos del contexto colombiano". *Tecnura*, vol. XX, n° 50, pp. 85-95, 2016.
- [5] C. M. Giraudy Arafet, I. Massipe Cano, R. Rodríguez Rivera, M. Rodríguez Gámez y A. Vázquez Pérez, "Factibilidad de instalación de sistemas fotovoltaicos conectados a red". *Ingeniería Energética*, vol. XXXV, n° 2, pp. 141-148, 2014.

- [6] A. Escobar Mejía, M. Holguín Londoño y J. C. Osorio R., "Diseño e implementación de un seguidor solar para la optimización de un sistema fotovoltaico". *Scientia Et Technica*, vol. XVI, n° 44, pp. 245-250, 2010.
- [7] A. Escobar Mejía, C. A. Torres y R. A. Hincapie Isaza, "Conexión de un sistema Fotovoltaico a la red eléctrica". *Scientia Et Technica*, vol. XV, n° 43, pp. 31-36, 2009.
- [8] J. A. Hernández Mora, C. L. Trujillo Rodríguez y W. A. Vallejo Lozada, "Modelo de un sistema fotovoltaico interconectado". *Tecnura*, vol. XVII, pp. 26-34, 2013.
- [9] J. D. Mesa, A. Escobar Mejía y R. A. Hincapie Isaza, "Descripción y análisis del efecto fotovoltaico en la región". *Scientia Et Technica*, vol. XV, n° 42, pp. 327-332, 2009.
- [10] M. Rodríguez Gámez, A. Vázquez Pérez, M. Castro Fernández y M. Vilaragut Llanes, "Sistemas fotovoltaicos y la ordenación territorial". *Ingeniería Energética*, vol. XXXIV, n° 3, pp. 247-259, 2013.
- [11] N. Journ, "PV EDUCATION". 2003. [On Line]. Available from: <http://www.pvcdrom.org/pvcdrom/solar-cell-structure>
- [12] soofa, "Smart City". 2016. [On Line]. Available from: <http://www.soofa.co>
- [13] J. M. Celis-Peñaranda, C. D. Escobar-Amado, S. B. Sepúlveda-Mora, S. A. Castro-Casadiago, B. Medina-Delgado y J. J. Ramírez-Mateus, "Control adaptativo para optimizar una intersección semaforica basado en un sistema embebido". *Ingeniería y Ciencia*, vol. XII, n° 24, pp. 169-193, 2016. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.12.24.8>
- [14] IDEAM, "Atlas de radiación global. Lista de estaciones automáticas". 2015. [En línea]. Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/basfiles/Anexo-Lista-de-estaciones-automatizadas-de-radiacion-global-del-Ideam.pdf>
- [15] L. Osorio Laurencio y R. Montero Laurencio, "Análisis energético de un sistema fotovoltaico integrado a una cubierta plana horizontal". *Ingeniería Energética*, vol. XXXVII, n° 1, pp. 45-54, 2016.





Uso de conceptos estructurantes para la enseñanza de circuitos eléctricos en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Use of structuring concepts for electrical circuits teaching in the Engineering Faculty at the Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Jorge Enrique Salamanca Céspedes¹ Adriana Patricia Gallego Torres²

Para citar este artículo: Salamanca, J. y Gallego-Torres, A. (2017). Uso de conceptos estructurantes para la enseñanza de circuitos eléctricos en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. *Revista Redes de Ingeniería*. 8(1), 47-55, doi: <https://doi.org/10.14483/2248762X.12699>.

Recibido: 25-abril-2017 / **Aprobado:** 27-septiembre-2017

Resumen

La propuesta didáctica que se presenta plantea la incorporación de los conceptos estructurantes de la energía para la enseñanza de circuitos eléctricos y su relación con los conceptos de carga, corriente eléctrica y diferencia de potencial. Es el comienzo de un tema de estudio más avanzado de educación en energías renovables, con un enfoque en energía eólica. Cabe resaltar, adicionalmente, que esta propuesta es el resultado de un análisis de antecedentes teóricos que hacen referencia a aspectos tales como: modelo didáctico argumentativo, historia de las ciencias, relaciones CTS (ciencia, tecnología y sociedad), epistemología de las ciencias y modelo pedagógico constructivista. También, se hace una propuesta de unidad didáctica, la cual se encuentra conformada por una serie de actividades dentro de las que se contempla un segmento respecto de las ideas previas de los estudiantes, una lectura de un hecho histórico de la ciencia, el montaje de un par de experimentos de laboratorio y una propuesta de evaluación.

Palabras clave: concepto estructurante, energía, historia de la ciencia, proceso argumentativo, unidad didáctica.

Abstract

The didactic proposal that is presented, uses the approach through the use of structuring concepts, that of energy, for the teaching of electric circuits and its relation with the concepts of charge, electric current and potential difference. It is the beginning of a more advanced study topic in renewable energy education, with a focus on wind. It is noteworthy that this proposal is the result of a theoretical background analysis that refers to aspects such as: argumentative didactic model, history of sciences, STS relations, epistemology of the sciences and constructivist pedagogical model. There is also a proposal for a didactic unit, which is made up of a series of activities, which include a segment regarding the students previous ideas, a reading of a historical fact of science, a couple of laboratory experiments and an evaluation proposal.

Keywords: energy, didactic unit, structuring concept, argumentative process, history of science.

1. Estudiante del doctorado en Educación; docente planta, asociado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: jsalamanca@udistrital.edu.co
2. Doctora en Ciencias Físicas, Didáctica de las Ciencias, Universidad de Valencia; docente planta, titular en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: adpgallegot@udistrital.edu.co

INTRODUCCIÓN

La propuesta que se presenta en este documento es elaborar, con base en el modelo de conceptos estructurantes o metaconceptos para la enseñanza de circuitos eléctricos, una unidad didáctica en que se articule la historia, la didáctica y la filosofía de las ciencias, con base en un modelo o proceso de enseñanza-aprendizaje argumentativo [1]; cabe señalar que se cuenta con un creciente número de propuestas de unidades didácticas, las cuales dan cuenta de experiencias pedagógicas y evaluaciones de la planificación y principios que las rigen [2].

En el contexto de las ciencias de la educación, la didáctica de las ciencias como disciplina de conocimiento, da indicios sobre el desarrollo evolutivo de un conjunto de reglas implícitas que tiene la comunidad académica para hacer públicos sus saberes [3]; estas, junto con el abordaje y la propuesta de solución de problemas, se relacionan con la enseñanza y el aprendizaje de las ciencias (Gil, 2000) por medio de estrategias didácticas de enseñanza con las que se busca facilitar la adquisición constructiva del conocimiento científico, además del desarrollo de habilidades y destrezas de pensamiento sin dejar de lado la dimensión humana. Son estas las finalidades que se esperan conseguir con la propuesta de esta unidad didáctica.

La pregunta desde donde se desarrolla la unidad didáctica es ¿qué se requiere para generar corriente en un circuito eléctrico?; esta tiene como propósito articular el concepto estructurante de energía con ciertos conceptos muy importantes en la construcción de los conocimientos sobre los circuitos eléctricos tales como la diferencia de potencial, la carga y la corriente eléctrica —desde un enfoque histórico y epistemológico— y, además, realizar una propuesta de unidad didáctica para un currículo de análisis de circuitos propuesto para los estudiantes de segundo semestre de Ingeniería Electrónica de la Universidad Distrital. Esta articulación busca centrar el proceso de enseñanza-aprendizaje de

circuitos eléctricos en campos tales como: el conceptual, procedimental y actitudinal hacia el desarrollo de competencias tecnocientíficas [4], [5]. Se parte de algunos planteamientos epistemológicos de Bachelard y se pretende presentar el uso de algunos planteamientos de Gagliardi (1986) respecto de los conceptos estructurantes, tal como la repercusión y la importancia de la historia de la ciencia en procesos de enseñanza-aprendizaje de circuitos eléctricos.

Los planteamientos base de Bachelard (1938), establecen la relevancia que tienen en la construcción del conocimiento el ofrecer una perspectiva de la ciencia mediante los aspectos históricos que han influido en su desarrollo. Este modelo tiene como base el concepto de cambio científico, dentro del cual existen tres categorías, en el marco de la epistemología, claramente definidas: en primer lugar, los obstáculos epistemológicos, que hacen referencia a formas de pensar arraigadas, conceptuales y metodológicas; en segundo lugar, las rupturas epistemológicas, que corresponden a formas en que el conocimiento científico contradice las ideas o creencias que proceden de un conocimiento ante todo primario, intuitivo y de sentido común, y, en tercer lugar, los actos epistemológicos, que hacen referencia a mecanismos por los cuales se van superando los obstáculos de la misma índole.

Con referencia a las concepciones, existen diversos investigadores que han teorizado sobre la importancia de conocer las nociones de los estudiantes, de los docentes en formación y de los docentes en activo desde diferentes perspectivas, lo que lleva a revisar al interior de una mirada del modelo constructivista la idea de los conceptos estructurantes; así, estos últimos son conceptos que van a transformar el sistema cognitivo de los estudiantes, de manera que les van a permitir adquirir conocimientos nuevos de forma coherente mediante la construcción de nuevos significados, o modificar otros conocimientos por reconstrucción de significados anteriores. Es por ello por lo que se hace

sumamente importante considerar las ideas previas de los estudiantes en cuanto a la identificación de los conceptos estructurantes y de sus orígenes [5].

Dicho lo anterior, el concepto de energía es estructurante porque no solo presume los preconcep- tos de energía desde la mecánica y sus relaciones con el cálculo, sino que se convierte en la base fundamental para construir otros conceptos antes mencionados; por otro lado, es fundamental para la construcción del conocimiento de los ingenieros de varias áreas de la ingeniería y para dar un paso hacia la educación en energías renovables.

Ahora bien, desde de una perspectiva epistemoló- gica existen varias propuestas que dan sustento al uso de la historia de las ciencias dado el cambio de las teorías científicas en relación con el tiempo, es esta la razón por la que la historia y el estudio de las ciencias se combinan en un interesante modelo en la investigación didáctica.

El modelo de dinámica científica ha sido propuesto por [6] en el libro *Modelos de cambio científico*, en este aborda la elaboración de modelos que expli- quen, justamente, los cambios que se han dado en la ciencia. La elaboración de unidades didácticas, fundamentan su trabajo bajo un referente concep- tual-epistemológico, así que parte de tres referentes de cambio científico: Thomas Kuhn, Imre Lakatos y Larry Laudan. Por otro lado, Ana Estany [6] pro- pone un nuevo enfoque para abordar la dinámica científica, queriendo llenar algunos de los vacíos y parcialidades explicativas encontradas en dichos modelos, su originalidad tiene como base que no pretende ser un modelo más.

De acuerdo con lo planteado anteriormente, y a la caracterización de actitudes en los estudiantes jun- to a la conceptualización de los contenidos, se ela- borará una unidad didáctica orientada al desarrollo de conceptos que se requieren para el curso de circuitos eléctricos; para ello, se parte del concep- to estructurante de “energía”, el cual se convierte

en la base de muchos otros conceptos que serán la base del conocimiento sobre los temas alrededor de este. La articulación con la historia de la ciencia se hará a partir del artículo “The dynamo electric current in its”, publicado en junio 3 de 1880, en lo que hoy es IEEE, por el doctor Siemens, con esta lectura se busca dejar como base una perspectiva histórica articulada con las apreciaciones episte- mológicas ya citadas.

La unidad didáctica que se propone busca un vín- culo de los conceptos estructurantes con el desa- rrollo de actitudes hacia la ciencia, además de su implementación práctica en el aula mediante el un experimento en que se observa, con elementos sen- cillos, la interacción y conversión de la energía, es allí donde se da inicio al trabajo en conceptos de energía eólica.

MÉTODOS

De los conocimientos previos, de los estu- dantes y los conceptos estructurantes

El problema que se ha detectado en los estudiantes de Análisis de Circuitos Eléctricos I, es que, por un lado, no asimilan fácilmente el concepto de ener- gía en la física mecánica con respecto a la idea un tanto más abstracta de energía eléctrica; la otra dificultad es que el curso de circuitos se toma en paralelo que el de Física Electromagnética, por lo que los estudiantes no han aprendido en su curso de física los conceptos de carga, voltaje y corriente eléctrica como base mínima para dar inicio al curso de circuitos, además, en los estudiantes no hay estructura matemática desde el punto de vista de la relación con otras ciencias y como una herramien- ta poderosa para el aprendizaje de estas en general.

Adicional a lo anterior, tradicionalmente en los cur- sos de circuitos, el proceso de enseñanza -apren- dizaje está orientado a la solución de problemas planteados a partir de la aplicación de una serie de técnicas y ecuaciones, convirtiéndose en un

aprendizaje esencialmente memorístico, por lo que los estudiantes no encuentran la relación entre los temas vistos y situaciones reales y concretas de la vida, lo que les impide aplicar sus conocimientos en otros momentos en que se requiera de un tipo de análisis distinto o al encontrarse en situaciones en que ciertas variables no estén determinadas para aplicar cierto algoritmo. En consecuencia, la forma en que se imparten este tipo de asignaturas — en particular la de circuitos— genera frustración y apatía en el estudiante durante el proceso y a la hora de resolver nuevos cuestionamientos.

Teniendo en cuenta lo anterior, Novak, Ausubel y Hanessian [7] hacen la propuesta del aprendizaje significativo con base en el conocimiento y en la modificación de la estructura cognitiva del estudiante, propone “anclar” nuevos conceptos que le permitan representar la realidad categórica y esquemáticamente. La resolución de problemas desde una perspectiva argumentativa contribuye a que el estudiante construya bases y asimile los problemas de análisis de circuitos como susceptibles de ser abordados a través de estrategias orientadas por sus propias hipótesis, objetivos e intereses, de forma abierta, con la justificación de un marco teórico coherente [2].

La idea es utilizar una metodología inspirada en hechos históricos que busque incentivar la motivación por las clases de circuitos, además, se busca que los estudiantes descubran que tienen la capacidad de construir conocimiento propio e incluso que pueden plantear nuevos problemas y solucionarlos ellos mismos; también se busca que el desarrollo de este tipo de actividades le brinde confianza al estudiante para desempeñarse con propiedad en diferentes aspectos y competencias, para que se enfrenten a problemáticas de diversas disciplinas [5].

Conseguir un aprendizaje significativo es uno de los objetivos de la unidad didáctica sobre la base de los conceptos estructurantes, otro es mejorar el

discurso del estudiante en el lenguaje escolar, dado que para la comprensión de este trabajo es indispensable tener claridad en la diferencia entre lo que se entiende por concepto (concepto ausubeliano) y por conceptos estructurante [8].

Los conceptos estructurantes o fundamentales son los que todo ingeniero electrónico debe conocer y haber internalizado desde el punto de vista del análisis de circuitos —se entiende por conceptos estructurantes los principios, teorías y leyes fundamentales de las ciencias en la medida en que aplican al estudio del análisis de circuitos—; estos conceptos permean el conocimiento, pero se han venido organizando como compartimentos que en muchos casos se convierten en disciplinas con episteme propio y se enseñan como asignaturas independientes e inconexas con el resto de los contenidos de las carreras. Las asignaturas, a su vez, son en general estáticas y tienen microcurrículos y autocontenidos independientes de las demás, aun cuando se organizan en forma secuencial que exige prerrequisitos y correquisitos no siempre necesarios.

El currículo construido alrededor de conceptos estructurantes, por el contrario, busca la interacción de saberes encaminados al estudio y comprensión de los circuitos eléctricos que son base fundamental de la ingeniería electrónica; en este sentido, los conceptos estructurantes pueden ser una buena estrategia para organizar racionalmente los planes de estudio y los currículos, pero se requiere diseñar una estrategia para relacionarlos, organizarlos e incluirlos en asignaturas, competencias y habilidades formales.

La idea de organización curricular por conceptos estructurantes implica que un mismo concepto estructurante se puede introducir en diferentes momentos y en diferentes asignaturas tradicionales, además, puede considerarse como un concepto teórico o como un concepto aplicado a una situación específica.

Los estudiantes, una vez adquieren la noción del concepto estructurante, le adjudican significados genéricos distintos a los términos de su dialéctica; ahora los estudiantes organizan el discurso de manera tal que la influencia de los elementos idiosincrásicos sobre las definiciones se ven atenuados, se organizan de forma estructurada por su significatividad y las relaciones entre ellos. De esta manera, la jerarquización entre las relaciones y los conceptos está supeditada por la existencia del concepto estructurante adquirido durante el proceso de enseñanza-aprendizaje [2].

Quintanilla, en [9], se pregunta cómo integrar la historia de las ciencias en la propuesta didáctica, a lo cual citando responde:

Promueve una mejor comprensión de los conceptos y métodos científicos; los enfoques históricos conectan el desarrollo del pensamiento individual con el desarrollo de las ideas científicas; la historia de la ciencia se hace necesaria para comprender la naturaleza de la ciencia, su objeto y su método de estudio; la historia de la ciencia cuestiona el cientificismo y dogmatismo que es común de encontrar en nuestras clases y nuestros textos de ciencia. [9]

La historia de las ciencias debe jugar un papel esencial, no debe tomarse solo como un bloque temático en los currículos, sino como una estrategia para la enseñanza de hechos y datos históricos o quizá un capítulo introductorio, esto implica que debería estar orientada desde una perspectiva constructivista. En los procesos de enseñanza-aprendizaje, la historia de la ciencia permite ver la postura de actitudes positivas de los estudiantes hacia el conocimiento, favorece la forma en que se asumen y resuelven conflictos bajo una mirada científica [2].

De esta forma, la unidad propuesta espera propender por la generación de cambios actitudinales, conceptuales y procedimentales en los estudiantes mediante el modelo de enseñanza por resolución de problemas (o ABP, aprendizaje basado en

problemas) de manera que, mediante la integración de desarrollos epistemológicos de la didáctica de las ciencias y la historia de las ciencias, se pueda abordar el concepto de energía. Lo anterior hace parte de una estrategia para fomentar el desarrollo de competencias científicas en los estudiantes de ingeniería electrónica [10].

La metodología

La metodología adoptada para resolver el problema es explotaría-descriptiva de corte interpretativo; así, un primer momento consistió en realizar un rastreo bibliográfico en el campo. Teniendo en cuenta lo anterior, se logra identificar el artículo de 1880 mencionado anteriormente, "The dynamo electric current in its", publicado en junio 3 de 1880, en lo que hoy es IEEE, por el doctor Siemens, con el que se busca, entre otras cosas, lo siguiente:

- Aprendizaje de conceptos de desde una perspectiva histórica.
- El aprendizaje y cuestionamiento autónomo, no solo desde la perspectiva histórica por los hechos del pasado, sino también por la misma evolución de los conceptos y la forma como se han desarrollado en la historia.
- La inspiración desde el autor del artículo.
- Despertar la curiosidad y la articulación entre ciencia y tecnología.
- Aplicar a contextos diferentes los conocimientos científicos para el desarrollo de las comunidades.
- Argumentar y utilizar el lenguaje de la ciencia en forma apropiada, y específicamente el concerniente a los temas relacionados con la energía y sus interacciones.
- Incentivar en los estudiantes la motivación por el estudio de educación en energías renovables.

La lectura se realizará por parte de los estudiantes desde una perspectiva histórica con el fin de comparar los conceptos en el momento de su escritura y, por otro lado, buscando señalar la importancia

del autor que se espera sea una motivación para los estudiantes; este texto debe ser comparado con la teoría vista en los cursos de física, con el fin de generar una producción en que analicen las diferencias y contextualicen las ideas propuestas en el artículo de Siemens.

El proyecto que se propone para desarrollar durante el semestre tiene como base los conceptos expuestos por el autor, pero es muy importante ver cómo las aplicaciones de las leyes de Faraday han conservado su vigencia y permiten el desarrollo de la sociedad, lo que puede mejorar la calidad de vida de las sociedades más vulnerables. Por otro

lado, con base en la lectura se abordarán temas como el concepto de energía, corriente eléctrica, carga, voltaje y conversión y conservación de la energía, también se puede mirar el concepto de inducción electromagnética y maquina eléctricas.

Se puede observar que a nivel curricular la propuesta es pertinente respecto al tema que se quiere trabajar como concepto estructurante. El siguiente paso es proponer a los estudiantes realizar la construcción de una turbina de generación de energía eólica, lo cual implica, por supuesto, la elaboración de la turbina, la consecución de un generador (dínamo) y la electrónica para utilizar esta energía (Figura 1).

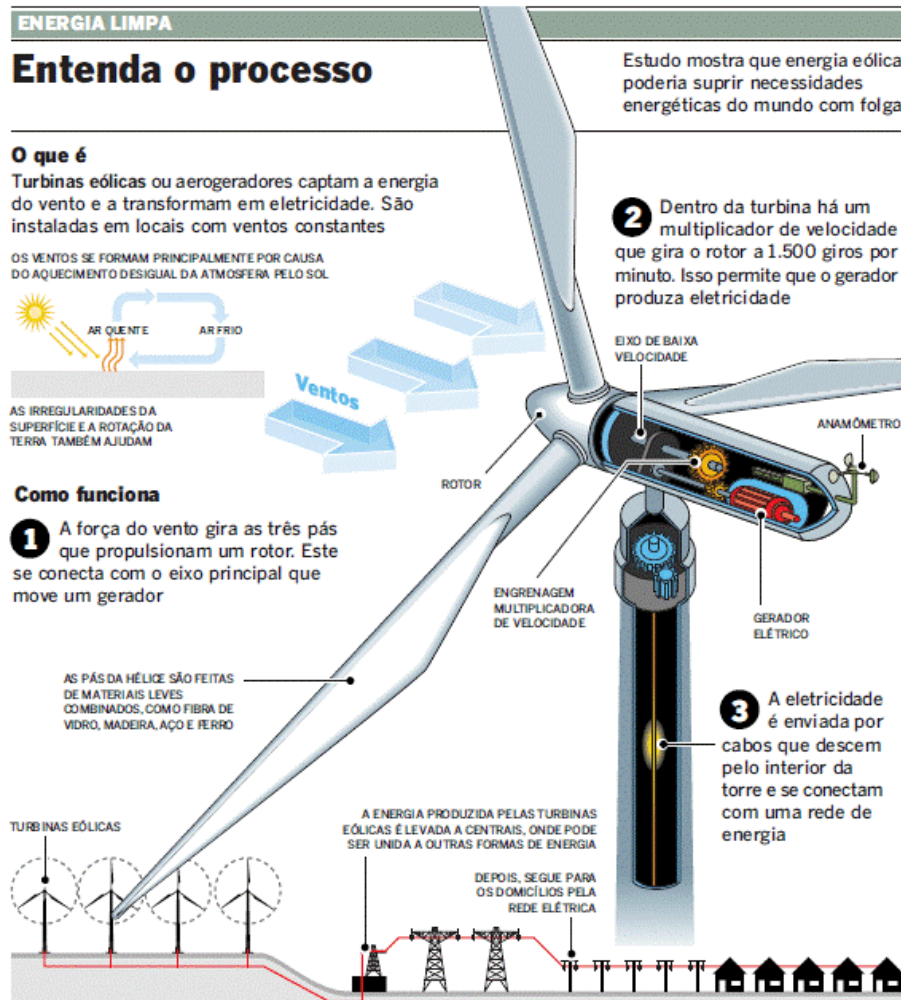


Figura 1. Generación de energía eólica.

Fuente: imágenes de Google.

Es importante que los estudiantes vean el generador (dínamo) como una maquina eléctrica de conversión de energía, también que consideren sus posibles aplicaciones para el proyecto que se propone; en este texto es necesario que el estudiante empiece a mirar el tema de generación de energía eléctrica eólica. Por otro lado, es importante ver la importancia de los conceptos relevantes para los estudiantes en el curso y que no solo giran en torno de la ley de inducción de Faraday, conceptos como diferencia de potencial, carga y corriente eléctrica serán parte del

lenguaje que ellos, durante y al finalizar el semestre, tendrán que manejar y utilizar con propiedad.

El concepto de generador (dínamo) se toma de la lectura, esta introduce el tema y, esencialmente, el concepto relevante aquí que es el de inducción, a partir de la ley de inducción de Faraday (Figura 2).

En general existen diferentes dispositivos (máquinas), que trabajan como convertidores de energía mecánica a eléctrica (Figura 3).

Partes de un aerogenerador

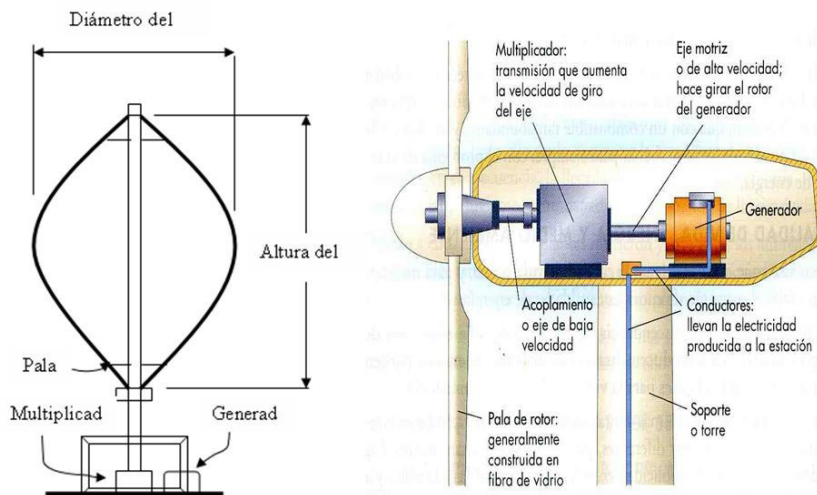


Figura 2. El generador.

Fuente: imágenes de Google.



2. Energía

21

2.4 ¿Qué dispositivos transformadores de energía conocemos? (2/9)

b) **Generador eléctrico.** Transforma energía mecánica de giro en energía eléctrica.

Ejemplo. La dinamo de una bicicleta es un generador eléctrico.



Figura 3. Generadores de energía eléctrica.

Fuente: imágenes de Google.

Una vez se tengan los conceptos de transformación de energía y sus implicaciones, los demás conceptos serán de fácil adquisición. Para finalizar el experimento se deben integrar los diferentes dispositivos de manera tal que se produzca y se utilice la energía eléctrica que se obtiene a partir de la energía del viento (la fuerza del viento; Figura 4).

Para finalizar el proyecto, se debe presentar el diseño de una turbina de generación eólica de baja potencia, junto con un documento que será socializado ante el grupo de estudiantes y se usará como una forma de evaluación que permita conocer si se lograron los objetivos propuestos y, en particular, la aprehensión del concepto de energía. Para esto, se propone que los diferentes estudiantes presenten en su informe todo el proceso de diseño

e implementación, argumentando desde lo teórico hasta lo práctico y con los modelos matemáticos que respalden todo el sistema de adquisición y transformación de energía y sus implicaciones; respecto a la turbina, se debe producir un nivel de potencia que se pactará en un comienzo entre mínimo cinco vatios.

Se espera motivar a los estudiantes para que, al cabo de unos pocos años, puedan construir generadores eólicos de baja potencia, no solo como un proyecto académico, sino también como un proyecto de vida para quienes trabajen en el desarrollo e implementación pensando en solucionar el problema de la energía a sectores de la comunidad que aún no tienen acceso a un sistema energético que les mejore la vida.

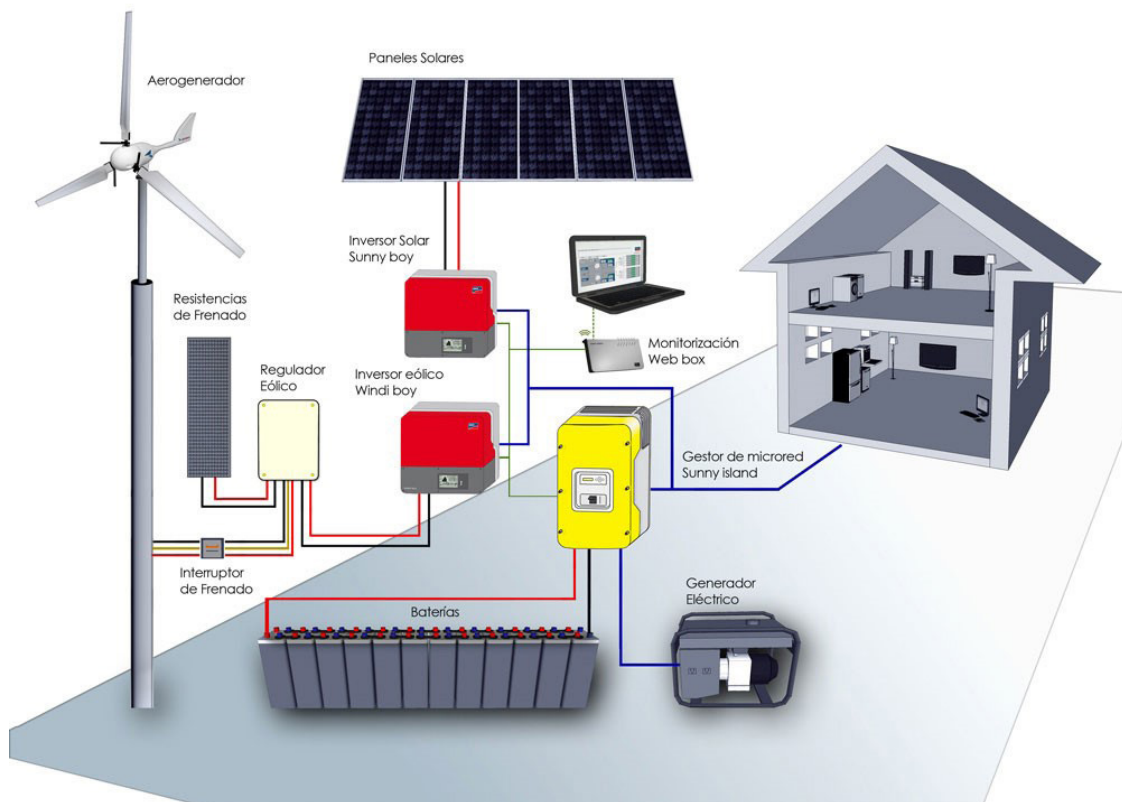


Figura 4. Utilización e integración de fuentes de energía.
Fuente: imágenes de Google.

CONCLUSIONES

El uso de conceptos estructurantes para la enseñanza de circuitos eléctricos se convierte en una herramienta didáctica con la que, adicionalmente, se pueden articular conocimientos y la historia de la ciencia. Se espera que no solo se obtenga aprehensión de conocimientos, pues con el uso de estos se puedan desarrollar otras actitudes y aptitudes de los estudiantes frente a la ciencia, a la profesión y a la vida misma.

REFERENCIAS

- [1] Barros M. Juan F. *Argumentación Científica de Ingenieros en Formación. El aprendizaje de la hidráulica en el aula a partir de casos de historia de las ciencias*. Tesis Doctoral, Universidad de Antioquia, 2014.
- [2] Mosquera Carlos J. et. al. "Una propuesta didáctica para la enseñanza de los conceptos estructurantes de discontinuidad de la materia y unión química desde la epistemología y la historia de la ciencia contemporáneas". *Revista Científica*, enero –diciembre, no. 12, 2010.
- [3] Adúriz-Bravo, A. e Izquierdo, M. "Acerca de la didáctica de las ciencias como disciplina autónoma". *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, Vol. 1, Num. 3, 2002. [En línea]. Disponible en: <http://www.saum.uvigo.es/reec>
- [4] Aragón-Méndez, M., García-Carmona, A., y Acevedo-Díaz, J. A. "Aprendizaje de estudiantes de secundaria sobre la naturaleza de la ciencia mediante el caso histórico de semmelweis y la fiebre puerperal". *Revista Científica*, 4(27), 2016, 302-317. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.RC.2016.27.a1>
- [5] Acevedo-Díaz, J. A., y García-Carmona, A. "Rosalind Franklin y la estructura molecular del ADN: un caso de historia de la ciencia para aprender sobre la naturaleza de la ciencia". *Revista Científica*, 2(25), 2016, 162-175. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.RC.2016.25.a2>
- [6] Estany, A., *Modelos de cambio científico*. Barcelona: Editorial Crítica, 1990.
- [7] Ausubel, D., Novak, J. y Hanassian, H. *Psicología educativa, un punto de vista cognoscitivo*. México D.F.: Editorial Trillas, 1976.
- [8] Carrascosa-Alís, J. "Ideas alternativas en conceptos científicos". *Revista Científica*, 1(18), 2014, 112-137. <https://doi.org/10.14483/23448350.5591>
- [9] Quintanilla, M. "Historia de la ciencia y formación del profesorado: una necesidad irreductible". *Revista de la Facultad de Ciencia y Tecnología, Investigación en Experiencias Didácticas en Matemáticas, Ciencias Experimentales y Tecnologías*, núm. Extra, 2005.
- [10] Acevedo-Díaz, J. A., García-Carmona, A., del Mar Aragón-Méndez, M., y Oliva-Martínez, J. M. "Modelos científicos: significado y papel en la práctica científica". *Revista científica*, 3(30), 2017.
- [11] Gil Pérez, D. y Pessoa De Carvalho, A.M. (2000). Dificultades para la incorporación a la enseñanza de los hallazgos de la investigación e innovación en didáctica de las ciencias. *Educación Química*, 2000.
- [12] Gagliardi, R., *Los Conceptos Estructurales en el Aprendizaje por Investigación*, Ciencias Biológicas, Universidad de Ginebra, 1986.
- [13] Bachelard G., *La formación del Espíritu Científico*, 1938.

