Bogotá, D.C. | ISSN: 2745-2662 | Agosto 2022
Periodicidad Semestral | Volumen II

Ciber-Sistemas

Revista de Ingeniería

LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA
www.ulibertadores.edu.co

Revista Ciber-Sistemas

Fundación Universitaria Los Libertadores
Bogotá, agosto de 2022
ISSN: 2745-2662

Presidente del Claustro
Juan Manuel Linares
Rectora
Ángela María Merchán Basabe
Vicerrectora General
María Angélica Cortes Montejo
Vicerrector Académico
Vladimir Ballesteros Ballesteros

Comité Editorial

Jesús Manuel Gutiérrez Bernal
Omar Ariel Nova Manosalva
Ana Carolina Cabrera Blandón
Juan Carlos Rubriche Cárdenas
John Petearson Anzola

Editor Jefe

Jorge Luis Nisperuza Toledo

CIBER-SISTEMAS

Licencia de Publicación

CC BY NC ND

Publicación disponible en:
http://hdl.handle.net/11371/4947

Nota del editor

La tecnología y la educación son la clave para la investigación, el desarrollo y la innovación de cualquier país. La necesidad de refugiarnos en ellas en post pandemia, ha provocado que cada vez más, esta sociedad vuelque su mirada en el desarrollo tecnológico y la inclusión digital en su economía. Ante éste escenario, se resalta la resiliencia que ha tenido la logística en diversos sectores de la industria, destacando la Tecnología 5G, IoT, Inteligencia Artificial y Blockchain que han cambiado la forma de concebir nuevos modelos de negocios.

Artículos de Divulgación

Artículos de Divulgación

05

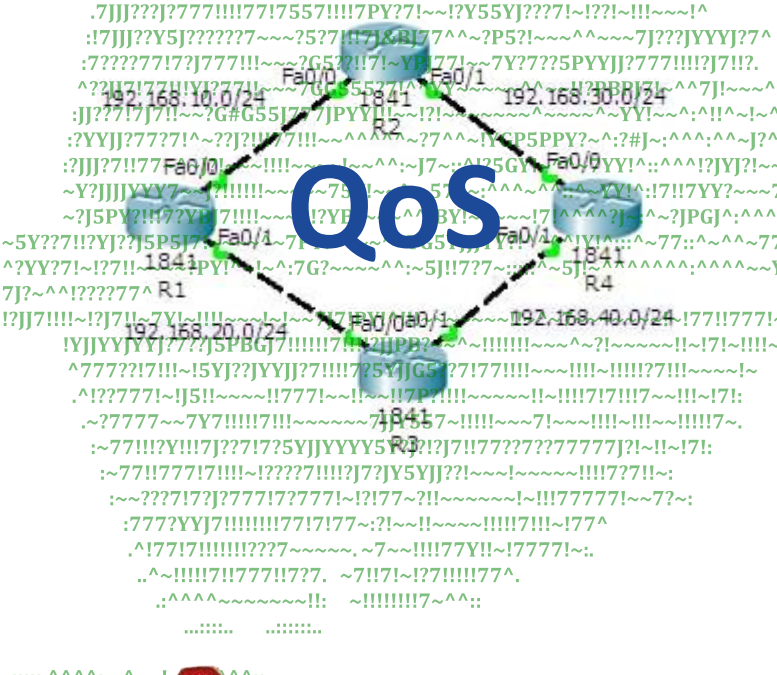
Análisis de metodologías de evaluación de rendimiento en redes inalámbricas que utilizan el protocolo 802.11

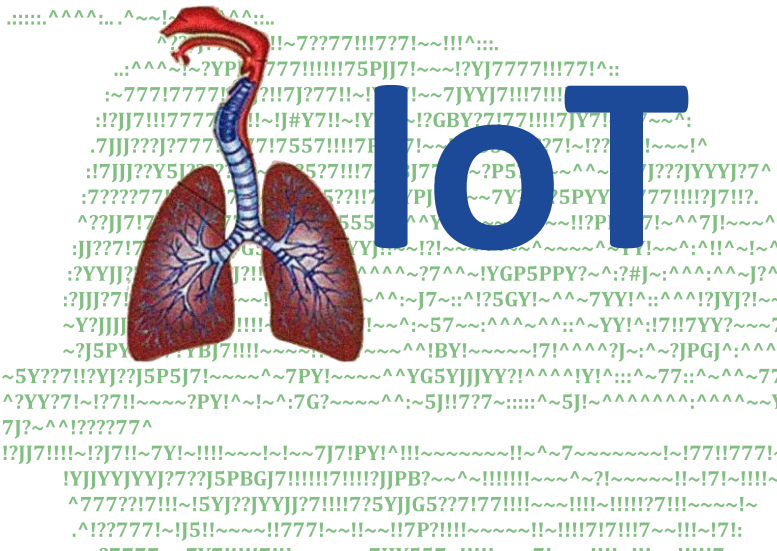
14

Calidad de servicio (QoS) del protocolo 802.11ad con respecto a sus antecesores (Ancho de banda, protocolos, tasas de transferencia, tecnología de Tx/Rx)

21

Sistemas de alerta temprana como herramienta de prevención de infecciones respiratorias agudas





Revista Ciber-Sistemas
Agosto 2022, Volume 2, 05–13.
https://repository.libertadores.edu.co/handle/11371/23

CIBER-SISTEMAS

Análisis de metodologías de evaluación de rendimiento en redes inalámbricas que utilizan el protocolo 802.11

Hector Manuel Herrera
Fundación Universitaria
Los Libertadores

Tatiana Marcela Angulo
Fundación Universitaria
Los Libertadores

Juan Manuel Báez
Fundación Universitaria
Los Libertadores

Resumen

En la actualidad las redes inalámbricas se han destacado en diversos escenarios en donde se ven reflejados en las industrias, empresas e incluso instituciones. El protocolo 802.11 es el conjunto de protocolo más utilizado para todo este tipo de redes, esto mediante funciones de capas físicas y de control para acceso al medio. El procedimiento implementado en estas dos capas serán las determinadas para el rendimiento y las posibilidades en la aplicación de red. El presente trabajo tiene como objetivo presentar el análisis y las diferencias de diferentes metodologías de evaluación del rendimiento en redes inalámbricas 802.11 describiendo así las fortalezas de cada metodología y en donde se podría aplicar cada modelo.

Palabras Clave: Redes Inalámbricas, Metodología, Fases, Protocolo, WLAN, 802.11.

1. Marco teórico

En la actualidad, comúnmente utilizamos redes inalámbricas mayormente para comunicarnos y enviar información sin la necesidad de utilizar cables, esto lo hace más útil y eficaz su uso. El protocolo IEEE 802.11 como ya es bien sabido es una agrupación específica de control de acceso al medio (MAC) y de la capa física (PHY), esta tiene como característica que su banda de frecuencia es de 2,4 GHz, 5 GHz, y 60 GHz. Este estándar fue lanzado en 1997, y desde ahí ha conllevado a tener varias modificaciones y mejoras en los últimos tiempos. Por último estas redes inalámbricas utilizan como marca Wi-Fi Villacís Conforme (2007). En las redes inalámbricas se debe cumplir una metodología en específica, estas son fases que se de realizar, en esta investigación se abarcara la metodología del protocolo protocolo IEEE 802.11 las cuales son las siguientes:

- **Planeación**: En esta fase se debe identificar el problema de investigación, determinar todas las variables del objeto del estudio, de la misma manera se debe planear y analizar el trabajo experimental y finalmente realizar el experimento.
- **Análisis**: En esta etapa se mira que modelo de análisis se debe utilizar y qué técnicas estadística describe mejor el comportamiento de los datos.

- **Interpretación**: En este módulo se analiza lo que ha ocurrido con el experimento, determinando cada cambio significativo observando sus resultados, para obtener una un estudio final.
- **Conclusiones finales**: En la última etapa se describen los resultados que se lograron en el desarrollo del experimento donde se debe garantizar las medidas requeridas para generalizar el resultado de los análisis Salazar Soler (2016).

Existen varias metodologías en las redes inalámbricas 802.11, por medio del cual su labor es medir rendimiento, por esa razón se abarcara tres tipos de metodologías en este trabajo las cuales son:

- Cadenas de Markóv
- Algoritmo de hormiga
- Protocolos de enrutamiento

El protocolo de enrutamiento es el intercambio de datos con otros hosts para mantener las direcciones familiares a las redes rotas, es decir, es un esquema de comunicación entre routers. Se debe considerar que un router tiene como objetivo tomar las diferentes decisiones a la vista de las diversas rutas IP del destino donde se guían los paquetes de datos. Como ya es sabido todos los dispositivos intermedios contienen una dirección IP esto para determinar dónde enviar los paquetes Ardila and Ardila (2016).

Existen métricas en los protocolos de enrutamiento, esto es porque se debe plantar en un algoritmo que rutas son más eficaces en la red, dado lo anterior las diferentes clases de métricas son las siguientes:

- **Número de saltos**: Es el número de routers por donde pasarán los paquetes.
- **Pulsos**: Es el retraso en algún enlace de datos aplicando los pulsos de reloj de PC.
- **Coste**: Es el valor arbitrario, basado mayormente en el ancho de banda, el coste económico u otra medida.
- **Ancho de banda**: Es la cantidad de información de un enlace.
- **Retardo (latencia)**: Es la suma de retardos que puede haber en la transmisión de paquetes dentro de una red.
- **Carga**: Es la cantidad de actividad que hay en un recurso de red, ya sea en un router o un enlace.
- **Fiabilidad**: Es el valor de errores de bits de los enlaces de red.
- **MTU**: Es la unidad máxima de transmisión, es decir, es la longitud máxima de trama en octetos que son aceptadas por todos los enlaces de la ruta.

Estos protocolos han tenido una evolución bastante considerable desde sus orígenes estos atendían las necesidades pero también los requerimientos que se pueden presentar en las redes. Existe un protocolo muy antiguo y que en la actualidad aún es utilizado, este es el RIP (Routing Information Protocol) por sus siglas en inglés, es basado en algoritmos donde se cuentan los saltos que hay entre el emisor y el receptor, esta medida es usada para identificar el camino por donde debe enviar los paquetes. También es un portal interior (IGP) que enruta paquetes IPv4 y mantiene una tabla de enrutamiento Oracle-Solaris (2015).

Después de 10 años se logró publicar la segunda versión del protocolo RIP por G.Malkin de la compañía Bay Networks, trayendonos mejoras muy significativas como:

- Proceso de autenticación en la transmisión de información de RIP entre vecinos.
- Empleo de máscaras de red mediante VLSM.
- Empleo de máscaras de red en la elección del siguiente salto para permitir el uso de las arquitecturas de redes discontinuas.
- Envío de actualizaciones de tablas de enrutamiento RIP mediante la dirección multicast 224.0.0.9.
- Inclusión de RIPv2 en los bloques de información de gestión.

Para finalizar la última innovación de este protocolo es el RIPng (Routing Information Protocol next generation). Esta acomoda el protocolo RIP para las redes inalámbricas IPv6 Leyton Garzón (2014).

Como se mencionó anteriormente actualmente el protocolo RIP aún está siendo usado, se ha mantenido de esa forma por su simplicidad y su alta compatibilidad. Al día de hoy hay varios protocolos de enrutamiento que han sido creados con el objetivo de satisfacer las necesidades que se puedan generar en las redes, ejemplo de los anterior sería las redes vehiculares, al surgir estas redes, los protocolos de enrutamiento incrementaron al por mayor, debido a que las redes de la movilidad son un tema de importancia creando así nuevos protocolos que deberan cumlir funciones en especficas.

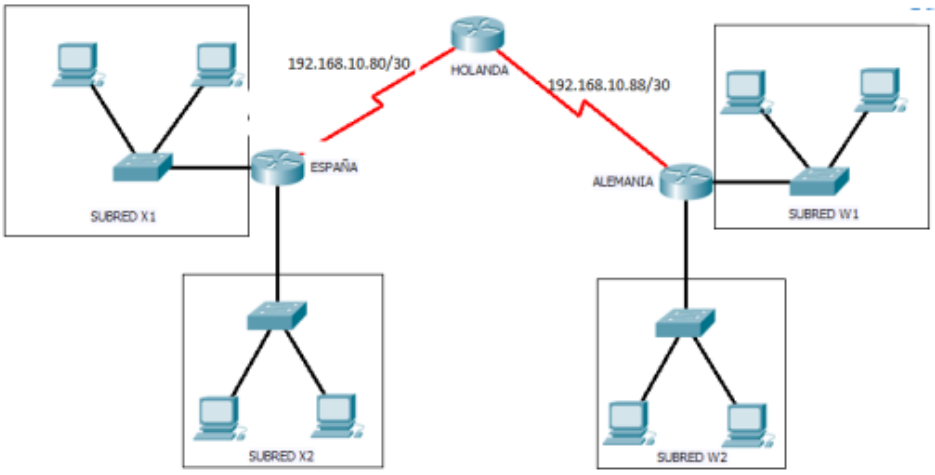


Figura 1: Protocolo de enrutamiento RIP Jestey (2018).

Existe componentes que un protocolo de enrutamiento emplea, los cuales son:

- **Estructuras de datos**: Hay protocolos de enrutamiento donde se utilizan tablas y/o bases de datos para sus operaciones.
- **Algoritmo**: Se emplean algoritmos para facilitar la información de enrutamiento, también para determinar el camino correcto.
- **Mensajes**: Se utilizan varios tipos de mensajes para encontrar routers cercanos, intercambiando la información de enrutamiento y demás tareas para conservar información necesaria sobre la red.

Recordemos que los algoritmos tienen como función encontrar los mejores caminos para enviar paquetes de información. Con lo anterior mencionado se abarcara sus diferentes clasificaciones:

- **Vector distancia**: Su objetivo es establecer la dirección y la distancia hacia cualquier enlace de la red. La distancia se puede determinar mediante el número de saltos que existe desde el nodo emisor hasta el nodo destino. Para obtener una óptima transmisión se debe obtener un valor mínimo de saltos.

- Estado de enlace: Un estado de enlace toma en cuenta otros criterios como el retardo, ancho de banda, carga y confiabilidad. Por esa razón se debe considerar más apropiado determinar una ruta que pueda enviar los paquetes de datos de manera ágil Oracle-Solaris (2015).

En general, los algoritmos de enrutamiento deben lidiar con los problemas de las redes modernas, como las condiciones del tráfico, la estructura de la red y los recursos de la red (que son finitos y cambian constantemente). Esto es especialmente cierto en las redes inalámbricas y de sensores, donde la movilidad de los nodos y las fallas de los dispositivos conducen a topologías de red en constante cambio. Para estas redes, los algoritmos de enrutamiento dinámico son el único camino para seguir.

De hecho, los algoritmos de enrutamiento carecen de adaptabilidad, debido a los cambios frecuentes en la topología de la red, la capacidad de los nodos, los patrones de tráfico, las cargas, la disponibilidad de energía, etc., reduciendo así el rendimiento de la red. Este problema se puede definir como un problema de optimización combinatoria dinámica distribuida que es un desafío en el campo de la optimización combinatoria Aguilar and Labrador (2007).

Por ende, se ha propuesto una nueva metodología, la metodología del algoritmo hormiga el cual proporciona una alternativa prometedora para desarrollar algoritmos de enrutamiento para las redes de comunicación modernas. Este algoritmo se basa en la relación que descubre por qué las formas en que las hormigas (en los cultivos alimentarios) logran determinar cuántas hormigas deben abandonar el nido es muy similar a la forma en que los protocolos que rigen Internet descubren cuánto ancho de banda está disponible para la transferencia de datos Aguilar and Labrador (2007); Wikipedia (2022a).

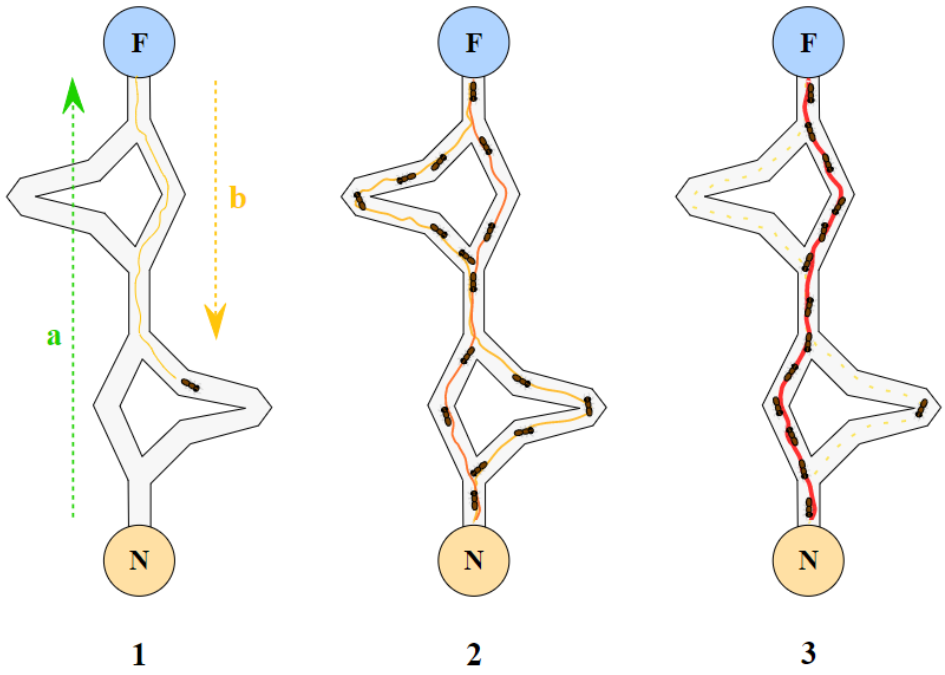


Figura 2: Algoritmo de la colonia de hormigas Wikipedia (2022b).

Del mismo modo, cuando salgan a buscar alimento, si las primeras hormigas en irse tardan más o regresan con las manos vacías, habrá menos hormigas exploradoras en la cosecha. Sin

comida, los exploradores no pueden venir a la colmena. Si la cosecha es buena, la salida del nido se acelerará y saldrán más hormigas para llenar la red alimentaria de la colmena.

A medida que disminuye, también lo hará el número de exploradores hasta que desaparezca, así mismo sucede con el ancho de banda disponible en la transmisión ya que depende del sistema de retroalimentación para enviar y recibir paquetes. De esta manera, al dividir los paquetes en transmisión óptima, si hay un retraso en la recepción, el ancho de banda se ajusta de acuerdo con la banda de frecuencia disponible para adaptarse a la eficiencia de transmisión y recepción. Otra similitud es que, al igual que un paquete de red se agota después de que la fuente ya no envía paquetes, la hormiga también deja de enviar el navegador o en este caso las hormigas exploradores si no regresa después de 20 minutos.

Los científicos y demás investigadores para las redes inalámbricas creen que, si el descubrimiento se hubiera realizado antes de la llegada de Internet, habría afectado directamente a su diseño Wikipedia (2022a).

Para terminar tenemos la última metodología esta es la Cadenas de Markóv están enlazadas con los procesos estadísticos donde las aplicaciones son variadas.

Las cadenas de Markov tiene como característica que las probabilidades especifican la forma en que el desarrollo evolucionara en el futuro pero solo dependiendo del estado en que se detecta, por esta razón estas son independientes de las situaciones que pasan en el pasado.Por esta razón existe variedades de aplicaciones en esta clase de modelo es un método probabilístico de gran importancia.

Esta metodología tiene como variante los procesos estocásticos, estos son una colección indexada de diferentes variables aleatorias, además ayudan a describir el comportamiento del sistema mediante algunos periodos Hillier and Liberman (2015).

Segun loa anterior para lograr los resultaos analisticos se maneja la cadena de Markov la cual tiene varias propiedades las cuales son:

- **Propiedad markoviana**: Esta nos explica que la probabilidad condicional es algún evento futuro dado por cualquier evento pasado y el actual estado de $X_t = i$, la cual es independiente de los sucesos pasados, solo se depende del estado actual del proceso.
- **Probabilidades de transición**: Son las probabilidades condicionales de una cadena de Markov.
- **Probabilidades de transición estacionarias**: Estas implican que las probabilidades de transición no cambien con el tiempo.

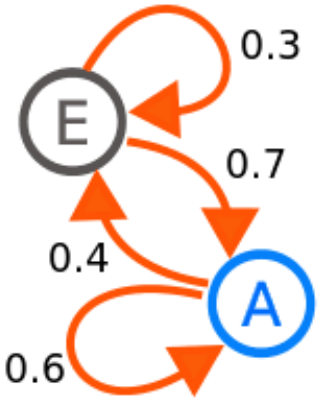


Figura 3: Cadenas de Markóv Galán (2016).

Existen diferentes propiedades de comunicación que tiene la cadena de markov, hay dos clases de estados ya sea en diferentes o en los mismos estados que se comunican. Teniendo en cuenta

lo anterior, si todos los estados se comunican la cadena de Markov es irreducible. Hay diferentes estados tanto recurrentes y transitorio, estos son:

- **Estado transitorio**: Esta describe que después de haber entrado al estado, el proceso no retomará a ese estado.
- **Estado es recurrente**: Esta describe que después de haber entrado al estado, el proceso definitivamente retomará a ese estado.
- **Estado absorbente**: Esta describe que después de haber entrado al estado, el proceso no saldrá del estado.

2. Aplicaciones

El concepto de ciclo de vida se refiere al hecho de que cada elemento de la cadena que compone el ciclo de vida de un producto, desde su acabado hasta su procesamiento final, cumple con sus responsabilidades y juega un papel específico, teniendo en cuenta todas las influencias externas importantes.

Es necesario considerar en detalle el impacto de cada etapa del ciclo de vida para tomar decisiones informadas sobre patrones de producción y consumo, políticas públicas y estrategias de gestión. Este ciclo de vida es importante abarcarlo y entenderlo mejor ya que de aquí parte el funcionamiento de algunas metodologías de evaluación de rendimiento en redes inalámbricas que utilizan el protocolo 802.1, por ende, se presenta una tabla el cual abarcara algunas de las características principales de cada metodología para lograr un mayor entendimiento y a su vez lograr diferenciarlas entre sí.

Protocolos de enrutamiento	Algoritmo de Hormiga	Cadenas de Markóv
Permite la configuración manual de las tablas de enrutamiento.	Este algoritmo es aplicado en muchos algoritmos de optimización combinatoria.	Por ser un modelo que se procesa esto estáticamente se dice que estas cadenas cuentan con memoria.
Falta de flexibilidad frente a fallas de los enlaces.	El algoritmo de colonia de hormigas puede seguir corriendo continuamente y adaptar los cambios en tiempo real en el enrutamiento de red.	Las cadenas de Markov son excepcionalmente útiles para modelar un proceso estocástico de espacio discreto en tiempo discreto de varios dominios
Establece barreras de seguridad bajo este modelo.	El algoritmo de Colonia de Hormigas puede funcionar continuamente y adaptarse a los cambios en tiempo real.	Su proceso se puede entender y aplicar con facilidad además con el tiempo permite ver determinados cambios en el sistema.
Basado en la comunicación a través de broadcasts entre routers.	El algoritmo logra buscar el camino óptimo en un grafo.	El proceso de cálculos de sensibilidad se Se realiza de orma simple.

Tabla 1: Características de las metodologías.

Con lo contemplado anteriormente se realizó una gráfica donde se muestra que metodología de evaluación de rendimiento en redes inalámbricas que utilizan el protocolo 802.11 es más beneficiosa para ser utilizada en la administración de redes.

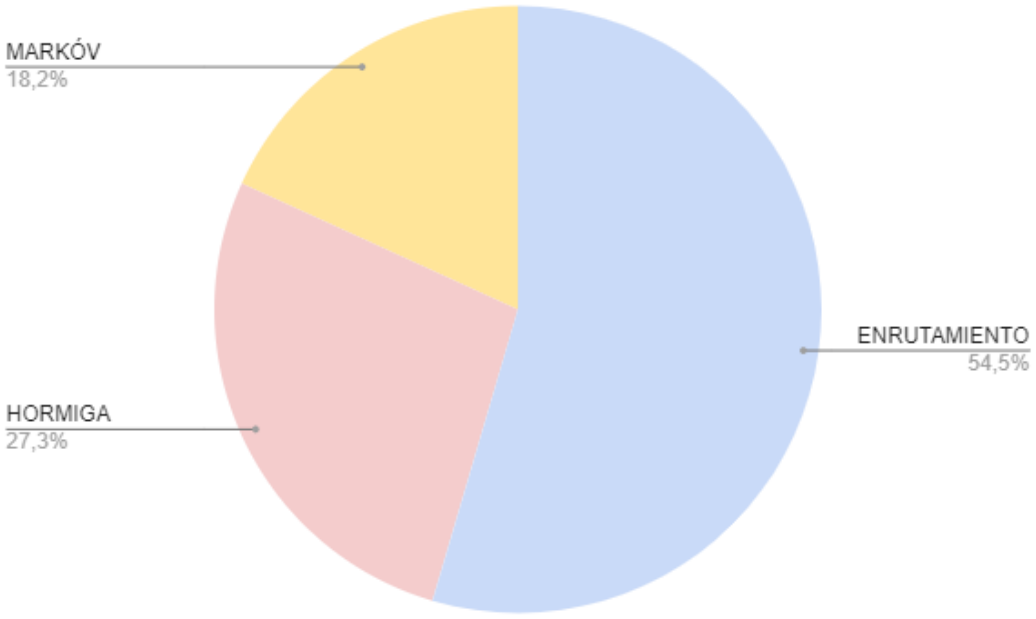


Figura 4: Mejor metodología de evaluación de rendimiento en redes inalámbricas que utilizan el protocolo 802.11.

Según la gráfica se puede apreciar que el método de enrutamiento es más beneficiosa ya que esta nos permitirá identificar rutas de redes de manera más eficaz , aunque el algoritmo de hormiga también es un método bastante bueno ya que este nos va ayudar en la identificación del mejor camino donde puede pasar una red o lo que se vaya a suministrar en esta, pero solo se reduce a eso. Por otro lado el de Markóv en la parte de redes no está tan enfocado aunque sí se utiliza principalmente para analizar los modelos probabilísticos, se utiliza para anunciar la evolución y el funcionamiento a corto y largo plazo de los sistemas.

3. Conclusiones

El trabajo desarrollado tuvo como objetivo analizar las diferentes metodologías de evaluación de rendimiento en redes inalámbricas que utilizan el protocolo 802.11. Dando así una adecuada evaluación de la investigación quienes deben permitir la implementación de acciones correctivas que conduzcan al éxito del proyecto, teniendo a los usuarios como punto de partida y finalización del desarrollo exitoso de la red y la metodología a implementar. Asimismo, la gestión de la red es la suma de todas las actividades de planificación y control enfocadas a mantener una red eficiente y con alta disponibilidad.

Entre estas actividades, se encuentran diferentes responsabilidades básicas como son la monitorización, atención de fallos, configuración, seguridad, etc. Esto nos lleva a darnos cuenta de que aunque la red se considere pequeña, o con diferentes metodologías de conexión estas deben tener un sistema de gestión, aunque cuanto más grande sea, más importante debe ser esta tarea para comprender y facilitar su implementación y actualización.

Referencias

Aguilar J, Labrador A (2007). "Un algoritmo de enrutamiento distribuido para redes de comunicación basado en sistemas de hormigas." *IEEE Latin America Transactions*, **5**(8), 616–625.

Ardila M, Ardila S (2016). "Modelo empírico que permita evaluar el rendimiento de una red inalámbrica para ISP basada en el estándar IEEE 802.11."

Galán JS (2016). "Cadena de Markov - definición, Qué Es y Concepto." URL https://economipedia.com/definiciones/cadena-de-markov.html.

Hillier F, Liberman G (2015). "Introducción a la Investigación de Operaciones.(10ma., Vol. 1)."

Jestey (2018). "Protocolo de Enrutamiento Rip." URL https://jestey.wordpress.com/2017/10/12/protocolo-de-enrutamiento-rip.

Leyton Garzón J (2014). "Estudio y simulación de los protocolos de enrutamiento más utilizados en redes VANETS."

Oracle-Solaris (2015). "Solaris 11.2 como enrutador o equilibrador de carga." URL https://docs.oracle.com/cd/E56339_01/html/E53805/ipref-13.html#:~:text=Los%20protocolos%20de%20enrutamiento%20administran,pueden%20ejecutar%20protocolos%20de%20enrutamiento.

Salazar Soler J (2016). "Redes inalámbricas."

Villacís Conforme AF (2007). *Diseño de un centro de provisión de servicio de internet con acceso de última milla inalámbrico utilizando el estándar IEEE 802.11 para el parque industrial de la ciudad de Ambato*. B.S. thesis, Quito/EPN/2007.

Wikipedia (2022a). "Algoritmo de la Colonia de Hormigas." URL https://es.wikipedia.org/wiki/Algoritmo_de_la_colonia_de_hormigas.

Wikipedia (2022b). "Algoritmo de la Colonia de Hormigas." URL https://es.wikipedia.org/wiki/Algoritmo_de_la_colonia_de_hormigas.

Filiación institucional:

Hector Manuel Herrera
Fundación Universitaria
Los Libertadores
Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Ingeniería de Sistemas
Carrera 16 # 63A - 68, Bogotá, D.C., Colombia
E-mail: hmherrerah@libertadores.edu.co

Tatiana Marcela Angulo Talero
Fundación Universitaria
Los Libertadores
Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Ingeniería de Sistemas
Carrera 16 # 63A - 68, Bogotá, D.C., Colombia
E-mail: tmangulot@libertadores.edu.co
Semillero: Seguridad en redes, TICs y la importancia en aplicaciones IoT.

Juan Manuel Báez Amezquita
Fundación Universitaria
Los Libertadores
Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Ingeniería de Sistemas
Carrera 16 # 63A - 68, Bogotá, D.C., Colombia
E-mail: jmbaeza@libertadores.edu.co
Semillero: Seguridad en redes, TICs y la importancia en aplicaciones IoT.

Revista Ciber-Sistemas https://repository.libertadores.edu.co/handle/11371/23
© Fundación Universitaria Los Libertadores https://www.ulibertadores.edu.co/
Volume 2 *Recibido por el editor:* 2022-05-12
Agosto 2022 *Aceptado por el comité editorial:* 2022-07-19

Revista Ciber-Sistemas
Agosto 2022, Volume 2, 14–20.
https://repository.libertadores.edu.co/handle/11371/23

Calidad de servicio (QoS) del protocolo 802.11ad con respecto a sus antecesores (Ancho de banda, protocolos, tasas de transferencia, tecnología de Tx/Rx)

Santiago David Lissa
Fundación Universitaria
Los Libertadores

Hector Manuel Herrera
Fundación Universitaria
Los Libertadores

Resumen

El presente artículo compara y muestra la evolución del protocolo de redes inalámbricas IEEE 802.11 en relación con sus versiones predecesoras, por medio de comparaciones entre las medidas de: anchos de banda, tasas de transferencia, tecnología implementada, entre otros parámetros.

Palabras Clave: Protocolos de red, IEE 802.11, Anchos de bandas, Tasas de transferencia.

1. Introducción

Este artículo es una breve recopilación de las características funcionales de las versiones más populares del protocolo 802.11, desde su primera versión hasta la actualidad sus características, mejoras y falencias a lo largo de su historia. Cuál fue el impacto de su evolución en el escenario mundial de las telecomunicaciones y cómo sus cambios llegaron hasta la actualidad. ¿Cómo se mantuvo vigente por tantos años?, ¿Qué mejoras se evidenciaban en cada versión? Y como al entender este patrón es posible conocer las mejoras futuras del estándar.

2. Antecedentes

La familia de protocolos de IEEE 802 aparecen en la década de los 80's de manera paralela al desarrollo del Modelo OSI presentado por la misma institución. Su objetivo principal era el desarrollo de estándares de LAN y MAN en las dos capas primarias del modelo OSI, desde un principio y muy probablemente debido a su desarrollo conjunto los protocolos 802 estuvieron estrechamente relacionados al modelo OSI, y fueron los primeros en los cuales fue aplicado Castellar Anillo and Pontón Morales (2008).

IEEE 802 constituye una amplia familia de protocolos de transmisión de información como Ethernet (IEEE 802.3), Bluetooth (IEEE 802.15) y el protocolo IEEE 802.11 también conocido como WI-FI. Este último aparece por primera vez en 1997 cuando aún estaba en desarrollo y no era conocido por el público general, IEEE buscaba la manera de manejar una red Ethernet

que no hiciera uso de medios guiados para funcionar y fuera de fácil acceso, no fue sino hasta 1999 que Wireless Ethernet Compatibility Alliance (WECA) fue constituida, esta organización formada por diversas empresas de tecnologías se centraron en cumplir el objetivo dictado por IEEE de generar una nueva red inalámbrica sostenible y que al mismo tiempo fuese compatible con las redes alámbricas vigentes.

Si bien se dice que una red WI-FI y una red Ethernet son sumamente similares siendo la principal diferencia el medio de transmisión, el primer objetivo de WECA en su momento, era que este nuevo protocolo fuese compatible para cualquier red LAN o MAN cumpliendo la misma función que Ethernet. Fue entonces cuando en el primer semestre del año 2000 WECA certifica la interoperabilidad de 802.11, ya registrado bajo la marca comercial de WI-FI. A partir de ese entonces la familia de estándares de 802.11 ha ido evolucionando y creciendo exponencialmente dando con cada versión una mejora sustancial de sus características Ortiz (2010).

3. Marco teórico

Hay variedad de conceptos y tecnologías necesarias para entender el correcto funcionamiento y las especificaciones del estándar. También es necesario entender que debido a las grandes ventajas y su flexibilidad las redes WLAN obtuvieron una popularidad acrecentara y se volvieron blanco de varias inversiones a nivel de infraestructura permitiendo configuraciones más complejas tanto a nivel físico como a nivel de enlace de terminales. Estas configuraciones dieron inicio a conceptos muy comunes en los sistemas de redes actuales como, por ejemplo: Las configuraciones de ad hoc o Peer to peer; esta configuración empleada como una de la más básicas consiste en una red de dos terminales no cableadas, las cuales necesitan para establecer una comunicación entre sí de una tarjeta adaptadora y estar en el rango de cobertura radioeléctrica de ambas.

Por otro lado, el concepto de Puntos de accesos el cual nos indica que para alcanzar una red de peer to peer es necesaria la instalación de un punto de acceso, esto debido a que no siempre se puede mantener los dispositivos bajo la misma zona de cobertura del otro y esto limitaría la flexibilidad y objetivo de la red inalámbrica. Los puntos de accesos extienden la funcionalidad y cobertura de la red.

Donde la distancia permitida entre terminales no se limita a las mismas, sino que pueden pasar por un punto de acceso intermedio el cual acrecienta la cobertura. Cuando se dice que una zona tiene cobertura es debido a la gran cantidad de puntos de accesos que generan lo que se conoce como celdas de coberturas. Los fallos o perdida de señal entre celdas se buscan que sean mínimos y es el pequeño lapso que hay de una celda a otra tener acceso desde su terminal móvil a otros recursos. Para dar cobertura en una zona determinada habrá que instalar varios puntos de acceso de tal manera que podamos cubrir la superficie necesaria con las celdas de cobertura que proporciona cada punto de acceso y ligeramente solapadas para permitir el paso de una celda a otra sin perder la comunicación Ortiz (2010).

- **802.11**: En junio de 1997 se consolida por el nuevo estándar de conexiones de redes de área local inalámbricas (WLAN). En su momento 802.11 salió a la luz con las siguientes especificaciones: 1-2 Mbps en banda de 2.4 GHz, haciendo uso de saltos de frecuencia (FHSS) o secuencia directa (DSSS).

  A nivel físico la primera versión del estándar hacía uso de dos protocolos, el primero PMD empleado como función de convergencia de la capa física el cual adapta sus características al medio. PMD define las características y medio a transmitir a través de un medio sin cables o con cables. por otro lado, el protocolo PLCP (Procedimiento de convergencia de capa física) definía la forma de mapear unidades de datos MAC entre las diferentes terminales a través del protocolo PMD.

  A nivel de enlace hacía uso de las tecnologías de espectro ensanchado, la cual consiste en

prolongar una señal de información a lo largo de un ancho de banda, es decir esta señal se reparte todo el ancho de banda disponible en vez de centrarse en una señal portadora, este ancho de banda es compartido con los usuarios dentro del mismo los cuales utilizan la misma banda de frecuencia. Esta tecnología se tipifica en Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS) y Espectro Ensanchado por Salto de Frecuencia (FHSS).

- **802.11b**: Debido a la alta densidad de nodos dentro del dominio, IEEE 802.11 estaba inclinado a presentar errores de cuello de botella, errores los cuales afectaban directamente el rendimiento de la subred, los efectos de dichos errores (causados por una congestión dentro de los nodos) causaban retrasos de transmisión de paquetes, pérdida de información y de los paquetes por los altos tiempos de espera, caídas drásticas del rendimiento, múltiples interrupciones del servicio, etc.

  Con el objetivo de optimizar el estándar y resolver estas problemáticas en 1999 es aprobado 802.11b la segunda versión del estándar y un punto de inflexión en la misma, marcando la segunda generación del mismo. Fue una de las más relevantes dentro de su evolución. Contando con una velocidad máxima de 11Mbps, un canal de ancho de banda de 25Mhz y además hace implementación del método de acceso CSMA/CA con una banda ISM de 2.4Ghz. Al igual que sus antecesores hace uso de la tecnología DSSS (Espectro Ensanchado por Secuencia Directa) Hernández Correa (2007).

Figura 1: Secuencia CSMA/C Jardosh *et al.* (2005).

El algoritmo utilizado por el protocolo se conoce como Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA), es un algoritmo de trama el cual transmite la información por medio de nodos, la estación debe detectar primero si el medio de comunicación está ocupado. Si es así, la estación espera un período de tiempo específico conocido como intervalo de retroceso. Si el canal está disponible transmite la trama al destino previsto, esta manda un mensaje de recepción exitosa a la fuente una vez recibida la trama. Si este mensaje no es recibido por la fuente en un determinado periodo de tiempo vuelve a enviar el marco repitiendo el mismo proceso Lara Cueva and Martínez Hidalgo (2018).

- **802.11a**: Esta nueva versión del estándar aparece en diciembre del 2001, haciendo uso de una banda de frecuencia de 5Ghz y la técnica OFDM sobre ocho canales con una velocidad de hasta 54Mbps. Esta nueva configuración es una técnica de comunicaciones que divide un canal, de frecuencia en un número determinado de bandas de frecuencia Hernández Correa (2007).

  OFDM presentaba una menor probabilidad de interferencia y cuellos de botella y presenta una mejora a la velocidad máxima (que pese a que en 802.11b es 11Mbps al hacer uso de CSMA/CA disminuye a 4-7Mbps), sin embargo, debido al uso de las bandas de 5Ghz el alcance disminuye debido a la atenuación de las ondas electromagnéticas. Esta versión nos presenta una solución a las problemáticas que restaban del protocolo 802.11b, sin embargo, también presentaba una gran desventaja y era su falta de compatibilidad con sus versiones anteriores del estándar al hacer éstas uso de las bandas de frecuencia de 2.4Ghz Cruz Flores (2014).

- **802.11g**: Aprobado en el año 2003 marca la tercera generación del estándar 802.11, muchas fuentes apuntan a que es la evolución directa del estándar 802.11b debido a que

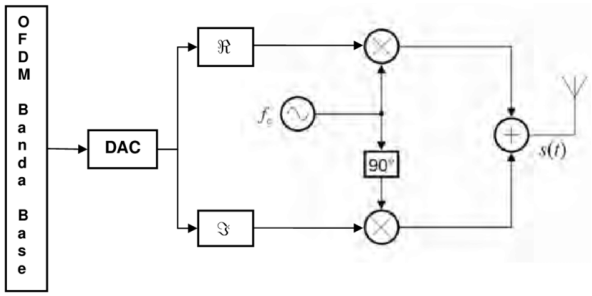


Figura 2: Configuración OFDM Hernández Marcano, Diaz, and Moretti (2007).

802.11a no fue bien acogida comercialmente debido a su falta de compatibilidad con las anteriores versiones. 802.11g ofrece una velocidad máxima de 54 Mbps sobre una banda de frecuencia de 2.4Ghz (Provocando que la velocidad de transmisión real fuese de 27.7Mbps), sus interfaces de aire son DSSS y OFDM a diferencia de su antecesor 802.11g es totalmente compatible con las versiones anteriores convirtiéndolo en el sucesor por defecto del 802.11b y marcándole una alta popularidad incluso antes de su implementación total en el mercado Hernández Correa (2007).

- **802.11n**: Estándar sucesor del 802.11g y perteneciente a la cuarta generación del estándar, ofrece una velocidad máxima de hasta 540Mbps en bandas de 2,4Ghz y 5Ghz, con una velocidad mínima de 100Mbps tiene mayor alcance con una cobertura de celda de hasta 300Km. Esta nueva versión implementa la tecnología de modulación 16QA y 16QAM y la tecnología de multiplexado MIMO de 4 flujos. las cuales permiten el aumento de velocidad de transmisión, además de ser compatible con todas las versiones anteriores al estándar por el uso de sus bandas de frecuencia reemplaza al estándar 802.11b/g en redes inalámbricas Hernández Correa (2007).

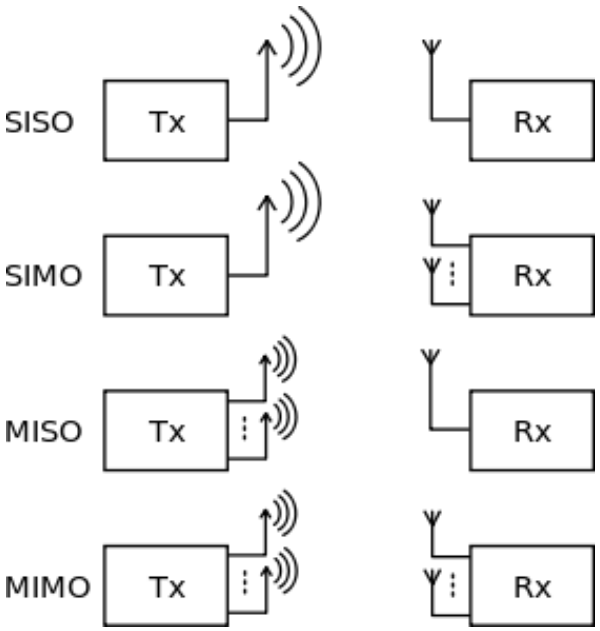


Figura 3: Diagrama tecnologías de multiplexado Fmuser (2018).

Con las tecnologías MIMO, a partir del 2004 el estándar 802.11 implementaba una o dos antenas para tener mayor cobertura y complejidad de configuración, esto debido al principio de elegir la antena más propicia para la transmisión. La tecnología MIMO (multiple-input multiple-output) la cual por medio del multiplexado espacial permitía

una transmisión y recepción de manera simultánea de dos o más flujos de datos dentro de un mismo canal de frecuencia. Esta técnica significa una mejora considerable en las tasas de transferencia, implementado en las versiones 802.11b/g presentaba una desventaja provocada por la interferencia mullticamino, esto debido al reflejo de las señales dentro del canal de transmisión. En la versión 802.11n esta desventaja no era tan evidente debido que los receptores de MIMO podían procesar cada componente del canal sin reconocer los que estén fuera de la fase, de esta manera eliminando la distorsión y optimizando la señal transmitida García Suárez and Morán Mejía (2016).

- **802.11ac**: Aprobado en enero del 2014 y dando comienzo a la quinta generación del protocolo, (varias fuentes lo nombran como Wifi de 1 Gigabit o 5G). presenta una mejora importante en cuestiones de velocidad de red sobre todo para la bajada y subida de contenido multimedia e inclusive el streaming online, esta nueva familia deja de lado las conexiones cableadas otorgándole al usuario una conexión segura García Suárez and Morán Mejía (2016).

  Este nuevo estándar trae consigo una serie de características enfocadas en los dispositivos móviles, como:

  - Mayor ahorro de energía.
  - Mayor alcance y cobertura.
  - Mayor cantidad de antenas y flujos de espaciales MIMO (8 en este caso).
  - Implementación de MU-MIMO (MIMO Multiusuario)
  - Banda de frecuencia 5Ghz, deja las bandas de 2.4Ghz debido a que presentaban mayor interferencia y ruidos de transmisión.
  - Ancho de banda de 160Mhz.

- **802.11ad**: Esta nueva versión del protocolo, vigente en la actualidad llega hasta velocidad de 2.34Gbps y 7Gbps por segundo, esto debido al uso de antenas directivas que hacen uso de la técnica de multiplexado espacial, esto hace un uso más eficiente del canal permitiendo transmisiones dentro del mismo con el menor índice de interferencia entre ellas. Haciendo uso de banda de 60Ghz dejando atrás las bandas de 2.4 y 5Ghz respectivamente. Marcando una diferencia crucial entre sus antecesores. Debido a esta nueva característica de onda corta, la banda tiene niveles de atenuación altos entre obstáculos, como techos, paredes, puertas, etc.

4. Análisis evolución del estándar 802.11

Para entender a rasgos generales y específicos las diferencias significativas entre las versiones, es recomendable separar las mismas en generaciones. Este margen temporal difiere por unos cuantos años entre sí, sin embargo, representa entre los mismos cambios cruciales que dan apertura una nueva generación entre las versiones. En este documento se analizará las versiones del 802.11a al 802.11ad Almarcha López *et al.* (2015).

Una comparación se presenta en la Tabla 1. En la actualidad se presentan tasa de transmisión de hasta 7Gbps, anchos de banda de 60Ghz, tipo de encolamiento MIMO, permiten mayor cobertura, velocidad y optimizan la transmisión de servicios en “streaming”. Por último, mejora las características de seguridad, en lo que se refiere a todos los anteriores.

Primera Generación 802.11 Año: 1997	Bandas ISM de 2.4Ghz Implementación de FHSS y/o DSSS Gran tasa de intermitencia Poca velocidad de transmisión entre 1 y 2Mbps Implementación de CSMA/CA
Segunda Generación 802.11b Año: 1999	Aumento en la velocidad de 5,5 a 11Mbps Bandas ISM de 2.4Ghz Implementación de DSSS y HR-DSSS Presenta problemas de cuello de botella e interferencias Implementación de CSMA/CA
Tercera Generación 802.11a/g Año: 2001-2003	Banda ISM de 5Ghz Implementación de OFDM Aumento en las tasas de velocidad hasta 54Mbps. Menor interferencia y cuellos de botella que al hacer uso de DSSS Implementación de CSMA/CA Problema de compatibilidad con las otras versiones
Cuarta Generación 802.11n Año: 2007	Uso de bandas ISM de 2,4 y 5Ghz. Velocidad mínima de 100Mbps. Cobertura de hasta 300km. Implementación de MIMO de 4 flujos, permitiendo el aumento de las tasas de transferencia, primera versión en hacer uso del multiplexado. Compatibilidad con sus antecesoras. Implementación de la modulación 16QA y 16QAM Optimización de la señal, menor nivel de interferencia.
Quinta Generación 802.11ac Año: 2014	Uso de MIMO de 8 flujos y MU-MIMO. Banda ISM de 5Ghz Anchos de banda de 160Mhz. Tasas de transferencia de hasta 1Gbps Menor índice de interferencia y ruidos de transmisión.

Tabla 1: Resumen de tecnologías 802.11.

5. Conclusiones

El estudio de las características y tecnologías implementadas en la evolución del estándar IEEE 802.11 nos arroja los siguientes resultados:

- A lo largo de los años, la implementación y alcance del estándar (en sus características) aumenta en relación a la demanda de la misma.
- Se describe el uso de las tecnologías MIMO, MUMIMO y OFDM en las más recientes generaciones del estándar.
- Se observa el alcance y limitaciones del uso de bandas de frecuencia desde los 2.4Ghz y cómo ésta es una parte esencial en la implementación del estándar.
- Se evidencia la importancia de la compatibilidad entre las versiones del estándar.
- Se evidencia como las características de velocidad de transmisión, ancho de banda y cobertura son afectadas por las tecnologías de despliegue utilizadas.

El estándar 802.11 presenta una evolución bastante notoria con la salida de cada una de sus versiones, las cuales presentan mejoras sustanciales y soluciones óptimas a las problemáticas evidenciadas en sus predecesoras.

Referencias

Almarcha López A, *et al.* (2015). "Desarrollo de una herramienta para predecir la calidad de servicio de redes de interior de siguiente generación."

Castellar Anillo LM, Pontón Morales JD (2008). "Sistemas inalámbricos IEEE 802."

Cruz Flores L (2014). *Tecnologías empleadas en la norma IEEE 802.11 ac.* Ph.D. thesis, Universidad Central"Marta Abreu"de Las Villas.

Fmuser (2018). "Tecnología MIMO para enlaces de microondas-FAQ-FMUSER Proveedor integral de transmisión de FM / TV." URL https://es.fmuser.net/content/?7724.html.

García Suárez DJ, Morán Mejía LE (2016). *redes inalámbricas; estudio del comportamiento, rendimiento y migración del estándar de comunicación 802.11 ac.* Ph.D. thesis, Universidad de Guayaquil Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas Carrera ....

Hernández Correa LF (2007). "Estudio del impacto de IEEE 802.11 N sobre las redes wireless en el Perú."

Hernández Marcano N, Diaz M, Moretti A (2007). *Diseño de Proyecto Técnico para Solución de Acceso Masivo en la Zona Metropolitana utilizando la Tecnología WiMAX en 3,5 GHz.* Ph.D. thesis. doi:10.13140/RG.2.1.1760.6160.

Jardosh AP, Ramachandran KN, Almeroth KC, Belding-Royer EM (2005). "Understanding congestion in IEEE 802.11 b wireless networks." In *Proceedings of the 5th ACM SIGCOMM conference on Internet Measurement*, pp. 25–25.

Lara Cueva RA, Martínez Hidalgo DX (2018). "Hacia un nuevo enfoque de TCP para un aumento del throughput en redes inalámbricas." *RECI*, **7**(13), 106–123.

Ortiz FL (2010). "El estándar IEEE 802.11 wireless lan." *Univ. Politécnica Madr.*

Filiación institucional:

Hector Manuel Herrera
Fundación Universitaria
Los Libertadores
Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Ingeniería de Sistemas
Carrera 16 # 63A - 68, Bogotá, D.C., Colombia
E-mail: hmherrerah@libertadores.edu.co

Santiago David Lissa Cuentas
Fundación Universitaria
Los Libertadores
Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Ingeniería de Sistemas
Carrera 16 # 63A - 68, Bogotá, D.C., Colombia
E-mail: sdlissac@libertadores.edu.co
Semillero: Seguridad en redes, TICs y la importancia en aplicaciones IoT.

© Fundación Universitaria Los Libertadores https://www.ulibertadores.edu.co/
Volume 2 *Recibido por el editor:* 2022-05-12
Agosto 2022 *Aceptado por el comité editorial:* 2022-07-19

Revista Ciber-Sistemas
Agosto 2022, Volume 2, 21–28.
https://repository.libertadores.edu.co/handle/11371/23

Sistemas de alerta temprana como herramienta de prevención de infecciones respiratorias agudas

Laura Elizabeth Salgado
Fundación Universitaria
Los Libertadores

Johan Mateo Moreno
Fundación Universitaria
Los Libertadores

Walder de Jesús Canova
Fundación Universitaria
Los Libertadores

Resumen

En este artículo se presenta el diseño un sistema de alerta temprana para el control de humedad relativa que permite prevenir y disminuir la probabilidad de contagio por microorganismos patógenos presentes en las infecciones respiratoria agudas, debido a que las personas con acciones como hablar, toser o estornudar, expulsan minúsculas partículas de gotas que quedan suspendidas en el medio ambiente, esparcidas en forma de aerosol, constituyendo estas partículas en el medio en la principal vía de infección de enfermedades respiratorias agudas.

Palabras Clave: Infección respiratoria aguda, IRA, Humedad relativa, IoT.

1. Introducción

En la actualidad la salud pública se ha visto afectada por un grupo de enfermedades que se producen en el aparato respiratorio, denominadas infecciones respiratorias agudas (IRA), consideradas como una de las principales causas de morbilidad y mortalidad en el mundo. Según la organización mundial de la salud las infecciones respiratorias agudas son el grupo de enfermedades más letal, tan solo en el año 2016 causaron tres millones de muertes en el mundo Diego-Rodríguez, Domínguez-Cortinas, Cubillas-Tejeda, and Mendoza (2020).

La etiología más común de IRA es causada por diferentes microorganismos respiratorios como virus y bacterias, encontrando que en gran parte las infecciones respiratorias son causadas por virus, tales como el virus sincitial respiratorio, rinovirus, influenza y metapneumovirus. El ministerio de salud colombiano indicó que en el 2010 la incidencia de IRA fue causada en un 62 % por el virus sincitial respiratorio, seguido de la influenza por un 18 %, influenza tipo A estacional 6 %, influenza tipo B 3 % y los adenovirus 3 % Minsalud (2010).

Algunos microorganismos causantes de IRA pueden mutar en agentes patógenos existentes o desconocidos en cualquier parte del mundo y suelen manifestarse inicialmente como una gripe, que puede llegar a ser leve, moderada o grave. Tal es el caso del coronavirus (SARS-CoV-2), que ha sido catalogado por la Organización Mundial de la Salud como una emergencia en salud pública de importancia internacional (ESPII). El 24 de abril del año 2020 ha dejado 2.4 millones de personas infectadas y más de 160 mil muertes en el mundo Franco Babativa *et al.*

(2020).

El principal modo de transmisión de los virus, se realiza a través de las microgotas de un portador que tose o estornuda, en otros casos se produce por medio del contacto incluyendo la contaminación de las manos con secreciones respiratorias, seguida de la autoinoculación de la conjuntiva o la mucosa de la nariz o boca, estos tipos de secreción se transportan en el aire hasta llegar a cualquier superficie Huayanay (2020). Debido a los diferentes patógenos respiratorios el periodo de incubación se contempla entre uno a diez días, de igual forma sucede con el periodo de contagiosidad que puede iniciar desde 24 horas antes de los primeros síntomas y hasta cinco días después Bejarano (2021).

En Colombia la población más vulnerable son los niños menores de 5 años y adultos mayores de 60, produciendo costos sociales y económicos altos en el sistema de salud, por lo tanto, se requiere tomar las medidas necesarias que permitan disminuir la incidencia de IRA en dicha población con el fin de minimizar el riesgo de contagio en otros individuos (Javeriana, Etiología). Estudios a nivel internacional señalan que existe una correlación negativa entre los niveles de humedad relativa en el ambiente y la incidencia de IRA.

Un estudio realizado por la universidad de Yale encontró que numerosas investigaciones correlacionan la viabilidad del virus de la influenza, suspendido en una matriz de gotas con el grado de evaporación de gotas y el grado asociado de sobresaturación. En adición el estado de equilibrio de vapor en el ambiente expresado como índice de saturación o humedad relativa (HR), afecta las gotitas contaminadas con el virus respiratorio, independientemente de su fuente y ubicación. Por lo que la HR afecta todas las formas de transmisión, pero en mayor proporción por vía aérea, Estudios realizados de transmisión en animales revelaron que el estado de equilibrio en la HR alta (>60 %) y la HR baja (<40 %) parece permitir la viabilidad del virus de la influenza en gotitas, mientras que en al HR intermedia (40 % a 60 %) se inactiva Moriyama, Hugentobler, and Iwasaki (2020).

2. Modelo

Con base en estudio realizado por la universidad de Yale Moriyama *et al.* (2020) se implementó un sistema que sensado, registro y visualización en tiempo real del comportamiento de la humedad y temperatura en un ambiente cerrado, lo que posibilitó el diseño de un sistema de ventilación que disminuye la probabilidad de propagación de virus causantes de infecciones respiratorias agudas.

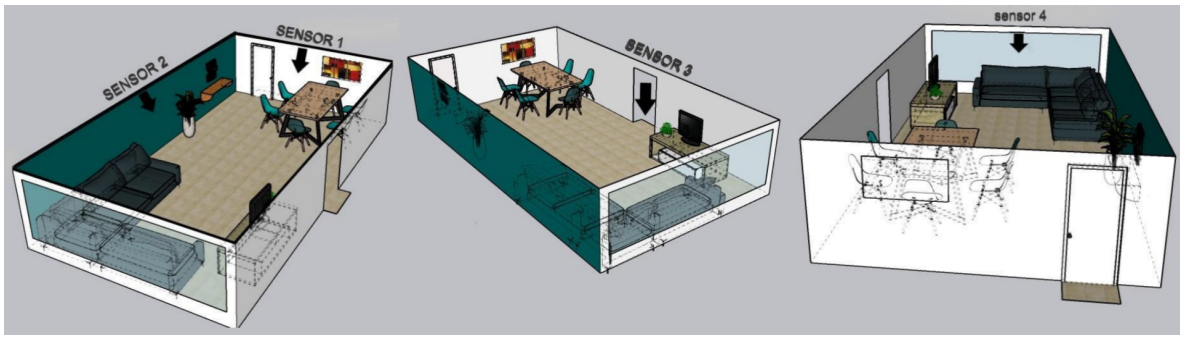


Figura 1: Distribución de sensores sala-comedor.

El experimento se realizó en un espacio cerrado dentro de un apartamento en la ciudad de Bogotá D.C., ubicando cuatro sensores de temperatura y humedad relativa, ubicados en los extremos de una sala y una habitación. Cada uno de estos sensores envia sus medidas cada 60 segundos, como se muestra en las Figuras 1 y 2.

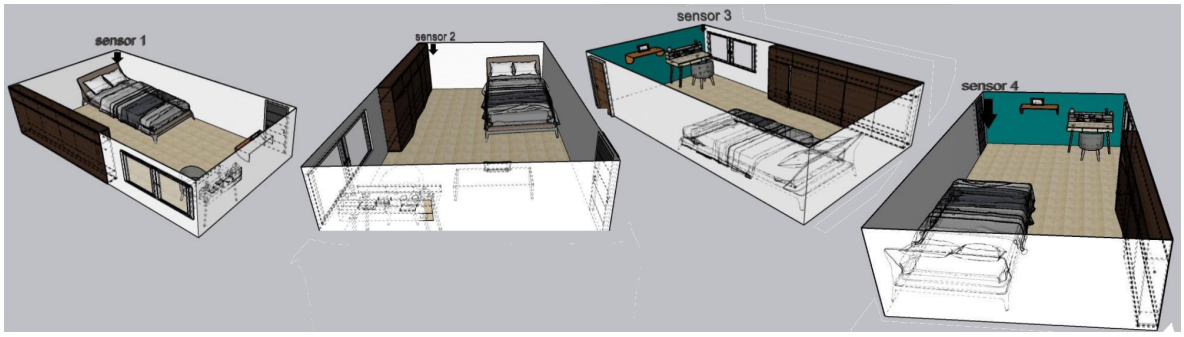


Figura 2: Distribución de sensores en habitación.

A continuación, se enumera la secuencia empleada en el proceso de experimentación:

- En primera instancia, se toma el registro de la temperatura y humedad en cada uno de los sensores en los dos espacios (Figuras 1 y 2) en su estado natural.
- Posteriormente, se alteran los dos ambientes con un humidificador, incrementado de esta forma la humedad.
- 3.Por último, se emplea un deshumidificador con el que se pretende tener el efecto contrario para reducir la humedad en los dos espacios.

El sensor empleado es el SHT30 que miden valores de humedad relativa y temperatura ambiente. Los valores medidos se transmiten a través de un módulo ESP32 usando el protocolo de comunicación MQTT, que permitió la interacción de entre el módulo y un servidor implementado como instancia EC2 en AWS. En el servidor de AWS se implementó una base de datos no relacional que visualiza los datos en un dashboard. La Figura 3 muestra un esquema general del sistema empleado.

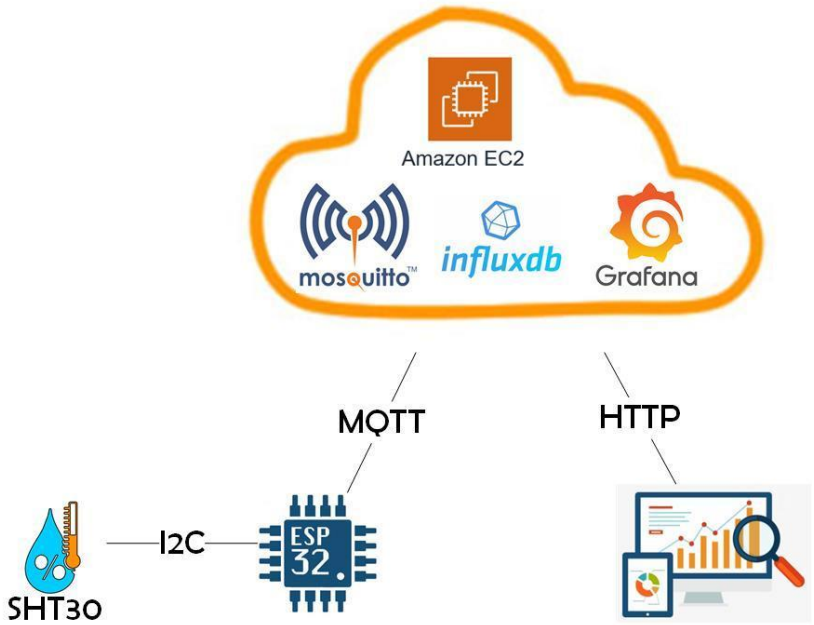


Figura 3: Modelo de conectividad del sistema de alerta temprana..

3. Resultados obtenidos

A continuación, se presentan las gráficas resultantes de las tres secuencias de experimentación.

Figura 4: Comportamiento de la humedad durante los tres periodos de experimentación.

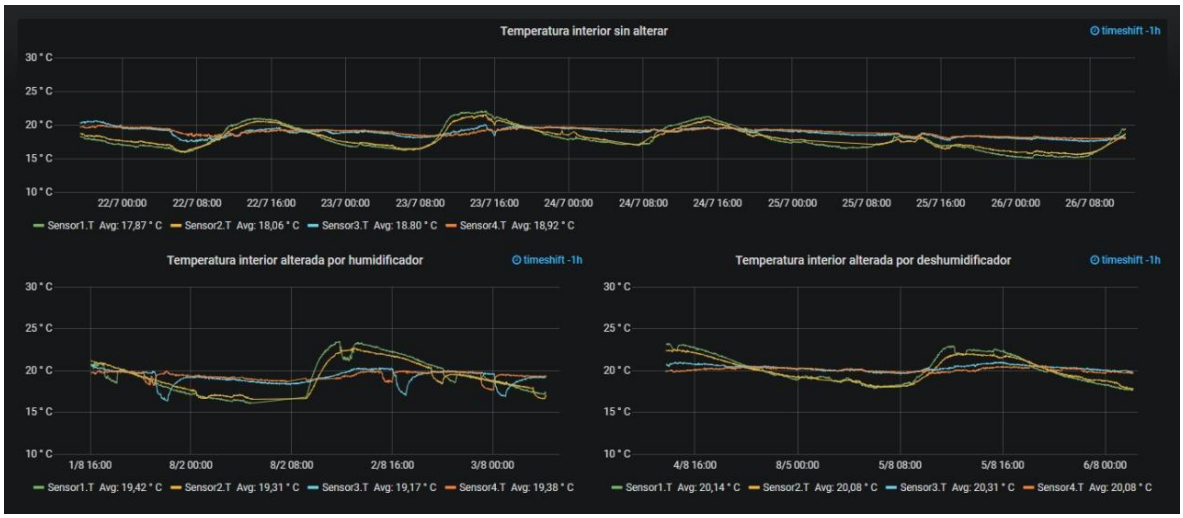


Figura 5: Comportamiento de la temperatura durante los tres periodos de experimentación.

Una de las primeras observaciones de los datos capturados permiten ver que a medida que aumenta la temperatura, el aire tiende a ser más seco y por lo tanto, la humedad relativa disminuye. y al disminuir la temperatura, el aire se vuelve más húmedo, por lo tanto, la humedad relativa se incrementa.

Otro mecanismo que existe para variar la humedad relativa es la presión, ya que en la medida que la presión disminuye, el aire tiende a ser más seco, disminuyendo de esta forma la humedad relativa. Inversamente, si la presión aumenta, el aire se vuelve más húmedo y la humedad relativa aumenta. A pesar de que, con éste mecanismo se puede variar la humedad relativa, en la práctica no resulta tan fácil, ya que se tendría que pensar en una cámara despresurizada y controlada, por lo tanto, no sería de fácil acceso e implementación.

4. Análisis de resultados

Como se puede observar en la Figura 6, se evidencia un cambio de la humedad de acuerdo

al estado ambiental sin alteraciones artificiales en el transcurso del día. También se logra identificar mayor concentración de humedad en el espacio que es menos ventilado.

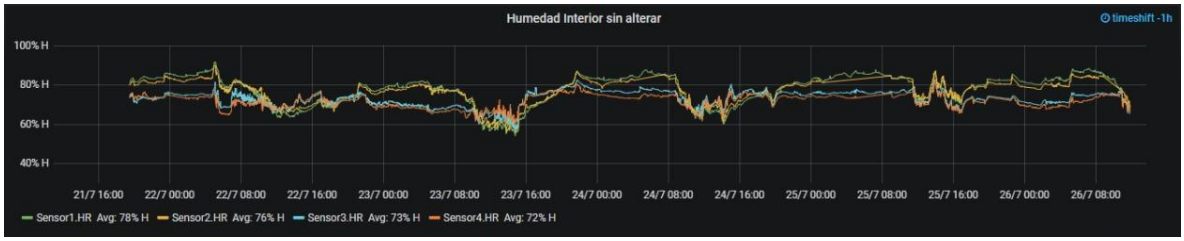


Figura 6: Humedad en su estado natural.

Tanto como en las Figuras 6 y 7, se logra evidenciar que la humedad y la temperatura es más estable en el espacio más ventilado de la habitación, mientras que en el extremo contrario de la habitación se evidencia la exposición que tiene la habitación al exterior durante el transcurso del día.

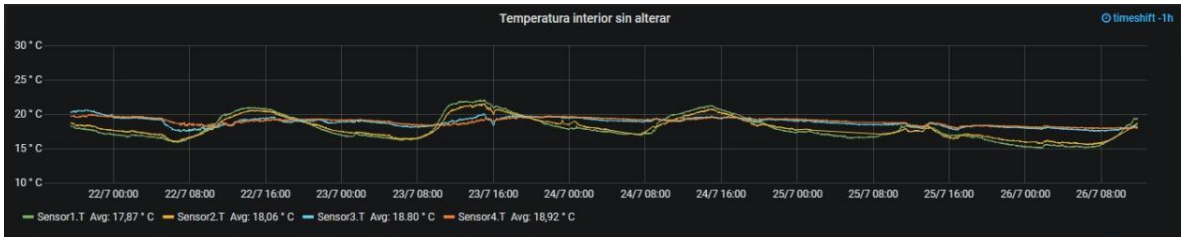


Figura 7: Temperatura en su estado natural.

Durante la segunda secuencia del experimento, en donde se implementó el humidificador se evidencia que los sensores presentan un cambio drástico en la lectura de la humedad presentando niveles de humedad muy superiores respecto a la lectura durante el primer período de experimentación.

Figura 8: Humedad alterada por dispositivo humidificador.

El humidificador empleado es un humidificador casero que “incrementa” levemente la humedad en dos escenarios planteados. El uso de este humidificador ayuda a “eliminar” el aire seco que entre algunos valores irrita e inflama las vías aéreas respiratorias a nivel de nariz y garganta.

El uso semi moderado de estos humidificadores ayudan a aliviar una congestión nasal disolviendo la re-sequedad mucosa para poder expectorar mejor, sin embargo, su uso excesivo también puede complicar el estado de salud de las personas. Se recomienda su uso entre vapor frío (1 o 2 grados por debajo de la temperatura ambiente), incrementado hasta unos 67 grados centígrados. El uso de humidificadores que exceden esta temperatura pueden causar quemaduras en las vías respiratorias.

Por otro lado, la temperatura se ve disminuida mostrando un comportamiento contrario al de la humedad, como se evidencia en la Figura 9.

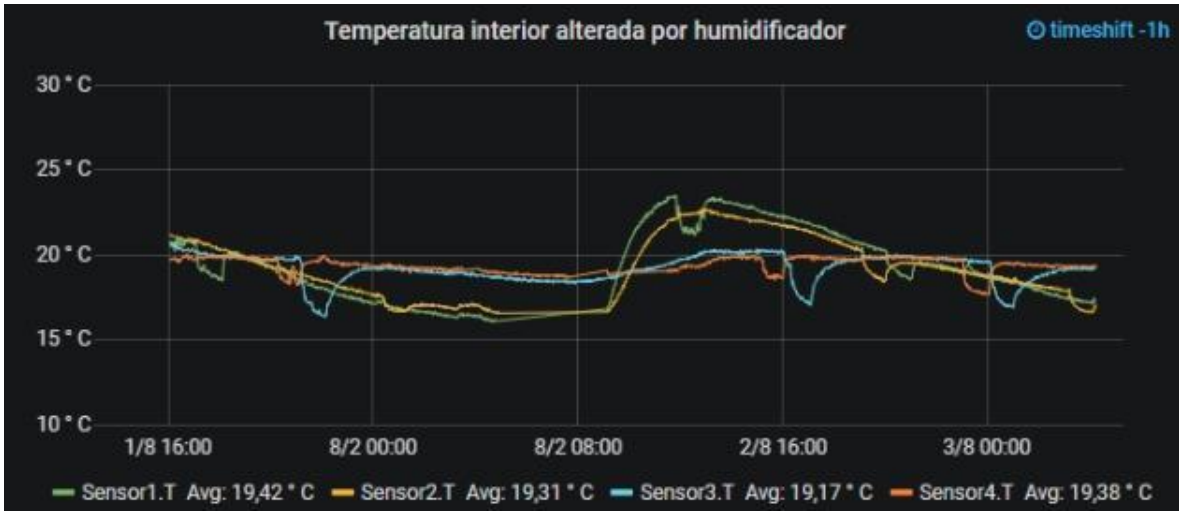


Figura 9: Temperatura alterada por dispositivo humidificador.

Durante la última fase, en la que se empleó el deshumidificador, se puede apreciar que la temperatura y la humedad tuvieron un comportamiento más estable en comparación con los resultados obtenidos durante las etapas previas de experimentación, como se muestra en las Figuras 10 y 11.

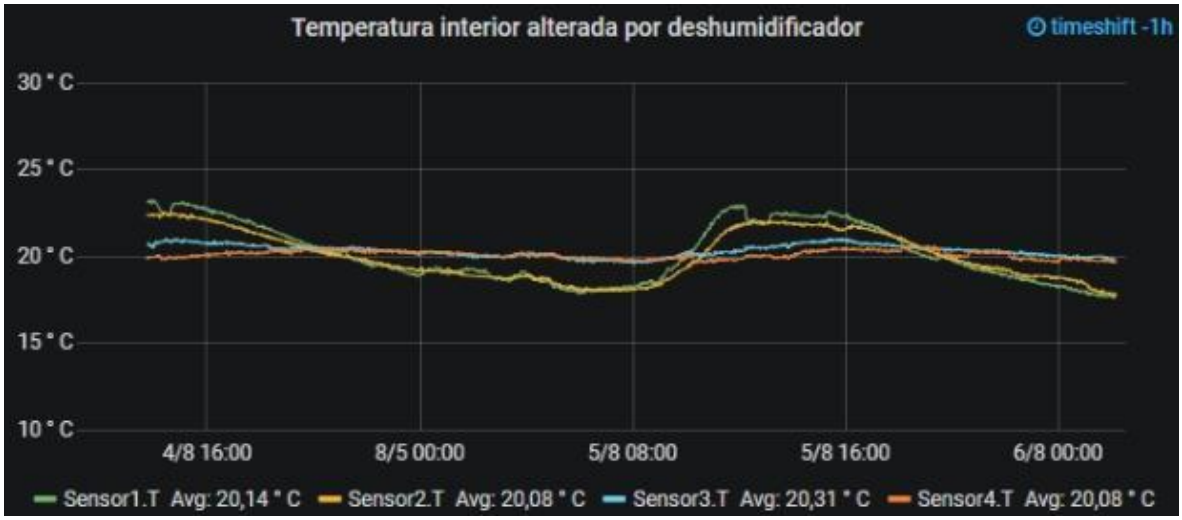


Figura 10: Temperatura alterada por dispositivo deshumidificador.

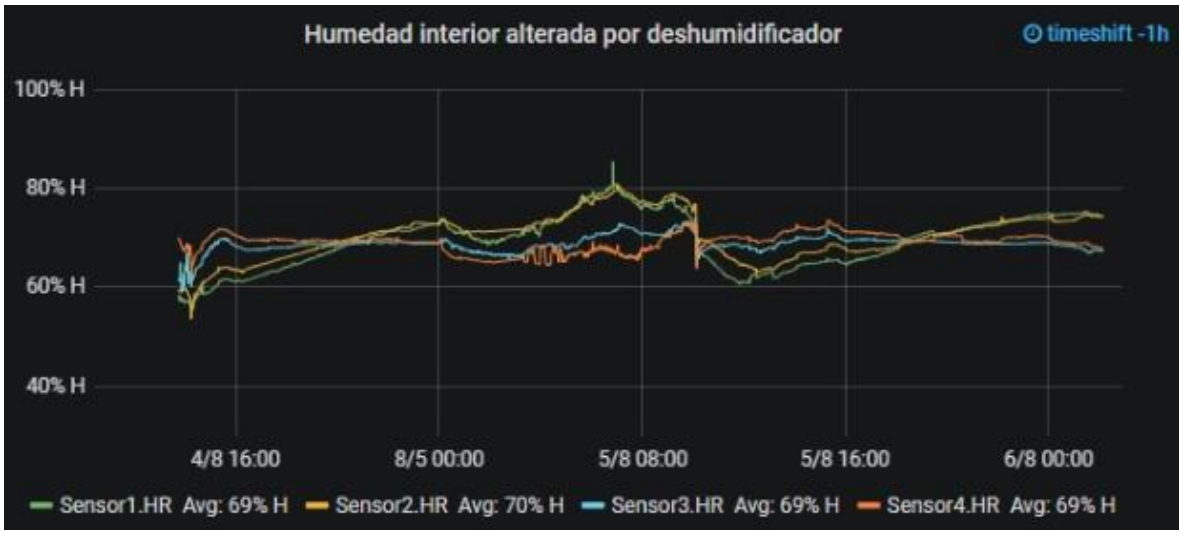


Figura 11: Humedad alterada por dispositivo deshumidificador.

5. Conclusiones

Este artículo muestra el desarrollo e implementación de un sistema capaz de monitorear en tiempo real el comportamiento de la humedad relativa y la temperatura en un espacio específico de un hogar y realizar cambios relevantes para alterar dichos parámetros, concluyendo que:

- Con el sistema de humidificación empleado se logró incrementar la humedad relativa un 8 % en el cuadrante donde se encontraba ubicado el sensor y los cuadrantes más próximos, lo que representa un área de 1 a 2 metros cuadrados.
- Con respecto al sistema deshumidificador, este no cumplió el objetivo de reducir la humedad relativa a los valores deseados, aunque se logró mantener estable dentro de los rangos naturales.

Referencias

Bejarano DP (2021). "Modos de transmisión y diseminación interhumana del virus SARS-CoV-2." *Revista de salud publica del Paraguay*, **11**(1), 87–101.

Diego-Rodríguez M, Domínguez-Cortinas G, Cubillas-Tejeda AC, Mendoza MGG (2020). "Infecciones respiratorias agudas y caracterización de bacterias potencialmente patógenas en comunidades de la Huasteca Potosina." *Revista Salud Pública y Nutrición*, **18**(4), 1–8.

Franco Babativa DC, *et al.* (2020). "Retos logísticos en salud asumidos por Bogotá para enfrentar el COVID-19."

Huayanay L (2020). "Transmisión aérea en espacios cerrados del SARS-Cov-2." In *Anales de la Facultad de Medicina*, volume 81, pp. 342–347. UNMSM. Facultad de Medicina.

Minsalud (2010). "Infecciones Respiratorias Agudas (IRA)." URL https://www.minsalud.gov.co/salud/Paginas/Infecciones-Respiratorias-Agudas-(IRA).aspx.

Moriyama M, Hugentobler WJ, Iwasaki A (2020). "Seasonality of respiratory viral infections." *Annual review of virology*, **7**(1), annurev–virology.

Filiación institucional:

Walder de Jesús canova
Fundación Universitaria
Los Libertadores
Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Ingeniería Mecánica
Carrera 16 # 63A - 68, Bogotá, D.C., Colombia
E-mail: wdcanovag@libertadores.edu.co

Laura Elizabeth Salgado Bohórquez
Fundación Universitaria
Los Libertadores
Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Ingeniería Electrónica
Carrera 16 # 63A - 68, Bogotá, D.C., Colombia
E-mail: lesalgadob@libertadores.edu.co
Semillero: Internet de las Cosas.

Johan Mateo Moreno Rojas
Fundación Universitaria
Los Libertadores
Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Ingeniería Electrónica
Carrera 16 # 63A - 68, Bogotá, D.C., Colombia
E-mail: jmmorenor@libertadores.edu.co
Semillero: Internet de las Cosas.

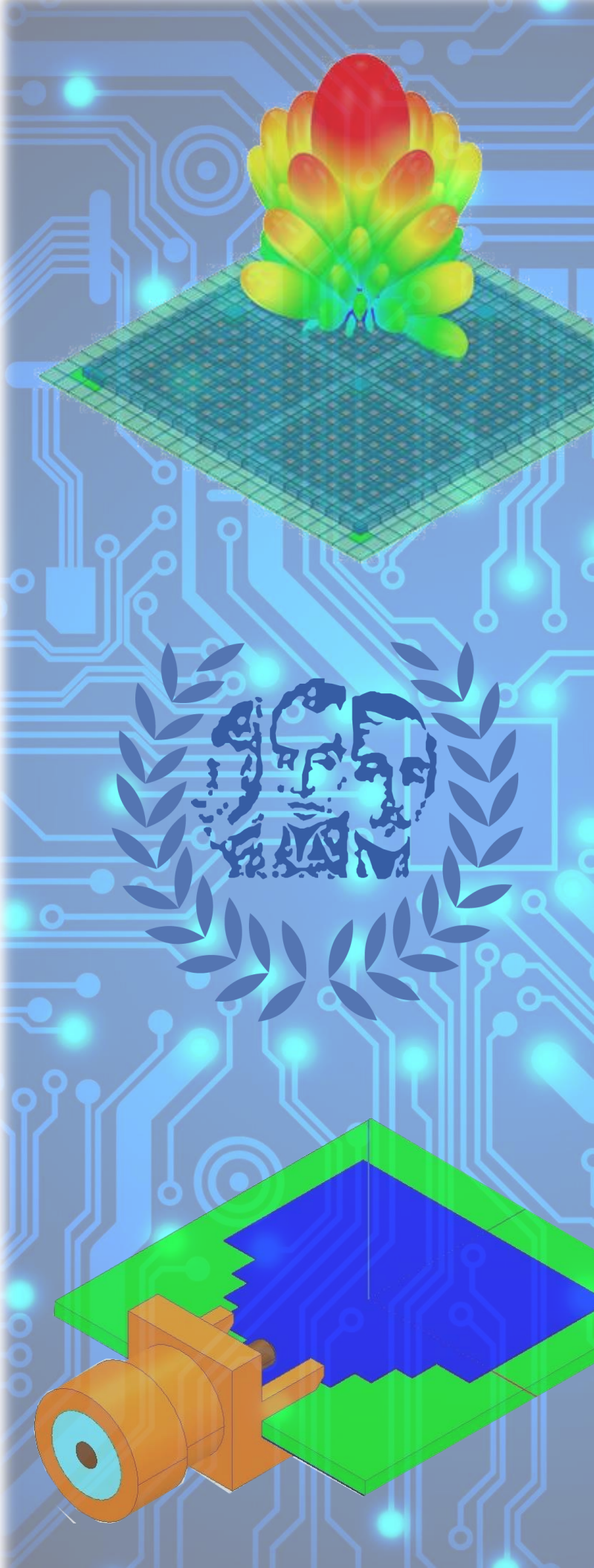
© Fundación Universitaria Los Libertadores https://www.ulibertadores.edu.co/
Volume 2 *Recibido por el editor:* 2022-05-17
Agosto 2022 *Aceptado por el comité editorial:* 2022-07-22

Tutoriales

Tutoriales

31

Tutorial para la simulación de una antena parche usando el programa Ansys HFSS versión estudiantil



Revista Ciber-Sistemas
Agosto 2022, Volume 2, 31–43.
https://repository.libertadores.edu.co/handle/11371/23

Tutorial para la simulación de una antena parche usando el programa Ansys HFSS versión estudiantil

Johan David Salazar
Fundación Universitaria
Los Libertadores

Leonardo Correa Acero
Fundación Universitaria
Los Libertadores

Omar Ariel Nova
Fundación Universitaria
Los Libertadores

Resumen

En este artículo tutorial se presenta el procedimiento de simulación de una antena parche utilizando el programa Ansys HFSS versión estudiantil. Se comienza presentando las instrucciones para la instalación del programa, seguidas por la creación del proyecto de simulación y del modelo físico de la antena. Con el modelo creado se definen las fronteras de radiación alrededor de la antena y su excitación, para pasar a ajustar la simulación y ejecutarla. Finalmente se describe la forma de obtener los resultados consistentes en el coeficiente de reflexión o parámetro S_{11} en función de la frecuencia y los patrones de radiación, tanto en dos como en tres dimensiones, para la frecuencia de resonancia de la antena..

Palabras Clave: Antena parche, Frontera de radiación, Parámetro S_{11}, Patrón de radiación, Resonancia, Simulación, Substrato.

1. Introducción

Las antenas son un componente fundamental de los sistemas de comunicaciones dado que son los elementos radiantes que se encargan de convertir la energía conducida en medios de transmisión en energía radiada que se puede propagar a grandes distancias. Existen diferentes tipos de antenas, entre los que se encuentran: antenas de alambre, antenas de apertura, antenas planas, antenas de reflector, antenas de lente y arreglos de antenas Balanis (1997). Un ejemplo de antena de alambre es la antena dipolo, la cual está conformada por dos brazos de alambre que se unen en la mitad por el transmisor-receptor. Esta antena se puede simular fácilmente en el programa Ansys HFSS, como se indica en Jones (2017).

Un ejemplo de antena de apertura es la antena bocina. Existen diferentes tipos de antena bocina, dependiendo de su sección transversal y de la dirección de su apertura. En función de su sección transversal, se encuentran las antenas bocinas rectangulares y cónicas; y en función de la dirección de su apertura, se encuentran las antenas en plano H o en plano E Kraus (2001). La antena de reflector más popular es la de reflector parabólico, comúnmente conocida como antena parabólica. Esta antena basa su funcionamiento en el hecho de que todas las ondas que inciden en el reflector parabólico son dirigidas hacia su foco, en donde se encuentra el transmisor-receptor.

Las antenas de lente presentan un funcionamiento parecido al de los lentes ópticos, en el que enfocan las ondas radiadas dependiendo de la forma de la antena, ya sea cóncava, convexa o plana Balanis (1997). Disponiendo varias de las antenas básicas anteriormente descritas, en una determinada configuración geométrica, se obtienen los arreglos de antenas, los cuales son usados para mejorar propiedades de las antenas que los constituyen, tales como ganancia y dirección del patrón de radiación Balanis (1997); Kraus (2001).

Para las frecuencias de microondas las antenas más utilizadas son las antenas planas. Este tipo de antenas se caracterizan porque son implementadas sobre substratos dieléctricos. Las más comunes son las antenas de microcinta y las antenas de ranura. Entre las antenas de microcinta, la antena básica es la antena parche, la cual consiste en una metalización de forma rectangular o circular, conocida como parche, que es excitada a través de una línea de transmisión Balanis (1997).

Dependiendo de las dimensiones del parche, la antena resuena en una determinada frecuencia. Las antenas parche son muy usadas debido a su bajo costo y facilidad de implementación, considerando que se pueden fabricar con técnicas convencionales de circuitos impresos. Este tipo de antenas se puede simular usando el programa Ansys HFSS, como se indica en Al-Rizzo (2004); EM-Talk (2022).

El programa Ansys HFSS es un simulador de onda completa que permite calcular los campos electromagnéticos en tres dimensiones en el dominio de la frecuencia y que se basa en el método de elementos finitos [FEM por las siglas en inglés de “Finite Element Method”]. Estas características del programa hacen que sea muy apropiado para simular antenas con geometrías arbitrarias y optimizar su desempeño variando su geometría y dimensiones físicas.

En este artículo se presenta la simulación de una antena parche básica utilizando el programa Ansys HFSS. Siguiendo los pasos indicados en este artículo será posible simular la antena básica y abrir la posibilidad de optimizar su desempeño utilizando las funcionalidades del programa. Por ejemplo, es de interés la compactación de este tipo de antenas con el fin de poderlas incorporar dentro de dispositivos electrónicos de tamaño reducido Wong (2002).

Una aplicación que está teniendo mucho desarrollo actual es la implementación de antenas planas vestibles, las cuales se obtienen al grabar metalizaciones sobre substratos textiles correspondientes a prendas de vestir. Estas antenas son usadas en aplicaciones como el monitoreo de signos vitales o el diagnóstico de ciertas enfermedades como la apnea del sueño Sabban (2018).

En la sección 2 se presenta el procedimiento para crear el modelo de la antena parche en el programa Ansys HFSS, comenzando por la instalación de dicho programa y concluyendo con el ajuste de la excitación de la antena. En la sección 3 se presenta el procedimiento para la simulación de la antena, desde su ajuste hasta su ejecución. En la sección 4 se reportan los resultados de la simulación, consistentes en el parámetro S_{11} y en los patrones de radiación en dos y tres dimensiones. Finalmente se presentan las conclusiones del trabajo.

2. Procedimiento para la creación del modelo de la antena parche

2.1. Instalación del programa

La versión estudiantil del programa Ansys HFSS se puede descargar del siguiente enlace, en el que se encuentran las instrucciones de instalación:

- https://www.ansys.com/academic/students/ansys-electronics-desktop-student

2.2. Creación del proyecto

1. Luego de abrir el programa, se crea el proyecto en el menú: File >New.
2. Se inserta el diseño HFSS en el menú: Project >Insert HFSS Design.
3. Se ajusta una simulación HFSS Modal en el menú: HFSS >Solution Type. Allí se seleccionan las siguientes opciones:
   - Solution Types: HFSS.
   - Options: Network Analysis, Modal.

2.3. Creación del modelo

En la interfaz del programa se reconocen las siguientes tres regiones, las cuales se ilustran en Figura 1:

- Project Manager.
- History Tree.
- 3D Modeler.

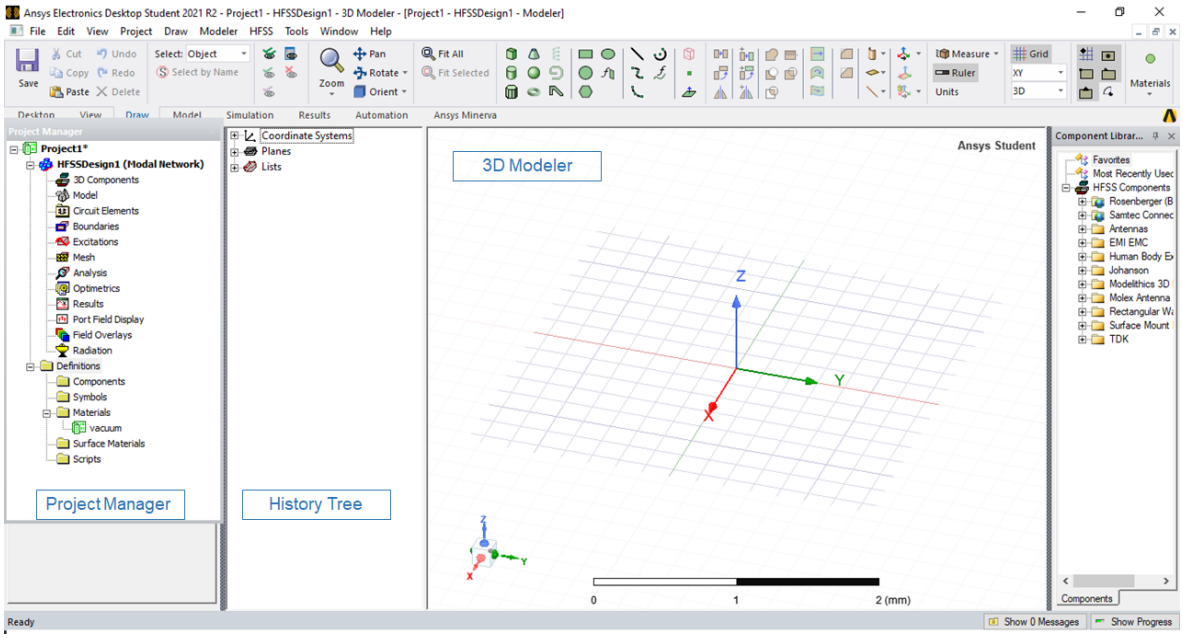


Figura 1: Regiones de la interfaz de Ansys HFSS.

Para crear el modelo se dibujan los siguientes objetos:

1. Plano de tierra:

   1.1 Se dibuja en el menú: Draw >Box. Se hace click consecutivamente sobre el espacio del modelo para definir la base y la altura de la caja.

   1.2 En el espacio "History Tree" se crea por defecto una caja llamada "Box 1" en la siguiente ubicación: Model >Solids >vacuum >Box 1. Esto indica que por defecto la caja se crea con material de vacío ("vacuum"), por lo cual se debe editar como se indica a continuación:

   - Haciendo doble click sobre la caja "Box 1" se abre el siguiente cuadro de propiedades:

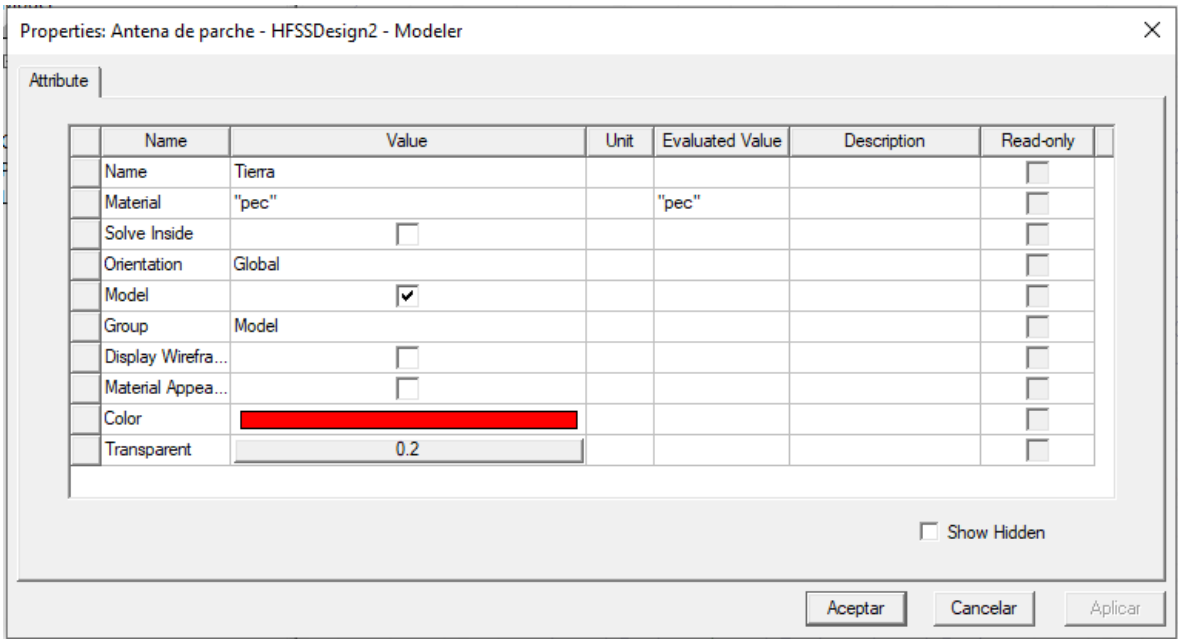


Figura 2: Cuadro de propiedades de la caja “Box 1”.

- En este cuadro se editan las siguientes propiedades:
  Name: Tierra
  Material: pec (“perfect electric conductor”)
  Color: rojo
  Transparent: 0.2

1.3 En el espacio “History Tree”, se hace doble click sobre el elemento “Create Box” anidado dentro de la caja “Tierra” para abrir el siguiente cuadro de diálogo:

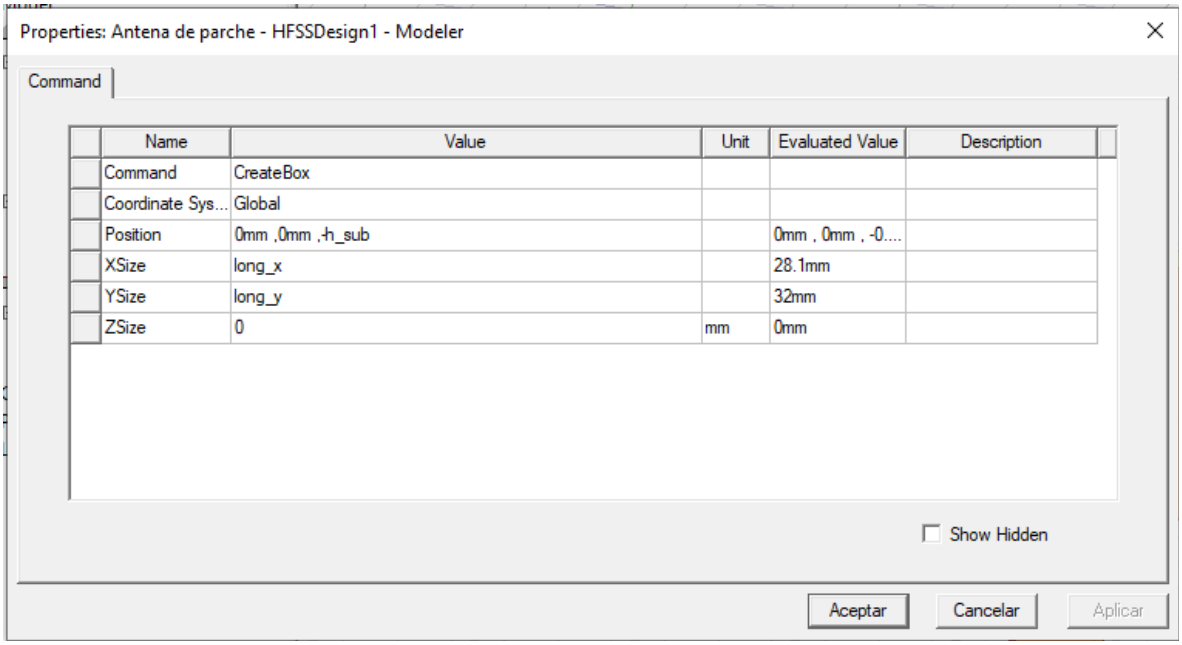


Figura 3: Cuadro de diálogo “Create Box” asociado a la caja “Tierra”.

- En este cuadro se editan las siguientes propiedades:
  Position: 0 mm, 0 mm, -h_sub
  XSize: long_x

YSize: long_y
ZSize: -z_parche

Siguiendo el mismo procedimiento usado para crear el plano de tierra, se crean los siguientes objetos:

2. Substrato:

   Material: Rogers RT/duroid 5880 (tm)
   Position: 0 mm, 0 mm, 0 mm
   XSize: long_x
   YSize: long_y
   ZSize: -h_sub

3. Parche:

   Material: pec ("perfect electric conductor")
   Position: long_x/4, long_y/4, 0 mm
   XSize: x_parche
   YSize: y_parche
   ZSize: z_parche

4. Microcinta de acceso:

   Material: pec ("perfect electric conductor")
   Position: long_x/4 + x_parche/4, 0 mm, 0 mm
   XSize: x_linea
   YSize: y_linea
   ZSize: z_linea

5. Caja de aire:

   Material: air
   Position: 0 mm, 0 mm, -h_sub
   XSize: long_x
   YSize: long_y
   ZSize: 10·h_sub

2.4. Creación de la frontera de radiación

Se seleccionan todas las caras de la caja de aire, excepto la que coincide con el plano de tierra. Para hacer esto, dentro de la pestaña "Draw", en la opción "Select" se ajusta "Face" y haciendo click en el botón "Select by Name", se escogen las 5 caras deseadas. Posteriormente, haciendo click derecho sobre una de las caras escogidas, se selecciona la opción "Assign Boundary" >"Radiation". De esta manera, se asigna la frontera de radiación sobre las 5 caras escogidas.

2.5. Creación de la excitación

- Se dibuja un rectángulo mediante la opción Draw >Rectangle. Se hace click consecutivamente sobre el espacio del modelo para definir la base y la altura del rectángulo.

- En el espacio “History Tree” se crea por defecto una caja llamada “Rectangle 1”. Se hace doble click sobre la opción “Create rectangle” y se ajustan las siguientes propiedades:

  Position: long_x/4 + x_parche/4 – 2*x_linea, 0 mm, -h_sub

  Axis: Y

  XSize: 5*x_linea

  ZSize: 3*h_sub

- Se selecciona el rectángulo que se acaba de crear, se hace click derecho sobre él, se selecciona la opción “Assign Excitation” >“Port” >“Wave Port”.

- En el cuadro de diálogo que se abre se define una línea de integración como se ilustra en la siguiente figura:

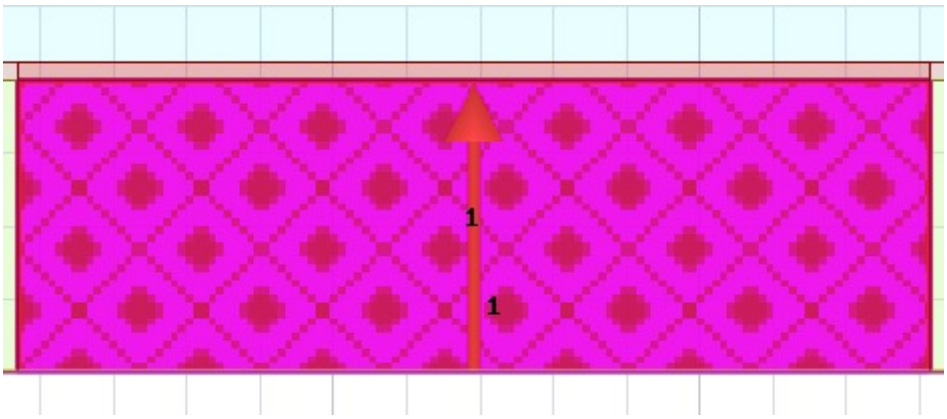


Figura 4: Línea de integración de la excitación “Wave Port”.

- En la pestaña “Post Processing” del mismo cuadro de diálogo se ajusta la opción “Renormalize All Modes” >“Full Port Impedance” >50 ohm.

3. Procedimiento para la simulación de la antena parche

3.1. Creación del ajuste de la solución

- En la sección “Project Manager” de la interfaz del programa se hace click derecho sobre el menú “Analysis” y se selecciona la opción “Add Solution Setup” >“Advanced”. En el cuadro de diálogo que se abre, en la pestaña “General”, se ajustan las siguientes propiedades:

  Solution frequency: Single

  Frequency: 7.55 GHz

  Maximum Number of Passes: 20

  Maximum Delta S: 0.02

  En la pestaña “Options” se activa la opción “Do Lambda Refinement” con el valor “Lambda Target” ajustado en 0.3333.

- En el cuadro de diálogo “Edit Frequency Sweep” que se abre, se ajustan las siguientes propiedades:

Sweep Type: Fast

Distribution: Linear Count

Start: 5 GHz

End: 10 GHz

Points: 500

3.2. Validación del modelo

- -En el menú “HFSS”, se selecciona la opción “Validation check”, con lo cual se abre la siguiente ventana:

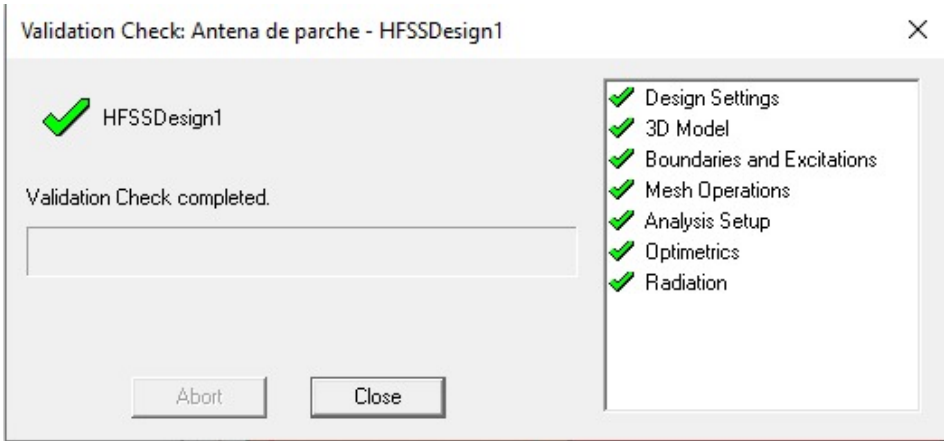


Figura 5: Ventana de validación del modelo.

En esta ventana deben aparecer verificadas todas las propiedades del modelo.

- De esta manera se tiene el modelo completo que se va a simular, el cual se presenta en la siguiente figura:

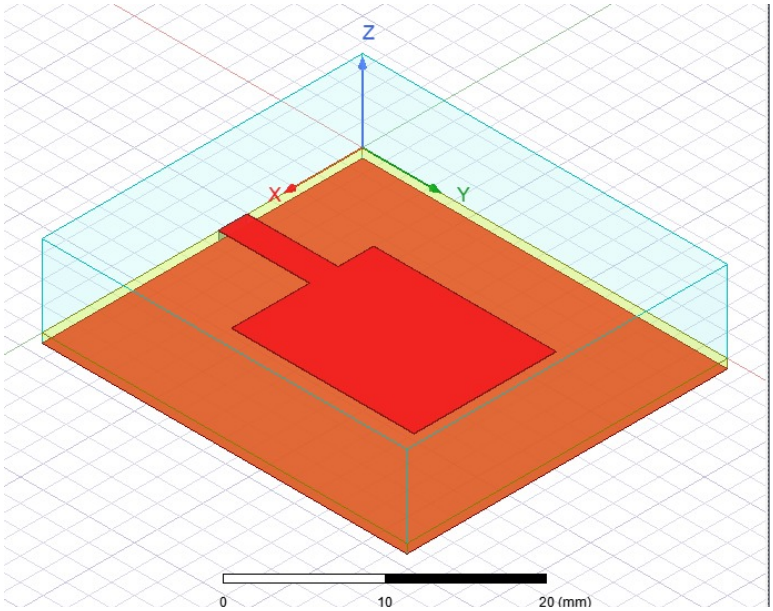


Figura 6: Modelo de la antena parche a simular.

- Los valores de las variables utilizadas para crear el modelo, se muestran en la siguiente tabla:

Variable	Valor
h_sub	0.794 mm
long_x	28.1 mm
long_y	32 mm
x_parche	12.45 mm
y_parche	16 mm
z_parche	0.05 mm
x_linea	2.49 mm
y_linea	long_y / 4
z_linea	z_parche

Tabla 1: Variables del modelo.

3.3. Ejecución de la simulación

- Para ejecutar la simulación, en la sección "Project Manager" (ver Figura 1) se abre el menú "Analysis" y se hace click derecho sobre el nombre del ajuste de simulación creado, por defecto "Setup 1", y luego se selecciona la opción "Analyze".

- Para ver el avance de la simulación, se hace nuevamente click derecho sobre el ajuste de simulación creado ("Setup 1") y se escoge la opción "Convergence". En la ventana que se abre se selecciona la opción "View" >"Plot", para obtener la siguiente gráfica:

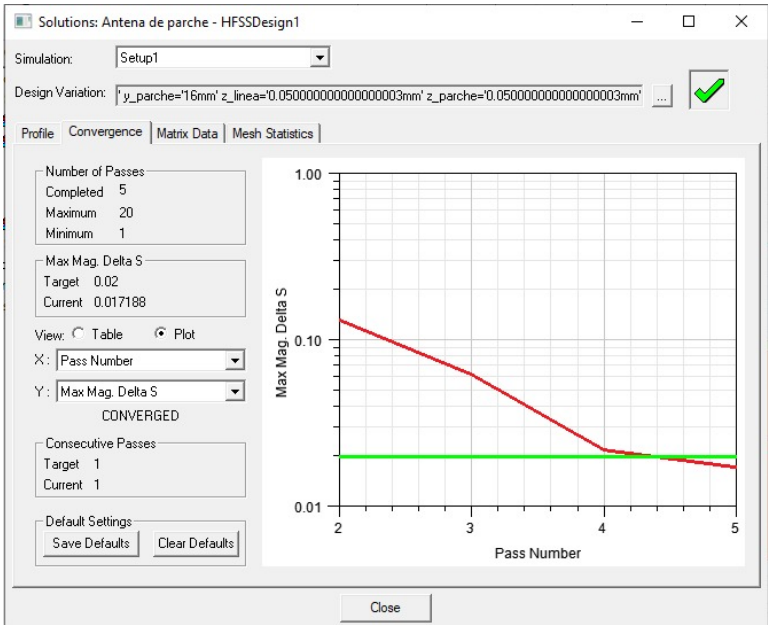


Figura 7: Gráfica de convergencia de la simulación.

En esta gráfica se ve que la simulación converge en la pasada # 5, en la cual el valor del parámetro "Max Mag. Delta S" está por debajo del umbral de 0.02 establecido en el ajuste de la simulación.

4. Resultados de la simulación de la antena parche

4.1. Gráfica del parámetro S_{11}

- En la sección "Project Manager" (ver Figura 1) se hace click derecho sobre el menú "Results" y se escogen las opciones "Create Modal Solution Data Report" y "Rectangula Plot". En las listas que se despliegan dentro de la ventana que se abre, se escogen las siguientes opciones:

  - Category: S Parameter
  - Quantity: $S_{(1,1)}$
  - Function: dB

- Se presiona el botón "New Report" para abrir la gráfica del parámetro S_{11} en función del barrido de frecuencias establecido en el ajuste de la simulación. La gráfica obtenida se presenta a continuación:

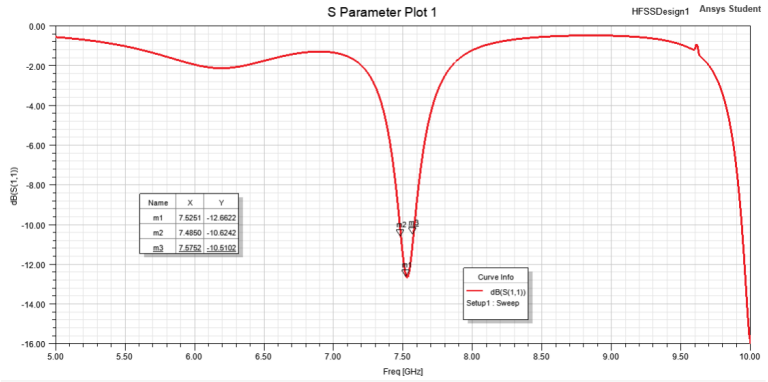


Figura 8: Parámetro S_{11} de la antena simulada.

Los marcadores que aparecen en la gráfica anterior, etiquetados de 'm1' a 'm3', se obtienen haciendo click derecho sobre la sección blanca de la gráfica y escogiendo la opción "Marker" >"Add Marker". Estos marcadores nos indican que la frecuencia de resonancia de la antena es 7.5251 GHz, con un ancho de banda de -10 dB de 90.2 MHz, que se extiende entre 7.4850 GHz y 7.5752 GHz.

4.2. Gráfica de los patrones de radiación

- Para graficar el patrón de radiación en 2 dimensiones en el plano E, en la sección "Project Manager" (ver Figuara 1) se hace click derecho sobre el menú "Radiation" y se selecciona la opción "Insert Far Field Setup" >"Infinite Sphere". En la ventana que se abre se hacen los siguientes ajustes:

  - Name: Plano E yz
  - Phi:

    Start: 90 deg

    Stop: 90 deg

    Step Size: 0 deg
  - Theta:

Start: 0 deg
Stop: 360 deg
Step Size: 2 deg

- Para graficar el patrón de radiación en 2 dimensiones en el plano H, se repite el proceso para insertar una nueva "Infinite Sphere", con los siguientes ajustes:

  - Name: Plano H xz
  - Phi:

    Start: 0 deg
    Stop: 0 deg
    Step Size: 0 deg
  - Theta:

    Start: 0 deg
    Stop: 360 deg
    Step Size: 2 deg

- Para graficar el patrón de radiación tridimensional, se inserta una "Infinite Sphere" con los siguientes ajustes:

  - Name: Esfera
  - Phi:

    Start: -180 deg
    Stop: 180 deg
    Step Size: 2 deg
  - Theta:

    Start: 0 deg
    Stop: 180 deg
    Step Size: 2 deg

  Luego de crear las "Infinite Sphere" se procede a graficar los respectivos patrones de radiación.

- Para graficar el patrón de radiación tridimensional, en la sección "Project Manager" se hace click derecho sobre "Results" y se seleccionan las opciones "Create Far Fields Report" >"3D Polar Plot" y se hacen los siguientes ajustes:

  - En la sección "Context":

    Solution: Setup1: Sweep
    Geometry: Esfera
  - En la pestaña "Trace":

    Category: Gain
    Quantity: GainTotal
    Function: dB
  - En la pestaña "Families":

    Freq: 7.5250501 GHz

- El patrón que se obtiene al presionar el botón "New Report" se presenta a continuación:

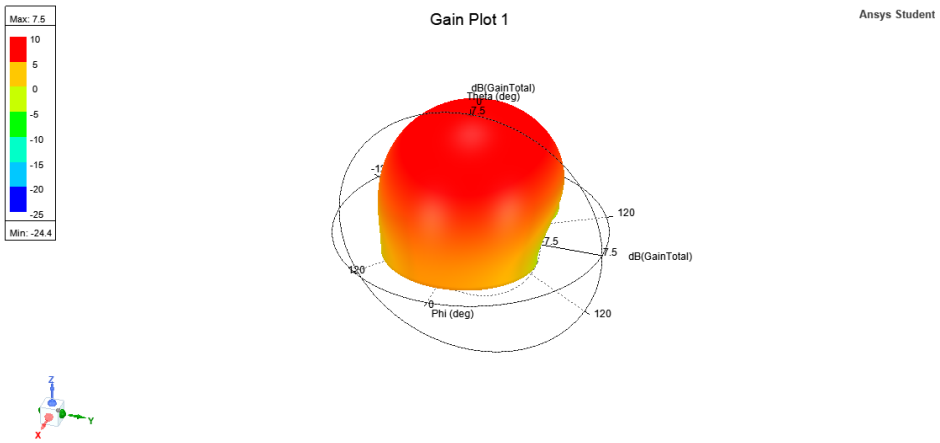


Figura 9: Patrón de radiación tridimensional.

- Para graficar el patrón en el plano E, en la sección “Project Manager” se hace click derecho sobre “Results” y se seleccionan las opciones “Create Far Fields Report” >“Radiation Pattern” y se hacen los siguientes ajustes:

  - En la sección “Context”:

    Solution: Setup1: Sweep

    Geometry: Plano E yz

  - En la pestaña “Trace”:

    Primary Sweep: Theta

    Ang: Default

    Category: Gain

    Quantity: GainTotal

    Function: dB

  - En la pestaña “Families”:

    Freq: 7.5250501 GHz

- El patrón que se obtiene al presionar el botón “New Report” se presenta a continuación:

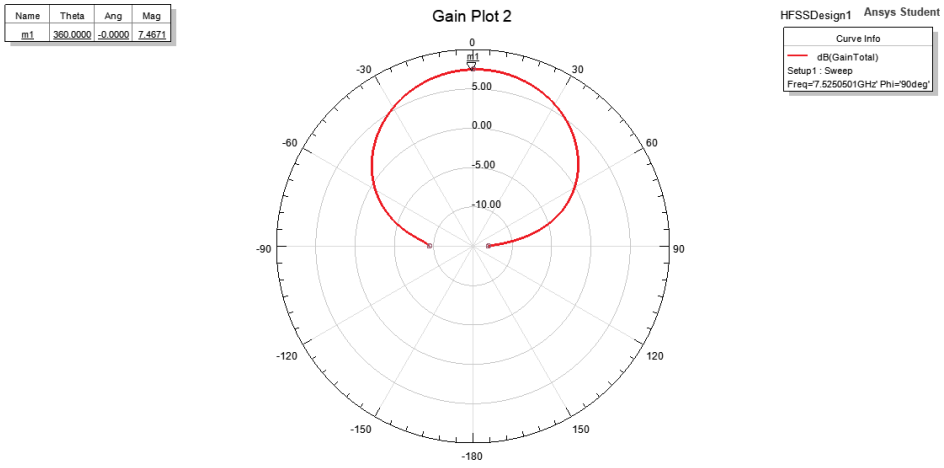


Figura 10: Patrón de radiación en el plano E.

- Para graficar el patrón en el plano H, en la sección “Project Manager” se hace click derecho sobre “Results” y se seleccionan las opciones “Create Far Fields Report” >“Radiation Pattern” y se hacen los siguientes ajustes:

  - En la sección “Context”:

    Solution: Setup1: Sweep
    Geometry: Plano H xz

  - En la pestaña “Trace”:

    Primary Sweep: Theta
    Ang: Default
    Category: Gain
    Quantity: GainTotal
    Function: dB

  - En la pestaña “Families”:

    Freq: 7.5250501 GHz

- El patrón que se obtiene al presionar el botón “New Report” se presenta a continuación:

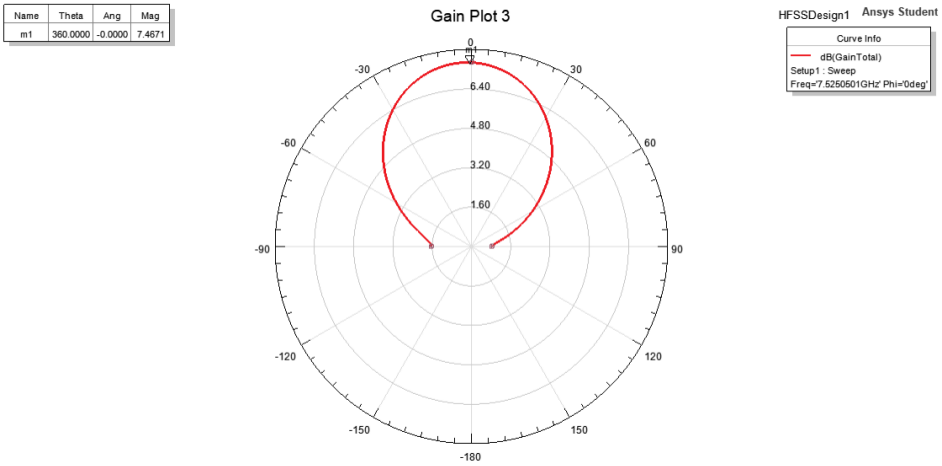


Figura 11: Patrón de radiación en el plano H.

En los patrones de radiación presentados en las Figuras 9, 10 y 11 se puede apreciar que la ganancia máxima de la antena es 7.4671 dB.

Referencias

Al-Rizzo H (2004). *Simulation od microstrip antenna using HFSS*. Little Rock, AR: University of Arkansas Little Rock. doi:10.13140/RG.2.1.3648.2725.

Balanis CA (1997). *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons.

EM-Talk (2022). *HFSS Tutorial 1: Microstrip Patch Antenna*. Electromagnetics and Microwave Engineering. URL http://www.emtalk.com/index.htm.

Jones M (2017). *Ansys High Frequency Structure Simulator (HFSS) Tutorial*. Pacific Northwest National Laboratory. URL https://indico.fnal.gov/event/13068/contributions/17083/attachments/11439/14607/MJones_-_HFSS_Tutorial_for_Axion_Cavity_Workshop.pdf.

Kraus JD (2001). *Antennas–1988*. Tata McGraw-Hill Edition, New Delhi.

Sabban A (2018). *Novel wearable antennas for communication and medical systems*. CRC Press.

Wong KL (2002). *Compact and broadband microstrip antennas*. John Wiley & Sons.

Filiación institucional:

Omar Ariel Nova Manosalva
Fundación Universitaria Los Libertadores
Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas
Programa de Ingeniería Electrónica
Profesor de tiempo completo
Carrera 16 # 63A - 68, Bogotá, D.C., Colombia
E-mail: oanovam@libertadores.edu.co

Johan David Salazar Diaz
Fundación Universitaria Los Libertadores
Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas
Programa de Ingeniería Electrónica
Carrera 16 # 63A - 68, Bogotá, D.C., Colombia
E-mail: jdsalazard@libertadores.edu.co
Semillero de investigación en Calentamiento por radiación electromagnética
y en Resonancia magnética

Leonardo Correa Acero
Fundación Universitaria Los Libertadores
Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas
Programa de Ingeniería Electrónica
Carrera 16 # 63A - 68, Bogotá, D.C., Colombia
E-mail: lcorreaa@libertadores.edu.co
Semillero de investigación en Calentamiento por radiación electromagnética
y en Resonancia magnética.

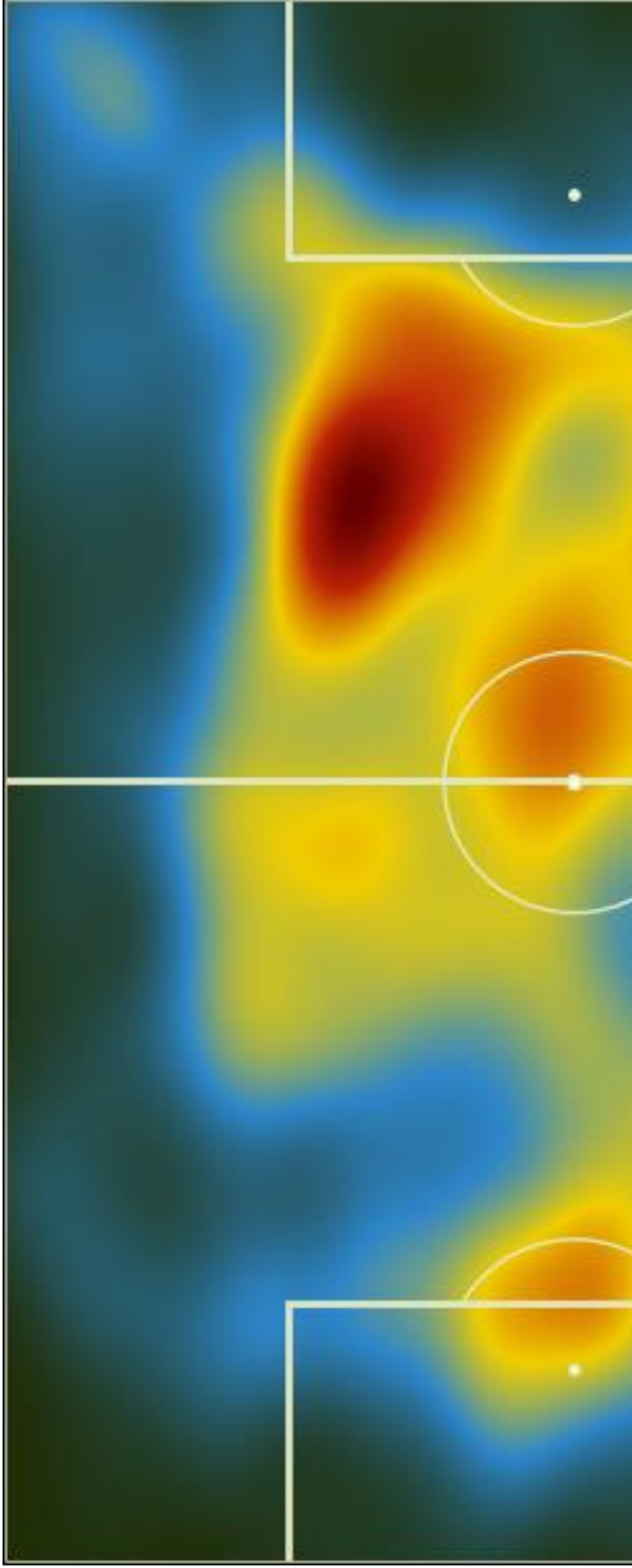
© Fundación Universitaria Los Libertadores https://www.ulibertadores.edu.co/
Volume 2 *Recibido por el editor:* 2022-05-20
Agosto 2022 *Aceptado por el comité editorial:* 2022-07-26

Casos de Uso

Casos de Uso

46

Desarrollo de un nodo sensor basado en MPU6050 para la detección de grietas mediante vibraciones



Revista Ciber-Sistemas
Agosto 2022, Volume 2, 46–57.
https://repository.libertadores.edu.co/handle/11371/23

CIBER-SISTEMAS

Desarrollo de un nodo sensor basado en MPU6050 para la detección de grietas mediante vibraciones

Jorge Esteban Castillo
Fundación Universitaria
Los Libertadores

John Anzola
Fundación Universitaria
Los Libertadores

Resumen

El artículo muestra la adquisición y procesamiento de datos tomados a partir de sensores inalámbricos, estos datos muestran las vibraciones generadas por un resonador en una estructura y así poder detectar fallas como grietas y fisuras. Este proceso se divide en tres partes, el primero se encarga de la adquisición de datos, el segundo en subir estos datos a la nube para almacenarlos y por último realizar el procesamiento de los mismos con un script de python.

Palabras Clave: Infección respiratoria aguda, IRA, Humedad relativa, IoT.

1. Introducción

La aplicación de sensores inalámbricos permite gran facilidad en la adquisición de datos evitando conexiones físicas y dando una mejor ubicación de los mismos en las estructuras a analizar, la medición realizada permite determinar por medio de su respuesta en frecuencia la cual se halla por medio de la transformada rápida de Fourier(FFT), donde se encuentra una falla estructural (fisura o grieta); esto permite dar aviso para un reforzamiento de la estructura y así evitar daños futuros. Por medio del concepto IoT (Internet de las cosas) se realiza el almacenamiento de los datos en la nube para así tener acceso a ellos desde cualquier sitio y evitar pérdida de información. A continuación, se describe los elementos y tópicos empleados:

El Sensor MPU 6050 Carnuccio, Valiente, Volker, De Luca, García, Giulianelli, and Barillaro (2017), cuenta con un giroscopio y un acelerómetro MEMS (Microelectromechanical Systems) cada uno con 3 ejes (x, y, z), funciona combinando la aceleración y el movimiento de rotación en una sola trama de datos. Para medir las vibraciones se debe conocer su unidad de medida la cual está dada por las fuerzas G. Esta unidad de medida se basa en la aceleración generada por la gravedad de la tierra, para poder emplearlo, se concibe que la aceleración de 1G es equivalente a $9{,}8m/s^2$.

La Transformada rápida de Fourier Schmidt (2013), conocida por sus siglas como FFT, es un algoritmo optimizado de la transformada discreta de Fourier (DFT) que permite su implementación de forma más "rápida". La DFT es una transformación secuencial de datos (señal), calculando el contenido de frecuencia en la señal y representando la misma en el dominio de

la frecuencia, reduciendo significativamente el tiempo de cómputo. A continuación, se da un ejemplo del cálculo de la DFT con $N = 2$.

$$x[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad k = 0, ..., N-1 \tag{1}$$

$$x[k] = x[0] \cdot e^{-j\frac{2\pi}{2}k\cdot 0} + x[1] \cdot e^{-j\frac{2\pi}{2}k\cdot 1} = x[0] + x[1] \cdot (-1)^k \tag{2}$$

Simplificando $e^0 = 1$ y $e^{j\pi} = -1$ se obtiene:

$$x[k] = x[0] - x[1] \tag{3}$$

El anterior proceso es reducido por medio de la transformada rápida de Fourier. El diagrama de la Figura 1 muestra la forma con la que opera el algoritmo y la duplicidad de su tamaño al añadir una etapa, por ejemplo, para la FFT de cuatro puntos se requieren dos etapas, para una de ocho puntos tres etapas y así sucesivamente.

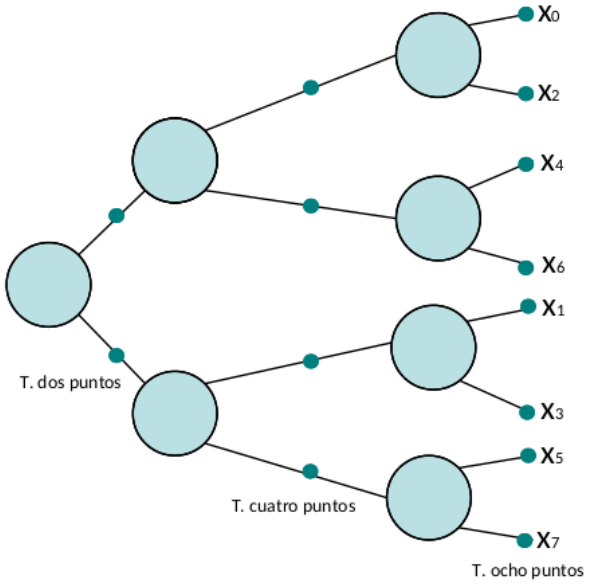


Figura 1: FFT.

2. Trabajos realizados

La vibración en estructuras se genera cuando la estructura presenta resonancia mecánica, entendiendo "resonancia" como las fuerzas dinámicas que actúan sobre un cuerpo que generar un movimiento oscilatorio y cuyas frecuencias de oscilación coinciden con las frecuencias naturales de la estructura, llegando a amplificar más de 20 veces el valor de la primera oscilación en un ciclo de realimentación positiva.

Toda vibración aunque no se llegue a la frecuencia de resonancia, produce fallas en estructuras. En algunos casos, estas vibraciones son causadas por fuentes externas, no controlables y aleatorias, tales como las causadas por el tráfico vehicular, actividades de construcción, encendido de motores, turbinas, entre otras Montalvo and Suárez (2002).

El monitoreo de las vibraciones permite prevenir daños a través del reconocimiento estadístico de patrones entregados por el análisis de los datos medidos a partir de las vibraciones en estructuras Fernández Ruiz (2014).

Este tipo de análisis se ha realizado principalmente por métodos estadísticos que realizan una serie de estimaciones de fallas, ya sea por la distribución de Rayleigh Vila and Baracca (2006), por medio de análisis de componentes principales(PCA) Basurto *et al.* (2021).

Para realizar este monitoreo se han empleado sensores inalámbricos, por múltiples razones, ya sea por mayor facilidad de instalación, el no uso de cables, la autonomía de las baterías, la centralización de los datos Thota, Sundarasekar, Manogaran, Varatharajan, and Priyan (2018), entre otras.

A continuación, se relaciona un par de casos de uso empleando redes de sensores para medir vibraciones:

La torre Aquila, es una torre medieval ubicada en Trento, Italia. En ella se ubican varios sensores en puntos claves de la torre durante cuatro meses para evaluar la estabilidad y el tiempo de vida de la torre Wu, Zonta, Pozzi, Zanon, and Corrà (2010).

El puente de Vermont ubicado en el nordeste de Estados Unidos, es un puente que conecta otros puentes, es bastante antiguo y se emplearon redes de sensores inalámbricos para determinar fallas estructurales, por su alto flujo de tráfico vehicular Martin (2018).

Algunos sensores especiales empleados para medir vibraciones, son el sensor inalámbrico Mica Mote, empleado en la medición de vibraciones en estructuras de acero Kurata, Spencer Jr, Ruiz-Sandoval, Miyamoto, and Sako (2003), sensores de vibración de uso general con salida de tensión Vijande Fernández (2019), sensores de vibración triaxial Vargas-Ruiz (2018), sensores de vibración con señal de salida normalizada Maigua, Quitiaquez, Simbaña, Quitiaquez, Toapanta, and Isaza (2020), sensores de vibración para zonas ATIX Asia (1996), sensores piezoeléctricos Calderón, Ortega, and Moreno (2021), entre otros.

En cuanto a la detección de grietas, se han realizando estudios con pruebas para el análisis de energía, distribución, transmisión y vibración de estructuras Ferrández Vega (2016), además de estos estudios también se han utilizado las vibraciones para demostrar que las vigas corrugadas tienen una mayor frecuencia de resonancia Gatti (2019).

3. Metodología

La metodología se divide en tres procesos, el primero se encarga de la adquisición de datos, el segundo proceso se encarga de subir los datos adquiridos a la nube para almacenarlos y el proceso final realiza el procesamiento de los mismos.

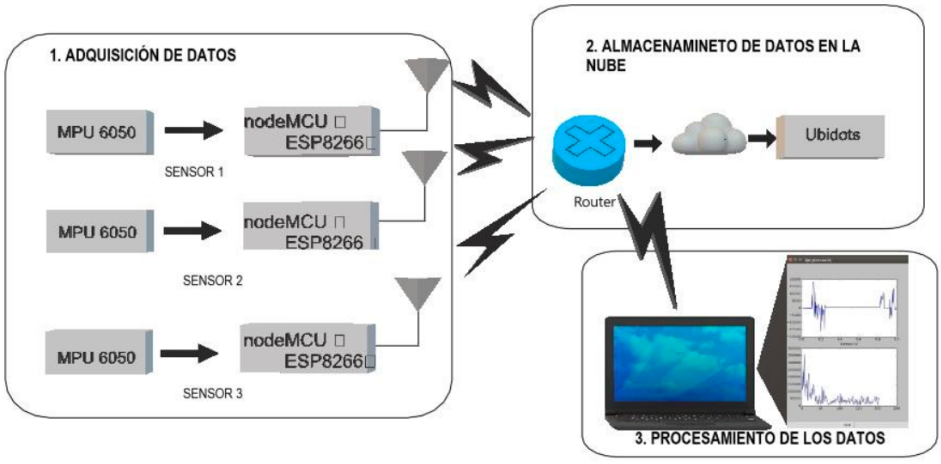


Figura 2: Metodología empleada.

3.1. Adquisición de datos

El nodo sensor mostrado en la Figura 3, está compuesto por la board NodeMCU y el sensor acelerómetro de bajo costo MPU 6050, este nodo realiza la medición de las vibraciones y se conecta vía wifi para realizar el envió de los datos.

El sensor MPU 6050 se encarga de medir y entregar los datos tomados a partir de las vibraciones traducidas a fuerzas G. Los datos son subidos a la nube mediante la board nodeMCU, basado en el módulo WiFi ESP8266.

Figura 3: Metodología empleada.

3.2. Almacenamiento de datos en la nube

El almacenamiento en la nube se realiza con la plataforma ubidots de uso específico para el Internet de las cosas (IoT), cumpliendo con el almacenamiento, registro y configuración de cada sensor en tiempo real (ver Figura 4).

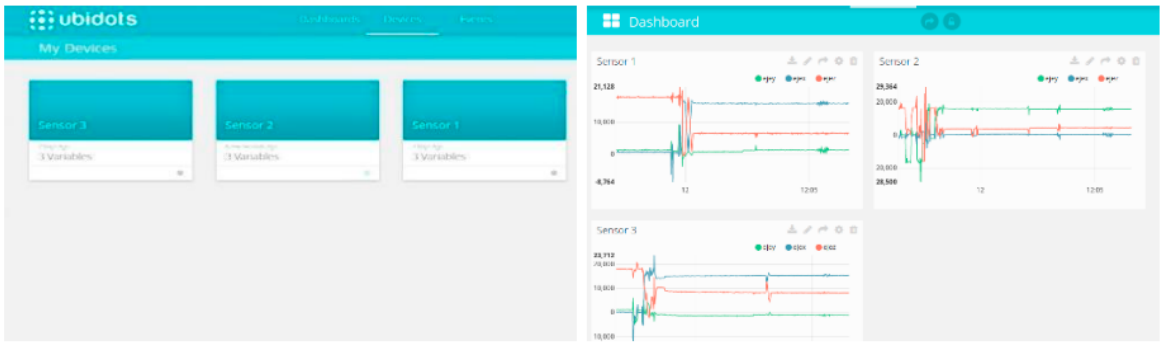


Figura 4: Plataforma ubidots.

3.3. Procesamiento de los datos

El proceso de procesamiento de datos organiza los datos en la plataforma ubidots con toda la información entregada por los sensores. La información almacenada, posteriormente es exportada en un archivo en formato .csv, que es descargado y leído sus datos en un script en python.

Este script realiza el proceso de la transformada de rápida Fourier de los datos, visualiza su respuesta en frecuencia y se determina visualmente sobre los datos, si hay alguna falla estructural como una grieta o una fisura. Un ejemplo de la visualización de los datos procesados se encuentra en la Figura 5.

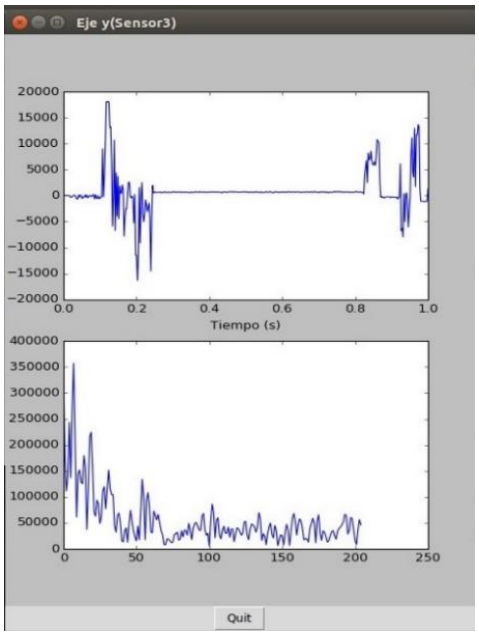


Figura 5: Visualización de datos procesados con el script en python.

4. Experimento

Se ubican los sensores en dos paredes idénticas una con una grieta y otra sin ninguna falla estructural como se muestra en la Figura 6.

Figura 6: Paredes empleadas para el experimento.

Para generar las vibraciones en la estructura, se usó un ventilador con un contra peso en una aleta para que cumpliera la función de resonador (ver Figura 7).

La ubicación de los sensores y el resonador, se hizo en forma de rombo variando su diagonal desde 2m hasta 0.5m, para así determinar a qué distancia se puede capturar mejor la falla estructural en la pared (ver Figura 8).

Figura 7: Resonador.

Figura 8: Ubicación de sensores.

5. Resultados

Se acomodaron los datos obtenidos, de tal forma que se pudiera visualizar por cada eje los tres sensores, dando colores para cada uno.

- Sensor 1: Color rojo.
- Sensor 2: Color verde.
- Sensor 3: Color azul.

La ubicación visual de los datos se organizó de forma tal, que en la gráfica superior corresponde a las mediciones de la respuesta del resonador en el dominio del tiempo, la gráfica inferior corresponde a la respuesta en frecuencia dada por la FFT (transformada rápida de Fourier).

5.1. Con grieta

Se tomaron mediciones con distintas distancias para determinar cuál de estas permite una mejor detección de la falla estructural.

El sensor 2 fue ubicado después de la grieta, debido a que la grieta físicamente es un espacio abierto, la onda generada por la vibración no pasa completamente y se ve reflejado en las gráficas del sensor 2, cuando se encuentran a 0.5m (ver Figura 9) se puede observar que algunas vibraciones pasaron, pero a medida que se aumenta la distancia de la diagonal estas

vibraciones se van haciendo mínimas detectando así el lugar donde se encuentra la falla estructural.

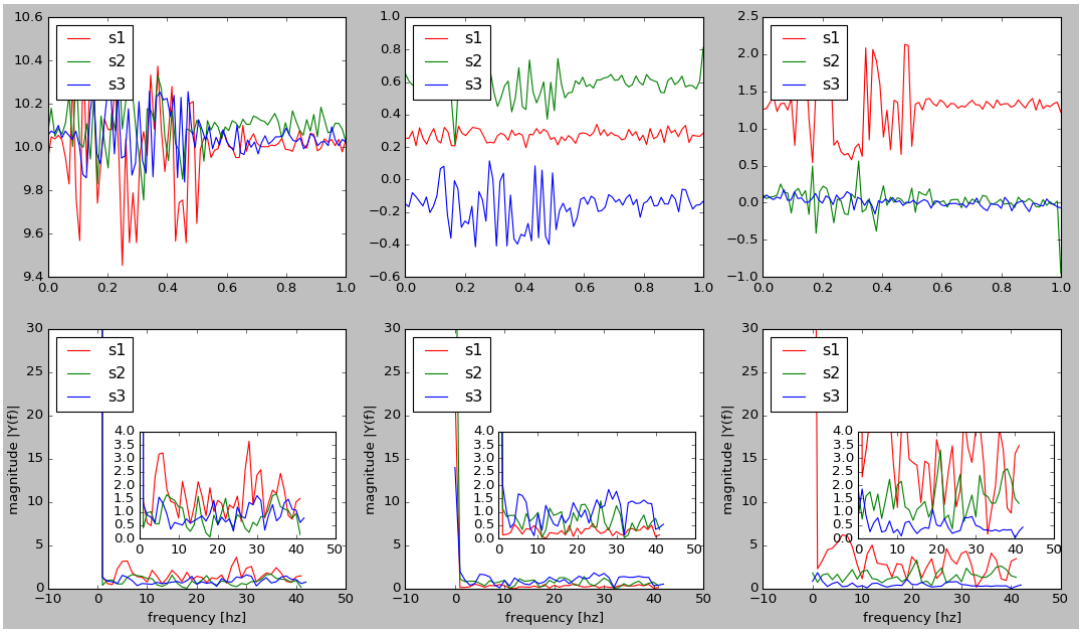


Figura 9: Distancia 0.5m.

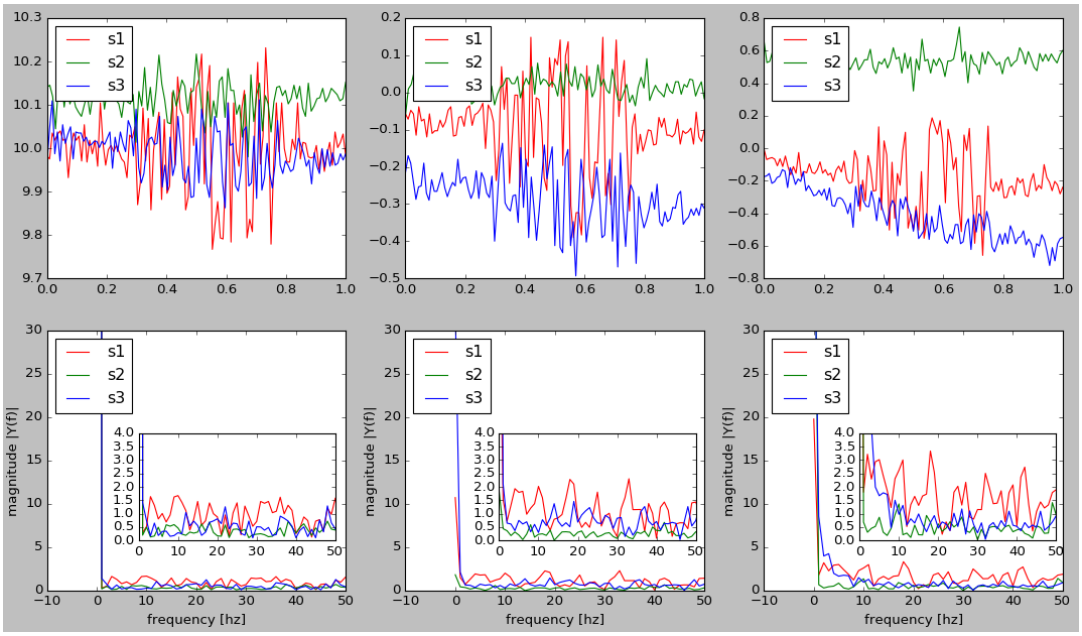


Figura 10: Distancia 1.0m.

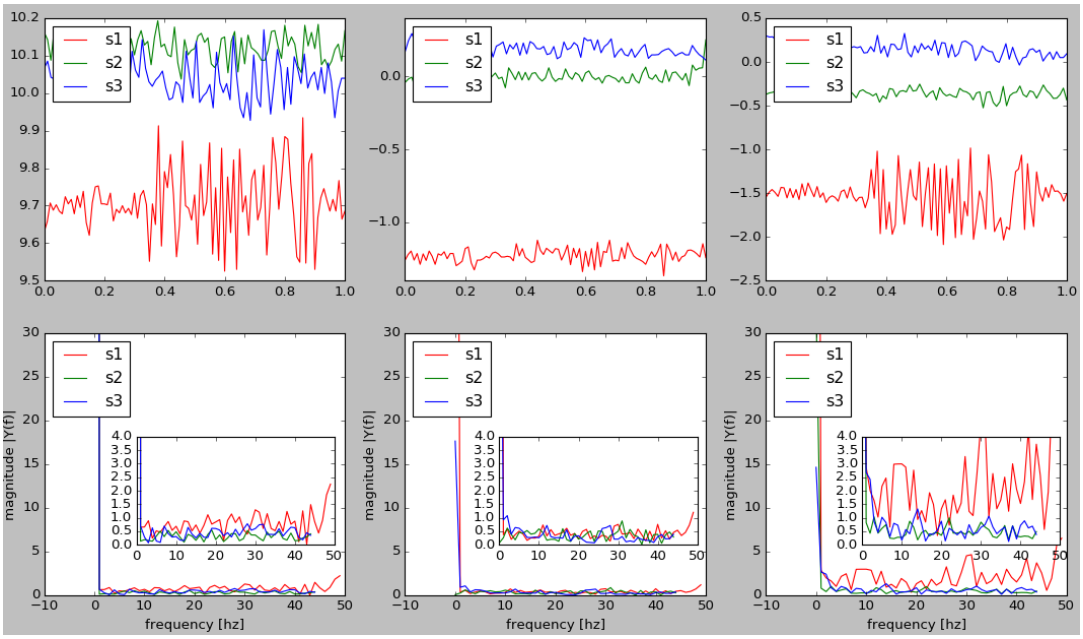


Figura 11: Distancia 1.5m.

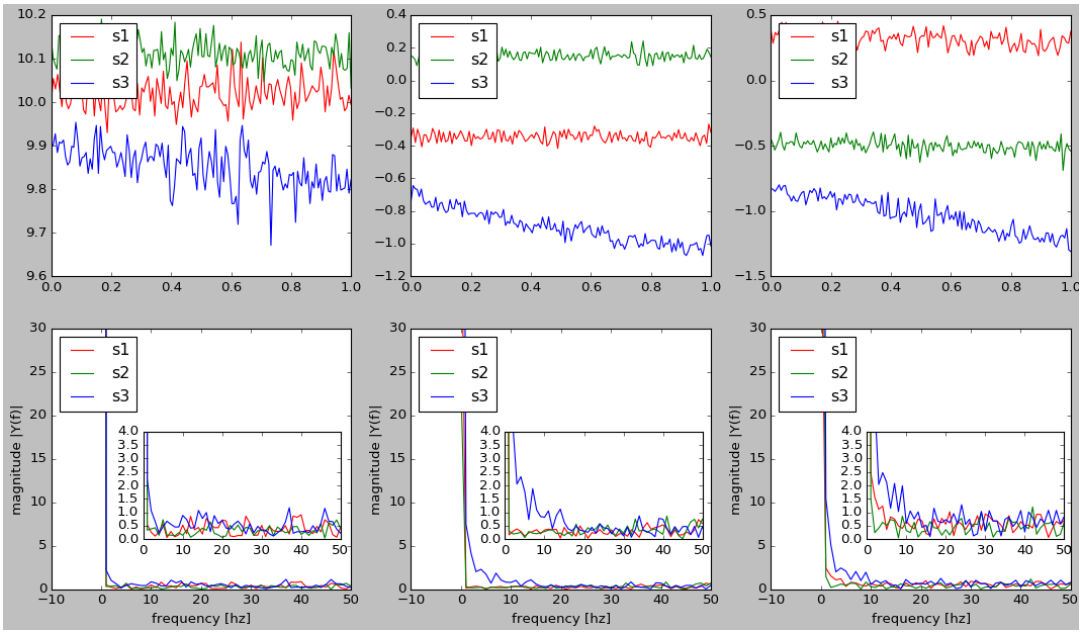


Figura 12: Distancia 2.0m.

Se puede observar que a medida que los sensores aumentan su distancia, se obtienen mejores resultados ya que los sensores captan mejor las vibraciones sin ninguna perturbación, los mejores resultados se obtuvieron en la distancia de 1.5m y 2m tal como se puede observar en las Figuras 10 y 11.

La normalización realizada con los datos adquiridos de las características RMS temporales y los promedios de coeficientes de la FFT entregados por el script de python, reflejan en las gráficas zonas de baja variación por discontinuidades presentadas por las grietas y fisuras del muro, al momento de ser corroboradas visualmente, se evidencia las zonas afectadas que coinciden con los datos de baja variación.

En cuanto a los datos de las características valores de energía pico entregada por la FFT, no reflejan en los datos adquiridos las discontinuidades por fallas grietas o fisuras, los datos

tampoco muestra similitud con los resultados obtenidos los promedios RMS de las vibraciones entregadas por cada uno de los ejes del acelerómetro.

5.2. Sin grieta

Se puede observar que en la prueba más cercana de 0.5m (ver Figura 13) se obtienen muchos cambios en frecuencia concluyendo que esta prueba no es la mejor para detectar los daños estructurales ya que se pueden confundir con una pared que tenga alguna falla.

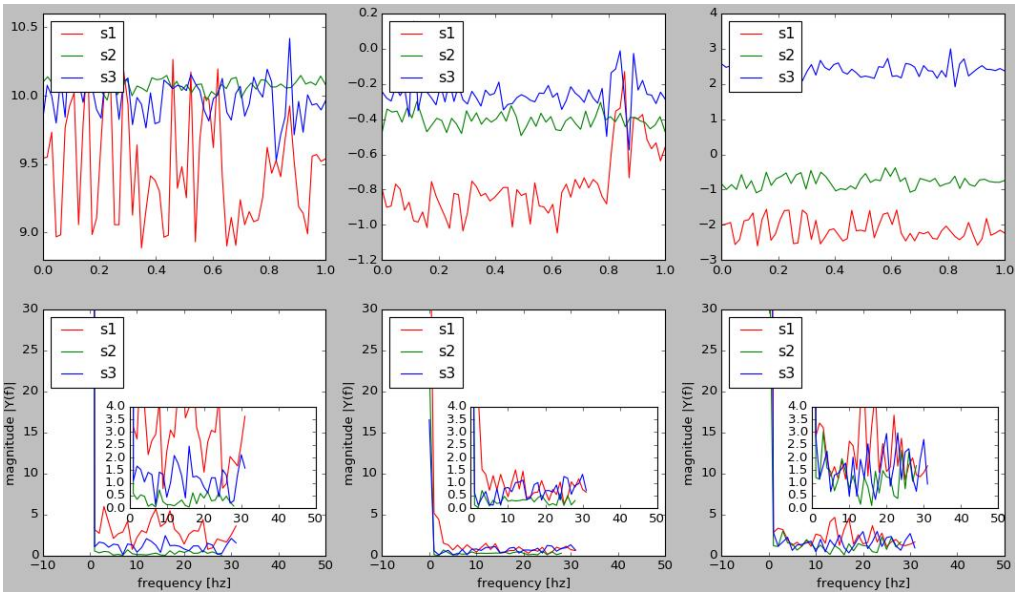


Figura 13: Distancia 0.5m.

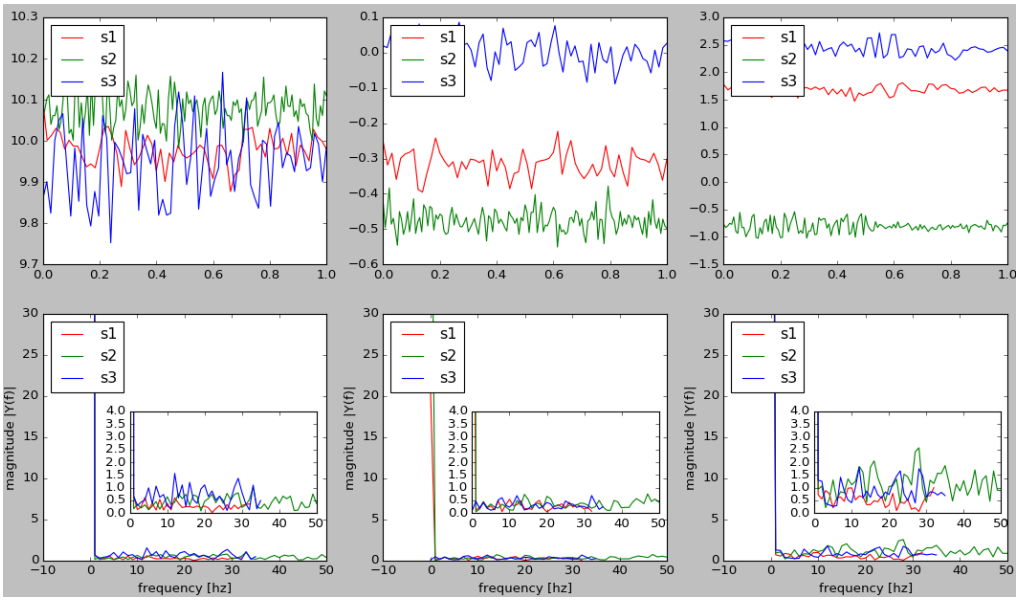


Figura 14: Distancia 1.0m.

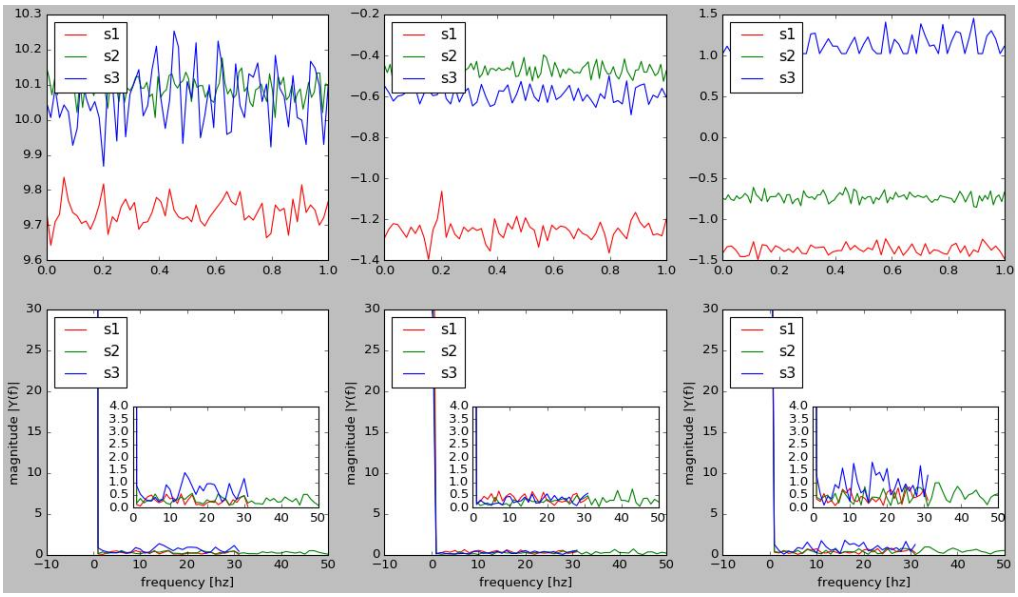


Figura 15: Distancia 1.5m.

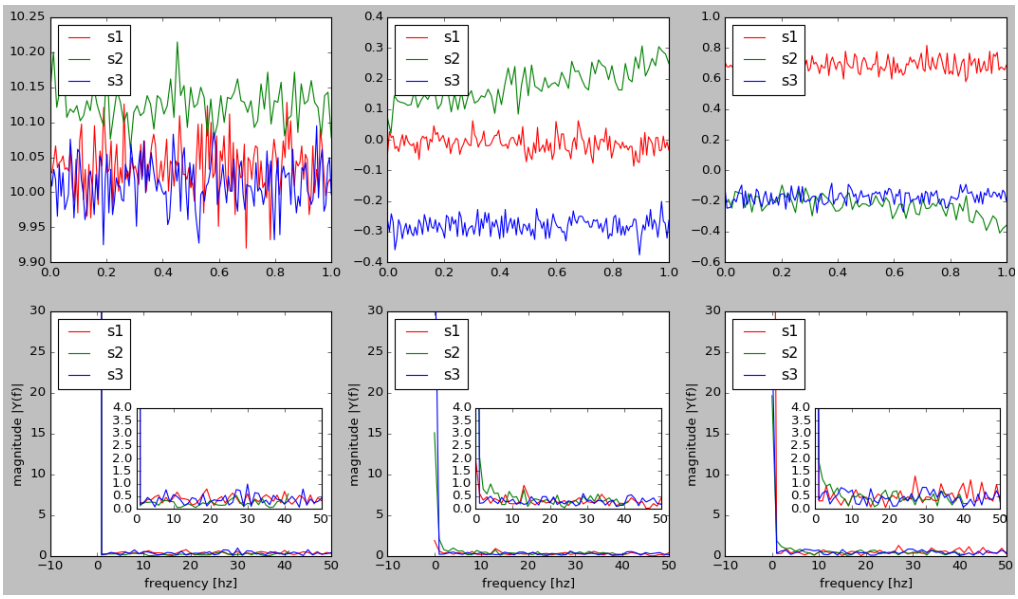


Figura 16: Distancia 2.0m.

Los mejores resultados se obtuvieron nuevamente en las distancias 1.5m y 2m (ver Figuras 15 y 16), siendo esta última distancia en donde no se ve una gran oscilación en frecuencia y describe de manera perfecta el comportamiento de una estructura en buenas condiciones.

6. Conclusiones

- Los sensores inalámbricos brindan una gran facilidad a la hora de ubicar e instalar los mismos en las estructuras.

- La nube nos permite almacenar datos de manera sencilla, aunque a veces en ciertos lapsos de tiempo se pueden llegar a perder algunos datos entregados por los sensores.

- La ubicación de los sensores permite una mejor adquisición de los datos, ya que a medida que se iba aumentando la distancia se mejoraron notablemente los resultados.
- Cuando las vibraciones no pasan un punto específico de la estructura, se puede determinar el nodo sensor que se encuentra cerca a la grieta y así estimar la posición de la falla estructural.
- La transformada rápida de Fourier nos permite gran facilidad a la hora de procesar los datos y obtener su respuesta en frecuencia.

Referencias

Asia S (1996). "The MIT Press." *Cambridge, Massachusets*.

Basurto AG, *et al.* (2021). "Metodología de diagnóstico para la detección de fallas en sistemas valvulares en motores de combustión basada en fusión de señales."

Calderón A, Ortega S, Moreno I (2021). "Diseño y desarrollo de simulador de un sistema de almacenamiento de energía mediante sensores piezoeléctricos." *Revista de Iniciación Científica*, **7**.

Carnuccio E, Valiente W, Volker M, De Luca G, García G, Giulianelli DA, Barillaro S (2017). "Desarrollo de un Prototipo detector de caídas utilizando la placa Intel Galileo Generación I y el sensor MPU6050." In *XXIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (La Plata, 2017)*.

Fernández Ruiz J (2014). "Estudio numérico de vibraciones provocadas por el tráfico ferroviario en túneles en el dominio del tiempo: análisis geotécnico, validación experimental y propuesta de soluciones."

Ferrández Vega D (2016). *Estudio de la Transmisión de Vibraciones por Impacto en Losas de Hormigón y Mortero*. Ph.D. thesis, Edificacion.

Gatti CD (2019). "Diseño e implementación de recuperadores de energía en vehículos de transporte."

Kurata N, Spencer Jr B, Ruiz-Sandoval M, Miyamoto Y, Sako Y (2003). "A study on building risk monitoring using wireless sensor network MICA mote." *Strain*, **1**, 35.

Maigua C, Quitiaquez W, Simbaña I, Quitiaquez P, Toapanta F, Isaza C (2020). "Diseño de un Sistema de Monitoreo de Vibraciones Mecánicas en Generadores Hidroeléctricos de Media Potencia." *Revista Técnica.^{en}ergía"*, **17**(1), 92–102.

Martin W (2018). "Sound is a form of energy. Sound is caused by vibrations of an object or substance, Some force/action causes the vibration."

Montalvo T, Suárez LE (2002). "Evaluación de las vibraciones del suelo causadas por trenes subterráneos usando elementos finitos." *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, **2**(1), 79–88.

Schmidt AL (2013). "Fft: Transformada rápida de fourier." *Estudiante de Ingenieria en Sistemas de Computación. Universidad Nacional de Sur. Bahia Blanca, Argentina. Marzo 2013*.

Thota C, Sundarasekar R, Manogaran G, Varatharajan R, Priyan M (2018). "Centralized fog computing security platform for IoT and cloud in healthcare system." In *Fog computing: Breakthroughs in research and practice*, pp. 365–378. IGI global.

Vargas-Ruiz OF (2018). "Red de sensores para el análisis de vibración en puentes utilizando acelerómetros triaxiales."

Vijande Fernández A (2019). "Design of a self-supplied sensor for an industrial vibrating machine."

Vila NA, Baracca A (2006). "¿ Quién propuso la fórmula de Rayleigh-Jeans?" *Llull*, **29**, 5–18.

Wu HY, Zonta D, Pozzi M, Zanon P, Corrà M (2010). "Historic buildings: long term stability evaluation using wireless sensor networks." In *Advanced Materials Research*, volume 133, pp. 235–240. Trans Tech Publ.

Filiación institucional:

John Petearson Anzola Anzola
Fundación Universitaria
Los Libertadores
Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Ingeniería de Sistemas
Carrera 16 # 63A - 68, Bogotá, D.C., Colombia
E-mail: jpanzolaa@libertadores.edu.co

Jorge Esteban Castillo Salguero
Fundación Universitaria
Los Libertadores
Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Ingeniería Electrónica
Carrera 16 # 63A - 68, Bogotá, D.C., Colombia
E-mail: jecastillos@libertadores.edu.co
Semillero: Internet de las Cosas.

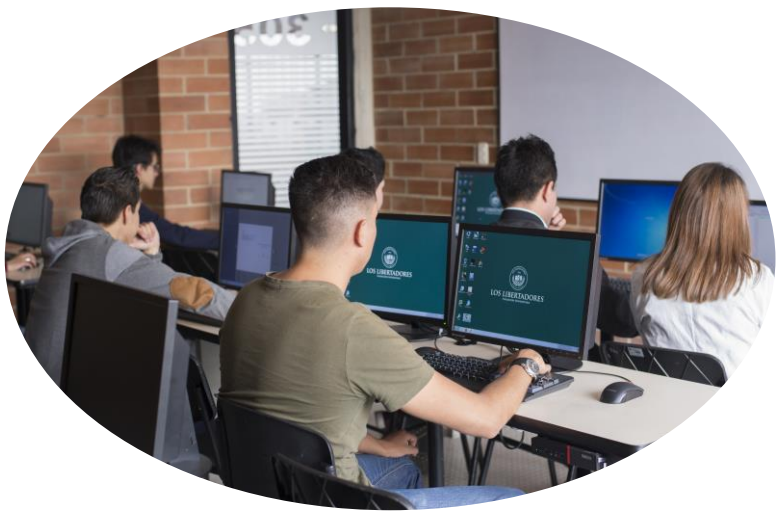
© Fundación Universitaria Los Libertadores https://www.ulibertadores.edu.co/
Volume 2 *Recibido por el editor:* 2022-05-12
Agosto 2022 *Aceptado por el comité editorial:* 2022-07-19

Tendencias Tecnológicas

Tendencias Tecnológicas

60

Fibra Óptica: concepto y funcionamiento básico



Revista Ciber-Sistemas
Agosto 2022, Volume 2, 60–81.
https://repository.libertadores.edu.co/handle/11371/23

Fibra Óptica: concepto y funcionamiento básico

Jaime Ramírez Artunduaga
Fundación Universitaria
Los Libertadores

Resumen

La fibra óptica es esencialmente un medio físico para la transmisión de información, es utilizada en redes de datos y telecomunicaciones, tanto terrestres como submarinas y ofrece velocidades de transmisión muy altas con relación a cualquier otro medio de transmisión, así como un alto grado de confiabilidad y confidencialidad, así como como la facilidad de instalación y manejo. Se compone básicamente de un núcleo de plástico o vidrio (óxido de silicio y germanio) de alto índice de refracción, recubierto de un plástico similar, pero de menor índice de refracción.

Además de su uso en teleunicaciones, las redes ópticas permiten establecer redes informáticas locales y de largo alcance, con una mínima pérdida de información, sus aplicaciones son diversas, encontrando sensores de fibra óptica (para temperatura, presión o niveles de luz), iluminación material (particularmente efectivo ya que no requiere proximidad a la fuente de luz), y también es útil para decoración (en arreglos y figuras luminosas) o como componente de hormigón translúcido. A lo largo de está documento se busca, esencialmente resaltar las características básicas de la estructura y funcionalidad de la fibra óptica, desde un enfoque netamente académico.

Palabras Clave: Fibra óptica, Redes de datos, Redes de telecomunicaciones.

1. Introducción

El contexto del contenido de este trabajo es fundamentalmente de tipo académico. Su pretensión se fundamenta en reseñar los principios cualitativos en los cuales se realizó todo el proceso de su desarrollo, implementación y funcionamiento.

En el proceso de formación profesional de los estudiantes, se requiere complementar los conocimientos conceptuales, de las temáticas tratadas, con la aplicación que se pueden lograr con estos conceptos, lo cual redunda no sólo en el fortalecimiento de estos, sino también en motivar el interés en su investigación, desarrollo y aprovechamiento.

Aunque este medio de comunicación se innovo ya hace algunos años, actualmente tiene vigencia su desarrollo y aplicación, tanto en las redes de tendido terrestre como submarinos Por lo tanto estimamos pertinente referenciar nuevamente la fundamentación teórica y experimental en la cual se sustentó la innovación de este medio de transmisión, el cual ofrece un amplio rango de aplicaciones, entre los que se puede resaltar el de las redes de comunicación de información, que tanto beneficio nos ha prestado. Este trabajo tiene una orientación es-

trictamente académica, buscando contribuir en la formación profesional de los estudiantes de las ingenierías afines a esta temática y motivar el espíritu investigativo de esta.

2. Trabajos Realizados

Teniendo de presente que este artículo no corresponde a la descripción del desarrollo de una investigación científica en particular, ni al de un proyecto específico, sino a la referencia de la fundamentación teórica y de principios cualitativos en los cuales se desarrolló la innovación de la fibra óptica, y que su carácter es netamente académico, su marco conceptual se fundamentó en la experiencia profesional y académica del autor en esta temática y en las consultas que se hicieron en la documentación que se relaciona en la Referencia Bibliográficas.

3. Propuesta

Teniendo de presente que la concepción de la estructura y funcionamiento de la fibra óptica reviste características de alta complejidad, a continuación, se describirá, de manera académica, su principio de desarrollo y de funcionamiento, sin entrar en detalles específicos e intrínseco de estos.

3.1. Concepto y estructura de la fibra óptica

La *fibra óptica* es un medio de transmisión de señales luminosas de múltiples aplicaciones, entre las que se encuentra la de comunicaciones de información. Se requiere de dos fibras ópticas para poder realizar una comunicación bidireccional Wang, Amin, An, Cai, Chen, Chen, Dong, Feng, Fu, Gu *et al.* (2020).

La estructura básica de una fibra óptica la conforma un hilo de material dieléctrico: de vidrio o plástico, de grosor comparable con el de un cabello humano (aproximadamente 0.1mm de diámetro), al que se le denomina núcleo, y el cual esta recubierto por otra capa de material también dieléctrico (esencialmente de plástico) denominada revestimiento. Con el propósito de protección, las fibras ópticas simples están resguardadas de una cubierta y fibras de protección, y externamente por una capa de plástico. En la Figura 1 se muestra el núcleo de una fibra óptica, dos cables con varias fibras y su estructura básica.

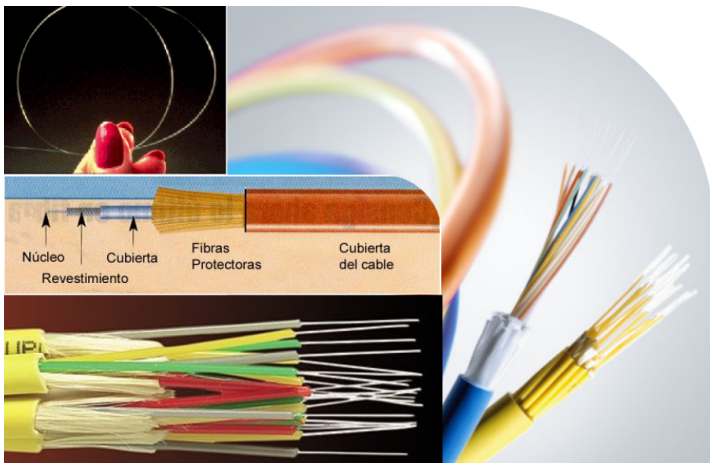


Figura 1: Núcleo, cables ópticos y estructura básica de una fibra óptica simple.

La estructura de un cable óptico (conformado con varias fibras ópticas) depende fundamentalmente del tipo de tendido al que va a hacer sometido: aéreo, subterráneo, superficial o submarino. Teniendo para cada caso unas capas y accesorios adicionales de protección.

Las fibras con núcleo de vidrio son casi siempre hechas de sílice, pero algunos otros materiales son también utilizados, tales como: fluorocirconato, fluroaluminado, vidrios calcogenuros o materiales cristalinos como el zafiro. La atenuación típica de estas fibras es de unos $0{,}25dB/km$ para longitudes de onda de $1{,}550nm$ y de unos $0{,}35dB/km$ para longitudes de onda de $1{,}310nm$ Okonkwo, Tangdiongga, Yang, Visani, Loquai, Kruglov, Charbonnier, Ouzzif, Greiss, Ziemann *et al.* (2011).

Las fibras ópticas con núcleo de vidrio GOF (GlassOpticalFiber) o también denominados fibras de vidrio con recubrimiento de plástico (polímero) PCF (Polymer Cladded Fiber) son más costosas y requieren de mayor cuidado en su implantación y manejo, para evitar rupturas en ellas. El ancho de banda de las fibras ópticas es bastante grande, mayor de los 500 MHz, alcanzando algunas de ellas el orden de los GHz. Así mismo las velocidades de transmisión de datos que permiten las fibras ópticas, comerciales, es del orden de los cientos de Gbps, y en casos especiales hasta algunos Tbps. Actualmente están saliendo al mercado fibras ópticasde núcleo de vidrio que alcanzan velocidades del orden de los petabits por segundo (Pbps).

Las fibras con núcleo de plástico, las cuales se conocen como fibras ópticas de plástico POF (Plastic Optical Fiber), presenta una atenuación muy alta (55 dB/km o más grandes), mucho mayor que las de vidrio, lo que limita su utilización en aplicaciones de cortas distancias, tales como: para la electrónica automovilística y aeronáutica, conexiones internas en hogares, control industrial, en la iluminación (tableros luminosos), en la medicina, en las trasmisiones de audio, entre otras. La ventaja principal de estas fibras, además de su reducido costo, es su fácil manejo, lo que facilita su instalación en paredes y lugares estrechos.

Las fibras ópticas de plástico POF son fibras de tipo multimodo, generalmente de índice escalonado, con diámetros de núcleo de unos 0.5 milímetros o mayor. Las fibras POF no ofrecen velocidades altas, como es el caso de las fibras de vidrio GOF, llegando a velocidades de solo hasta 2.5 Gbps Olaf, Jürgen, Peter, and Werner (2008).

Muchas son las ventajas que ofrecen las fibras ópticas en general, entre las que se cuenta la de seguridad (confidencialidad), esencialmente para el caso de comunicaciones, ya que no se pueden pinchar para extraerle información de forma indebida, debido a que los datos que transportan no son señales eléctricas, como es el caso de los cables conductores, sino pulsos de luz (no eléctricos). Como se mencionó anteriormente hay que anotar que la fibra óptica sólo transmite en un sólo sentido, por lo tanto, un cable de fibra consta de dos hilos, por uno se transmite y por el otro se recibe. Sin embargo, a través de una misma fibra óptica se pueden trasmitir simultáneamente, en una misma dirección, varias señales con distintas frecuencias (longitudes de onda).

3.2. Principios de funcionamiento

Los principales principios en los cuales se fundamentó el diseño de la fibra óptica y su posterior construcción y funcionamiento fueron: el principio de Huygens, la ley de la reflexión, el fenómeno de la refracción, la ley de Snell y la reflexión total de las ondas.

Principio de Huygens

El físico danés Huygens propuso, en los años 1860, un modelo simple para trazar la propagación de ondas, mediante el principio que lleva su nombre, cuyo enunciado establece que: Todos los puntos en un frente de onda se pueden considerar como fuentes puntuales que generan ondas secundarias, que avanzan con una frecuencia y velocidad igual a la de las ondas primarias.

En la Figura 2 se ilustran unas imágenes que pueden ayudar a comprender claramente el significado del modelo planteado por Huygens. La imagen de la izquierda corresponde al principio de Huygens para el caso de una onda plana y la segunda para el caso de una onda esférica.

En las imágenes anteriores se tiene que el frente de la onda inicial, tanto plana como esférica, está conformado por el plano S_1, donde cualquiera de los puntos de este plano: P_1, P_2 y

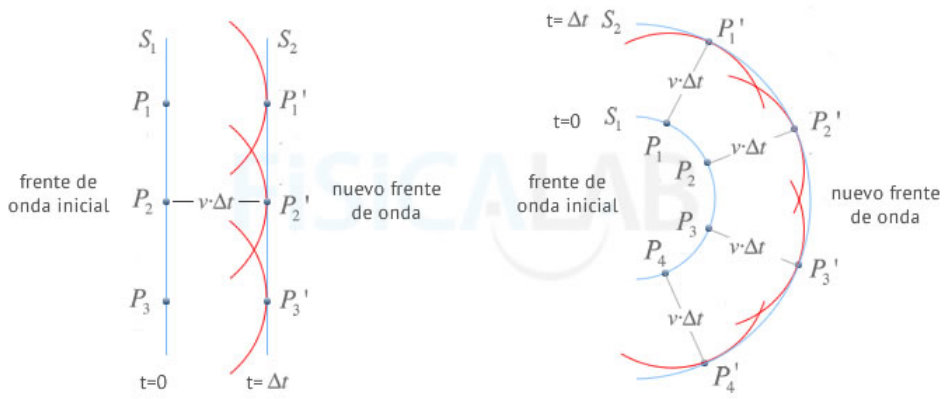


Figura 2: Mágenes ilustrativas del principio de Huygens para onda plana y onda esférica Fernández (2022).

P_3, corresponden a sendos focos emisores de ondas secundarias que se propagan a la misma velocidad y en la misma dirección de la onda inicial.

Considerando que la velocidad de propagación es $v^{'}\Delta t$ tiempo de propagación de la onda entre uno de sus frentes y el siguiente, se tiene que el radio de las ondas secundarias es de y el nuevo frente de ondas S_2, corresponderá a la superficie tangente a todas estas ondas secundarias.

En este nuevo frente S_1, los puntos $P_1{}^{'}$, $P_2{}^{'}$, $P_3{}^{'}$ y $P_4{}^{'}$ estarán en fase y se constituirán a su vez en focos de la nueva serie de ondas secundarias para conformar el siguiente frente de ondas. Debido a que se conserva la misma velocidad de propagación (considerando medios homogéneos e isotrópicos), se puede deducir que un frente de ondas plano causará frentes de ondas planos y un frente de ondas esférico originará frentes de ondas esféricos, y por lo tanto el radio de las ondas secundarias que conforman cada nuevo frente, serán iguales entre sí. De lo anterior se puede deducir que el nuevo frente de ondas, en un instante dado, es la envolvente de todas las ondas secundarias.

Ley de la reflexión

Esta ley establece que: "Si se tiene que una onda incide sobre una superficie plana reflectora con un ángulo de incidencia θ_i, formado por el rayo incidente y la normal a la superficie reflectante, este ángulo es igual al ángulo de reflexión θ_r formado por el rayo reflejado y dicha normal".

Esta ley se fundamenta en la aplicación del principio de Huygens, considerando que sí las ondas secundarias producidas en el frente de ondas chocan contra una superficie reflectante, se invierte el sentido de la propagación de la envolvente de las ondas secundarias reflejadas, dando lugar a la parte del frente de ondas reflejado, cuyo ángulo de reflexión θ_r, es igual al ángulo de incidencia θ_i del frente de ondas incidente (ver Figura 3).

La explicación de la ley de reflexión podría expresarse de la siguiente manera: "Tomando como foco emisor de una onda secundaria incidente el punto P, desde la porción OP, del frente de ondas incidente, se le traza una recta perpendicular PP , de tal forma que $PP = v \cdot \Delta t$. Temiendo como centro el punto O, se traza una circunferencia de radio $v \cdot \Delta t$. Ahora se traza la recta PO, que sea tangente a la anterior circunferencia, donde esta recta se constituye en parte del frente de ondas reflejado. De la igualdad de los triángulos OPP y OOP se puede apreciar que el ángulo de incidencia θ_i es igual al ángulo de reflexión θ_r" Bauer and Westfall (2013b).

Índice de refracción

La refracción de una onda es aquel fenómeno consistente en la modificación de la dirección de propagación que sufre la onda cuando ésta pasa de un medio a otro de características

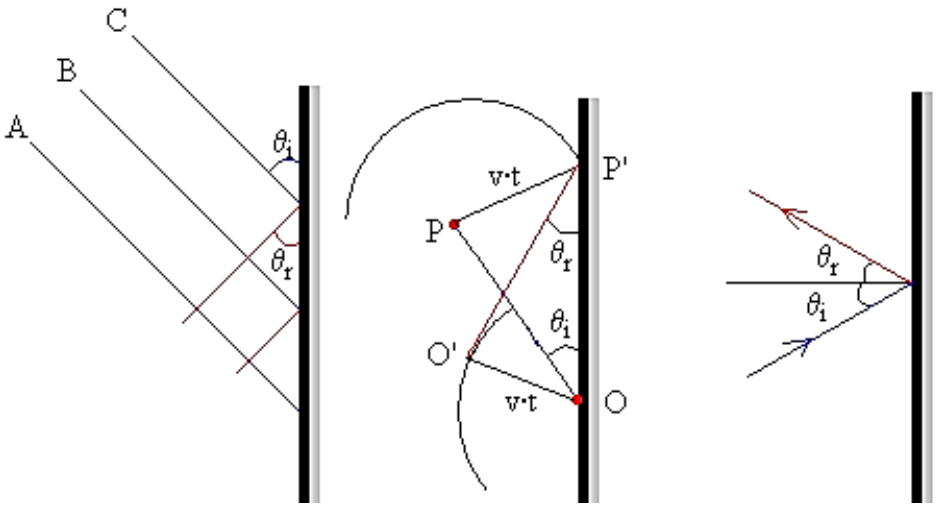


Figura 3: Imágenes ilustrativas de la ley de reflexión Bauer and Westfall (2013a).

diferentes. El índice de refracción de un medio está definido como: "el cociente de la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el medio" Serway and Jewett (2018a), cuyo índice se calcula:

$$n = \frac{c}{v_p} \tag{1}$$

Donde, n es el índice de refracción, c es la velocidad de la luz en el vacio y v_p es la velocidad de la luz en el medio.

El índice de refracción de un medio es una medida para saber cuánto se reduce la velocidad de la luz o de otras ondas, dentro del medio, con respecto a la velocidad de la luz. En la Figura 4 se ilustra el fenómeno de la refracción.

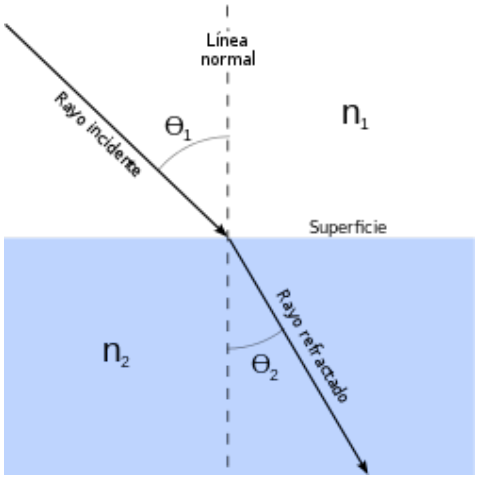


Figura 4: Ilustración del fenómeno de la refracción Serway and Jewett (2018b).

El índice de refracción de los medios depende esencialmente de dos de las características eléctricas de los mismos: permitividad relativa $\varepsilon_r(\frac{F}{m})$ y permeabilidad relativa $\mu_r(\frac{H}{m})$, esta dada por:

$$n = \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} \tag{2}$$

En términos generales la permeabilidad relativa de los medios dieléctricos es aproximadamente

a la unidad. Para estos casos el índice de refracción queda solo en función de la permitividad relativa de los medios, la cual corresponde a la constante dieléctrica de los mismos (k_e), esta dada por:

$$n = \sqrt{\varepsilon_r} = \sqrt{\mu_r} \tag{3}$$

En la Tabla 1 se relacionan el índice de refracción de algunos materiales.

Material	**Indice de refracción**
Vacío	1.0
Aire (*)	1.0002926
Agua	1.3330
Acetaldehido	1.35
Solución de azúcar (30 %)	1.38
1-butanol (a 20^{o}C)	1.399
Glicerina	1.473
Hetanol (a 25^{o}C)	1.423
Solución de azúcar (80 %)	1.52
Benceno (a 20^{o}C)	1.501
Metanol (a 20^{o}C)	1.329
Cuarzo	1.544
Vidrio (corriente)	1.52
Disulfuro de carbono	1.6295
Cloruro de sodio	1.544
Diamante	2.42
(*) en condiciones normales de presión y temperatura (1 bar y 20^{o}C)	

Tabla 1: Índice de refracción de algunos materiales.

Fenómeno de la refracción

Como se mencionó, se entiende por la refracción de una onda como la flexión que sufre cuando entra a un medio con velocidad de propagación diferente. La velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas (como el caso de la luz) es inversamente proporcional al índice de refracción del medio donde se está propagando, esta dado por:

$$v_p = \frac{c}{n}(m/s) \tag{4}$$

Donde, c es la velocidad de la luz y n es índice de refracción.

La refracción de las ondas, cuando pasa de un medio de propagación rápido (índice de refracción menor) a otro más lento (índice de refracción mayor), dobla el rayo de las ondas en dirección a la normal a la superficie de contacto entre ambos medios. La cantidad de la flexión depende de los índices de refracción de los dos medios. En las imágenes de la figura se muestra, en forma simplificada, como se desarrolla el fenómeno de la refracción. A continuación, se describe en forma puntual, el desarrollo de este fenómeno Alvarez and Torres (2017).

En la primera imagen, según el principio de Huygens, se tiene un frente de ondas que incide en la superficie de separación de dos medios con distinta velocidad de propagación: donde v_1 es la velocidad de propagación de las ondas en el primer medio y v_2 en el segundo medio. Cuando el frente de ondas incidente hace contacto con el segundo medio, este frente de ondas se refracta en la superficie de separación de estos dos medios, produciéndose ondas que se propagan tanto en el primer medio con velocidad v_1 como en el segundo medio con velocidad v_2.La envolvente de las circunferencias trazadas conforman el frente de ondas después de un

tiempo t, presentándose una línea quebrada por parte del frente de ondas que se propagan en el primer medio y el frente de ondas refractado que se propaga en el segundo medio.

En la Figura 5 se ilustran unas imágenes representativas del fenómeno de la refracción.

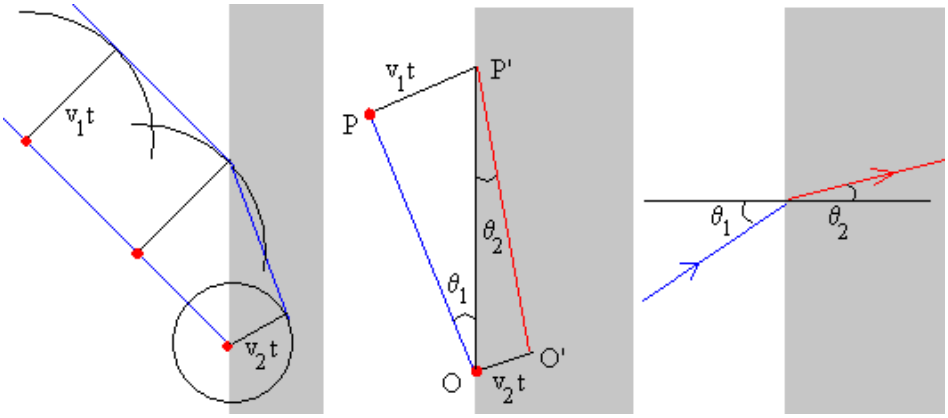


Figura 5: Imágenes representativas del fenómeno de la refracción Franco-García (2006).

En la imagen central de la figura, se indica tanto el ángulo θ_1 que se forma entre el frente de ondas incidentes con la superficie de separación entre los dos medios y el ángulo θ_2 correspondiente al que se forma entre el frente de ondas refractado con dicha superficie.

En la última imagen, haciendo coincidir en un mismo punto, tanto el frente de ondas incidente con el frente de ondas refractado, se puede apreciar la relación la relación entre estos dos ángulos (θ_1: de incidencia y θ_2: de refracción)

Ley de Snell

Teniendo como referencia los dos triángulos indicados en la imagen central de la Figura 5 se puede determinar las siguientes relaciones DeCusatis (2013).

1. Triángulo OPP:
$$sin(\theta_1) = \frac{v_1 \cdot t}{|OP'|} \Rightarrow \frac{|OP'|}{t} = \frac{v_1}{sin(\theta_1)} \tag{5}$$
2. Triángulo $OO'P$:
$$sin(\theta_2) = \frac{v_2 \cdot t}{|OP'|} \Rightarrow \frac{|OP'|}{t} = \frac{v_2}{sin(\theta_2)} \tag{6}$$

De las dos expresiones dadas por las ecuaciones inmediatamente anterior, se tiene que:

$$\frac{v_1}{sin(\theta_1)} = \frac{v_2}{sin(\theta_2)} \tag{7}$$

Ahora, teniendo en cuenta las siguientes equivalencias:

$$v_1 = \frac{c}{n} \wedge v_2 = \frac{c}{n_2} \tag{8}$$

Remplazando en (7) se obtiene la ley de Snell:

$$\frac{n_1}{sin(\theta_1)} = \frac{n_2}{sin(\theta_2)} \Rightarrow n_1 sin(\theta_1) = n_2 sin(\theta_2) \tag{9}$$

La reflexión total

Se puede apreciar en lo indicado en la imagen central de la Figura 6 Seo, Nishimura, Shiino, Yuguchi, and Sasaki (2003), que:

1. Si $\theta_1 > \theta_2$, entonces el rayo refractado se acerca a la normal.

2. Si $\theta_1 < \theta_2$, entonces el rayo refractado se aleja de la normal.

Desde la ecuación (9), se tiene que:

$$sin(\theta_1) = \frac{n_2}{n_1} sin(\theta_2) \tag{10}$$

Sí $\theta_2 = \frac{\pi}{2}$, entonces el rayo refractado emerge tangente a la superficie de separación entre los dos medios, o sea perpendicular a la normal. Para este caso al ángulo de incidencia se le denomina ángulo crítico (o límite): $\theta_1 \equiv \theta_c$. Lo que da como resultado:

$$sin(\theta_c) = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \tag{11}$$

Ahora sí el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo crítico $\theta_1 > \theta_c$, el seno del ángulo de refracción resulta mayor que la unidad, por lo tanto, se tiene la siguiente expresión:

$$\frac{sin(\theta_1)}{sin(\theta_c)} > 1 \Rightarrow \frac{\frac{n_2}{n_1} sin(\theta_2)}{\frac{n_2}{n_1}} = sin(\theta_2) > 1 \tag{12}$$

Lo anterior significa que las ondas que inciden, con un ángulo de incidencia mayor que el crítico, no pasan al segundo medio, sino que son reflejados totalmente en la superficie de separación. Lo que indica que para que exista reflexión total debe cumplirse que:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{n_1}{n_2} > 1 \tag{13}$$

En la Figura 6 se ilustra gráficamente el fenómeno de reflexión total de una onda incidente sobre la superficie de separación entre los dos medios.

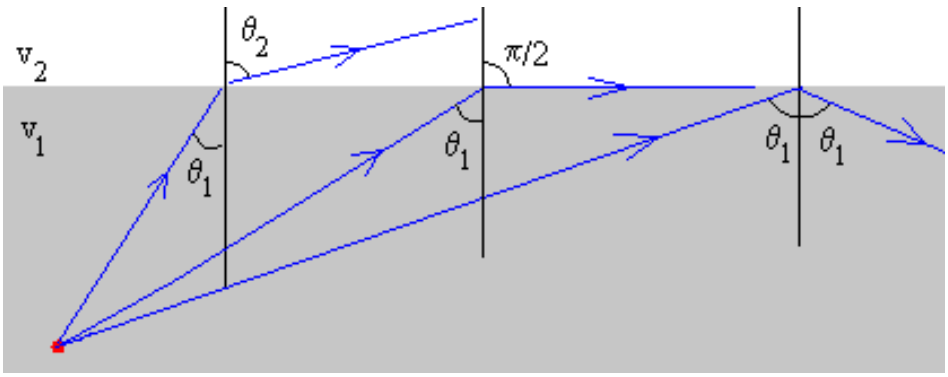


Figura 6: Reflexión total de una onda incidente sobre la superficie de separación entre los dos medios Franco-García (2006).

Como se puede observar en la Figura 6, a medida que se incrementa el ángulo de incidencia θ_1, el ángulo de refracción θ_2 también se incrementa hasta llegar a $\frac{\pi}{2}$. Al incrementarse más el ángulo de incidencia, entonces la onda incidente se refleja hacia el mediodonde proviene.

3.3. Parámetros de funcionamiento de la fibra óptica

De manera muy puntual a continuación se relacionan los principales parámetros de operación y funcionamiento de la fibra óptica.

Apertura numérica (NA)

La apertura numérica (NA: Numerical Apertura) de una fibra óptica corresponde al seno del ángulo máximo que un rayo de luz que incide a la entrada de la fibra puede tener con el eje de la misma y aún puede propagarse por reflexión interna. Mediante un desarrollo de equivalencias trigonométricas, se puede demostrar que la apertura numérica corresponde a lo expresado en la ecuación (14), suponiendo que el rayo de luz entra a la fibra óptica desde el espacio libre Sears, Zemansky, Young, and Freedman (2013).

$$NA = sin(\theta_{max}) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \tag{14}$$

Ángulo de aceptación total

El ángulo de aceptación total de una fibra óptica corresponde a dos veces al determinado por el de la apertura numérica. Este ángulo conforma el cono de aceptación, el cual concierne a aquel donde cualquier onda de luz que entra a él se reflejará internamente y se propagará dentro de la fibra.

Propagación de la luz dentro de fibra

Cualquier rayo de luz que incide en el núcleo de la fibra óptica, dentro del cono de aceptación,después de sufrir una refracción, se propaga a través de dicho núcleo.

El rayo de luz llega a la superficie entre el núcleo y el revestimiento. Sí el índice de refracción del núcleo n_1 es mayor que el de revestimiento n_2, entonces el rayo de luz se refleja totalmente dentro del núcleo, continuándose su propagación.

El rayo de luz llega al otro extremo de la superficie entre el núcleo y el revestimiento, reflejandose nuevamente por la misma razón indicada anteriormente. De esta forma el rayo de luz continua su propagación dentro el núcleo de la fibra, en forma de zic zac.

En la Figura 7 se muestra la forma de propagación de un rayo de luz dentro el núcleo de una fibra óptica.

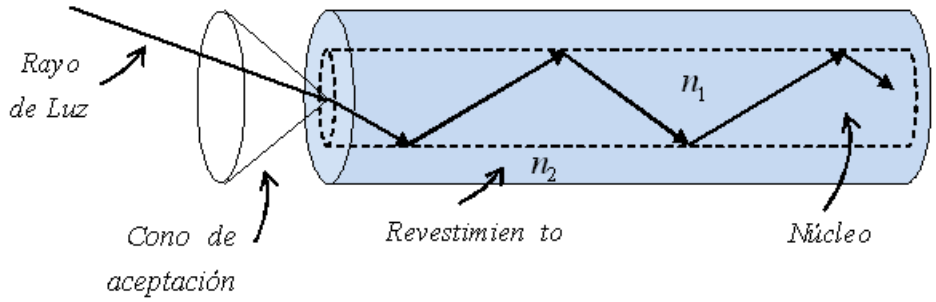


Figura 7: Propagación de un rayo de luz dentro el núcleo de una fibra óptica.

Se podría resumir que el funcionamiento de la fibra óptica se basa en transmitir por su núcleo un rayo de luz, de tal forma que no atraviese su capa de revestimiento, sino que se refleje y continúe su propgación. Lo anterior se logra sí el índice del núcleo es mayor que el del revestimiento, y también sí el ángulo de incidencia del rayo, a la entrada de la fibra, es superior al ángulo critico.

Ejemplo 1

Una fibra óptica está conformada por un núcleo con un índice de refracción de 1.5 y con una capa de revestimiento de 1.3, determinar:

a) El ángulo crítico.

b) El ángulo de refracción si el ángulo de incidencia del rayo de luz es de 50^o.

c) La apertura numérica (NA).

d) El ángulo de aceptación total.

e) El ancho total del cono de aceptación.

Solución

a) El ángulo crítico: aplicando la ecuación (11).

$$sin(\theta_c) = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1{,}3}{1{,}5} \Rightarrow \theta_c = arsin(0{,}87) = 60{,}46^o$$

b) El ángulo de refracción si el ángulo de incidencia del rayo de luz es de 50^o: aplicando la ecuación (10).

$$sin(\theta_1) = \frac{n_2}{n_1} sin(\theta_2) \Rightarrow sin(\theta_2) = \frac{n_1}{n_2} sin(\theta_1)$$

$$sin(\theta_2) = \frac{n_1}{n_2} sin(\theta_1) \Rightarrow \theta_2 = arsin(0{,}88) = 61{,}64^o$$

c) La apertura numérica: aplicando ecuación (14).

$$NA = sin(\theta_{max}) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{1{,}5^2 - 1{,}3^2} \approx 0{,}748$$

d) El ángulo de aceptación total ($2\theta_{max}$).

$$\theta_{max} = arsin(0{,}748) = 48{,}12^o \Rightarrow 2\theta_{max} \approx 96{,}84^o$$

e) El ancho total del cono de aceptación: corresponde al ángulo de aceptación total.

$$2\theta_{max} = \approx 96{,}84^o$$

Ejemplo 2

Para un fibra óptica cuyo núcleo tiene un índice de refracción de 1.48 y su revestimiento de 1.39, determinar.

a) Las constantes dieléctricas del núcleo y el revestimiento.

b) La velocidad de la luz en el núcleo y el revestimiento.

c) El ángulo crítico.

d) La apertura númerica.

e) El ángulo máximo.

f) El ancho del cono de aceptación.

Solución

a) Las constantes dieléctricas: aplicndo ecuación (3).

$$n = \sqrt{\varepsilon_r} = \sqrt{k_e} \Rightarrow k_e = n^2$$

Constante dielectrica del núcleo:

$$k_{e1} = n_1^2 = (1{,}48)^2 \approx 2{,}19$$

Constante dieléctrica del revestimiento:

$$k_{e2} = n_2^2 = (1{,}39)^2 \approx 1{,}93$$

b) La velocidad de la luz: aplicando ecuación (4).

$$v_p = \frac{c}{n}(m/s)$$

$$v_1 = \frac{c}{n_1} = \frac{3 \times 10^8}{1{,}48} \approx 2{,}03 \times 10^8 (m/s)$$

Velocidad de la luz en el revestimiento:

$$v_2 = \frac{c}{n_2} = \frac{3 \times 10^8}{1{,}39} \approx 2{,}16 \times 10^8 (m/s)$$

Es bueno aclarar que esta velocidad correspondería si la luz se refractara en el revestimiento, pero para este caso se refleja, por lo tanto la velocidad es cero.

c) El ángulo crítico: aplicando ecuación (11).

$$sin(\theta_c) = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{1{,}39}{1{,}48} = \frac{2{,}03 \times 10^8}{2{,}16 \times 10^8} \approx 0{,}9392$$
$$\theta_c = arsin(0{,}9396) \approx 69{,}92^o$$

d) La apertura númerica: aplicando ecuación (14).

$$NA = sin(\theta_{max}) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{(1{,}48)^2 + (1{,}39)^2} \approx 0{,}5082$$

e) El ángulo máximo:

$$sin(\theta_{max}) \approx 0{,}5082 \Rightarrow \theta_{max} = arsin(0{,}5082) \approx 30{,}54^o$$

f) El ancho del cono de aceptación:

$$2\theta_{max} \approx 61{,}08^o$$

3.4. Ventanas de operación

Las ventanas de operación de las fibras ópticas corresponden a aquellos longitudes de onda, donde la atenuación total que se presentan en las mismas tienen un valor mínimo. La atenuación de la señal óptica atañe a la disminución de la energía luminosa en su propagación a lo largo de la fibra. Las cuasas esenciales de atenuación, inherentes a la fibra, son: la dispersión que se le produce al rayo de luz, debido fundamentalmente a la falta de homogeneidad del material del núcleo, dispersando parte de la energia luminosa hacia la capa de revestimiento,

y la absorsiónque corresponde a la energía que es absorvida por la fibra y la transforma en calor Santa Cruz (2008).

El rango de las longitudes de onda en el cual operan las fibras ópticas esta comprendido entre: 750 nm y 1650 nm. En términos genereales se opera en las ventanas que se realcionan a continuación, cuya definición de uso depende de cómo se puede lograr la mejor transmisión por dicha fibra.

- Primera ventana (850 nm).
- Segunda ventana (1.310 nm).
- Tercera ventana (1.559 nm).

En la Figura 8 se representan las curvas de atenuación y de absorción, de la fibra óptica de vidrio, dependiendo de la longitud de onda a ser empleada en la señal luminosa, a ser transmitida a través dicha fibra.

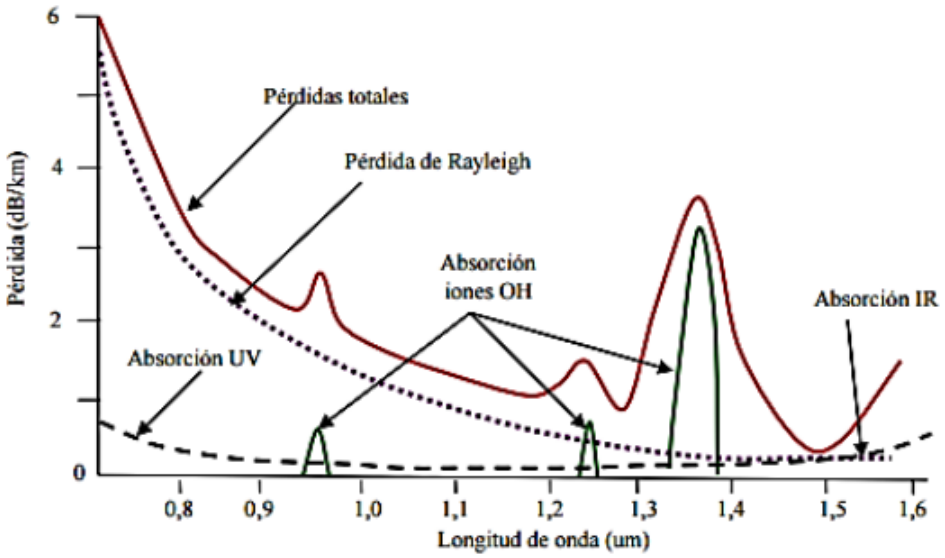
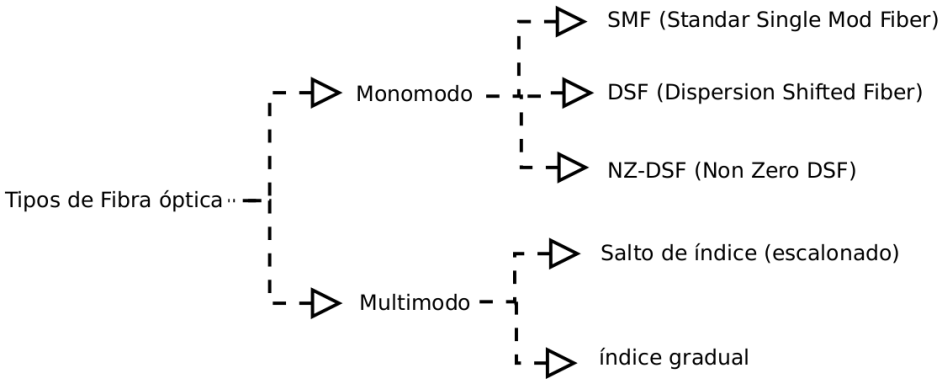


Figura 8: Atenuación y absorción en la fibra óptica dependiendo de la longitud de onda de la señal luminosa Córdoba (2003).

Un vez definido el tipo de fibra óptica a ser empleada para una determinada longitud de onda, si se varia esta longitud, cambia también la cantidad de modos de propogación. A cada modo le corresponde una determinada longitud de onda, más alla del cual ese modo no se puede propagar. El único modo que siempre va existir es el denominado modo fundamentalel cual se presenta en todas los longitudes de onda. Así mismo, una vez definida la longitud de onda de la señal luminosa a ser transmitida, si se varia el grosor del núcleo de la fibra, se varía la cantidad de modos de propagación, de tal forma que si el grosor disminuye el número de modos que se propagan también se disminuye. Unas de las longitudes de onda más empleadas son 1.310 nm y 1.550 nm.

3.5. Tipos de fibra óptica

Dependiendo del criterio de clasificación que se tome como referencia, las fibras ópticas se pueden tipificar de diferentes formas. A continuación, se establece una clasificación dependiendo de la forma como se propaga la luz en dichas fibras, así como según la dispersión que presentan y según el tipo de índice de refracción Bates (2001).



Según forma de propagación

Fibra monomodo: corresponde a aquellas donde el rayo de luz sólo se propaga en un modo, debido esencialmente a que el grosor del núcleo es muy pequeño (menor de 9 micrometros), haciendo que las señales que se propagan por estas fibras alcance mayores distancias y tasas de transmsión más altas, que para el caso de la fibra óptica multimodo. Lo anterior se debe a que este tipo de propagación evita la dispersión modal o de polarización (esta dispersión ocurre cuando las dos componentes ortogonales de polarización, denominados modos de polarización rápido y lento recorren la fibra a diferentes velocidades de grupo y así alcanzarán al receptor en tiempos diferentes).

Fibra multimodo: corresponden a aquellas donde el rayo de luz se propaga en varios modos de manera simultánea, debido esencialmente a que el grosor del núcleo no es tan pequeño (50 micrometros o mayor), presentandose dispersión modal. El grosor de la capa de revestimiento es del orden de los 125 micrometros. En la Figura 9 se ilustra la propagación en diferentes tipos de fibra óptica.

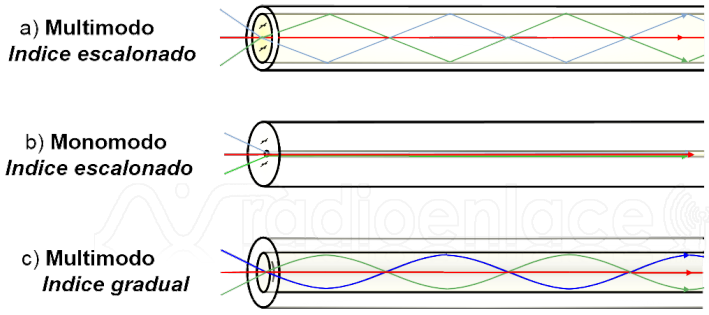


Figura 9: Modos de propagación en la fibra óptica Salleg, Moreno, Vilardy, and Calderón (2006).

Según la dispersión

En las fibras monomodo se presentan tres principales tipos de fibras, dependiendo de la dispersión que se produzca, de la luz, en la fibra. Esta dispersión se debe esencialmente por la forma de su fabricación y el tipo de material conque está conformado el núcleo Mena Salazar and Velasco García (2022).

Fibra monomodo estándar: conocida como SMF (Standar Single ModeFiber), presenta dispersión cromática la cual se expresa en ps/(nm.km), representando el retraso o incremento de tiempo (en ps), para una fuente con una anchura espectral de 1 nm que viaja en 1 kilómetro de la fibra. Estas fibras presentan un valor típico de esta dispersión de unos16 ps/nm.km y una atenuación de 0.2 dB/km, en la tercera ventana. En la segunda ventana la dispersión

prácticamente desaparece, pero la atenuación se incrementa, casi el doble, respecto a la que se presenta en la tercera ventana.

Fibra con dispersión desplazada: conocida como DSF (Dispersion Shifted Fiber), logra anular la dispersión cromática en la tercera ventana, pero aumenta un poco la atenuación (a unos 0.25 dB/km). Esta fibra no es recomendada para sistemas de multiplexación por división de longitud de onda WDM (Wavelength Division Multiplexing), ya que presenta efectos no lineales.

Fibra no cero dispersiones desplazadas: conocida como NZ-DSF (Non Zero Dispersion Shifted Fiber), presenta una dispersión cromática casi nula, pero no cero, lográndose así contrarrestar los efectos no lineales.

En la Figura 10 se muestran las curvas que indican la intensidad de dispersión cromática que originan los tres tipos de fibras ópticas monomodo relacionadas anteriormente, para diferentes longitudes de onda.

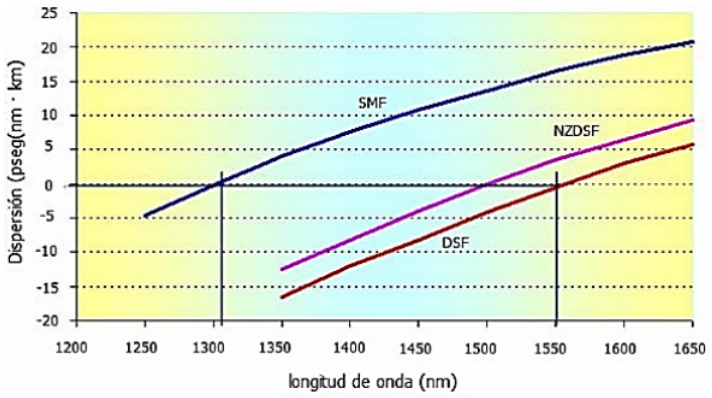


Figura 10: Curvas de la dispersión cromática de las fibras monomodo de SMF/ DSF/NZ-DSF, para diferentes longitudes de onda Savory (2013).

Ejemplo 3

Determinar la intensidad de la dispersión cromática que originan cada uno de los tres tipos de fibras ópticas monomodo: SMF, DSF y NZDF. Para una señal de longitud de onda de 1.550 nm.

Solución

Utilizando las curvas indicadas en la Figura 8:

a) Para SMF: aproximadamente 18 ps/nm.km.

b) Para DSF: aproximadamente 0 ps/nm.km.

c) Para NZDF: aproximadamente 3 ps/nm.km.

Ejemplo 4

Determinar la dispersión total (retrazo o incremento de tiempo) que se presenta en un enlace óptico de 45 km, sí utiliza una fibra con una dispersión cromática de 8.94 ps/nm.km y una fuente óptica de 2.3 nm de anchura espectral.

Solución

$$Dispersion\ total = Dispersion\ cromatica \times anchura\ espectral\ fuente \times km$$

$$Dispersion\,total = 8{,}94(psnm \cdot km) \times 2{,}3(nm) \times 45(km) = 925{,}29(ps)$$

Según el tipo de índice de refracción

En las fibras multimodos se presentan dos principales clases de fibras, dependiendo de su tipo de índice de refracción Serway and Jewett (2018a).

Fibra de índice escalonado: también denominada de salto de índice. En este caso el cambio de índice en la superficie entre el núcleo y la capa de revestimiento es abrupto (cambio vertical). Se debe a que tanto en el núcleo como en la capa de revestimiento sus respectivos índices son uniformes en todo el material de los mismos.

Fibra de índice gradual: en este caso el índice del núcleo varía gradualmente desde el centro hasta su superficie. Para este tipo de fibra se reduce la dispersión modal, debido a que con el cambio del índice de refracción se reduce la diferencia de caminos que recorren los diferentes modos que se propagan por la fibra.

En la Figura 11 se ilustra la sección transversal y perfiles de índice de refracción para los dos tipos de fibras, según el tipo de índice de refracción.

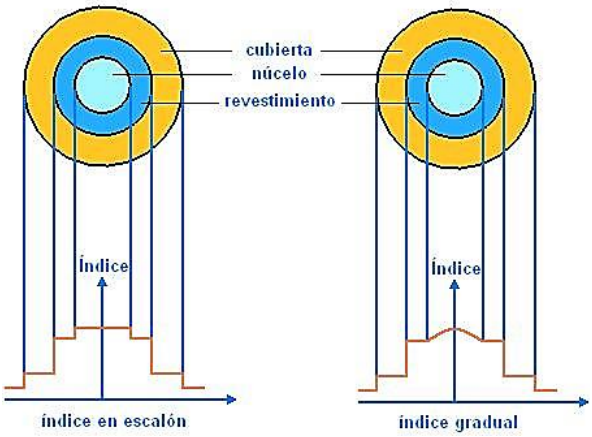


Figura 11: Sección transversal y perfiles de índice de refracción para los dos tipos de fibras, según el tipo de índice de refracción Serway and Jewett (2018b).

En la Figura 12 se muestra un compendio del tipo de perfil y modos de propagación que se presentan en los diferentes tipos de fibra ópticas.

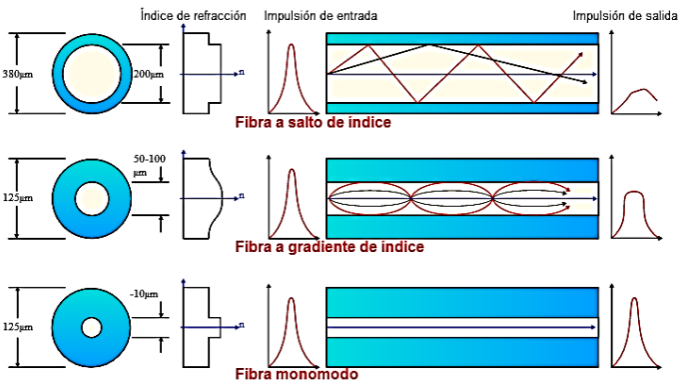


Figura 12: Contraste entre las fibras ópticas Tong (2014).

3.6. Número de modos de una fibra óptica

Como se ha mencionado, el número de trayectorias de propagación de la señal de luz dentro del núcleo de una fibra óptica (número de modos), depende entre otros aspectos, del material del núcleo (vidrio o plástico), de la estructura de la fibra (monomodo o multimodo), del tipo de índice de refracción (escalonado o gradual), de la longitud de onda del haz de luz e incluso del grado de concentración del haz del láser incidente y de su ángulo de incidencia, así como de la coherencia entre el emisor de luz y la misma fibra. Teniendo en cuenta algunos de estos parámetros, se ha desarrollado una fórmula para determinar un estimativo de este número de modos (M) Schultz (1980); Álvarez-Campana, Berrocal Colmenarejo, González Vidal, Pérez Leal, Román Martínez, and Vázquez Gallo (2009). A continuación, se expresa en la ecuación (15).

$$M = 1 + \frac{2d(n_1^2 - n_2^2)^{0,5}}{\lambda} \tag{15}$$

Donde, d es el diámetro del núcleo, n_1 es el índice de refracción del núcleo, n_2 es el índice de refracción del revestimiento y λ es la longitud de onda del haz de luz.

Ejemplo 5

Determinar el diámetro del núcleo de una fibra óptica que se encuentra trabajando con una señal de longitud de onda de 1.55 um, si las constantes de refracción son 1.8 y 1.6 del núcleo y de la capa de revestimiento, respectivamente. Para el caso de que la fibra:

a) Sea monomodo.

b) Sea de dos modos.

Solución

Teniendo en cuenta la ecuación (15):

$$d = \frac{(M-1)\lambda}{(n_1^2 - n_2^2)^{0,5}}$$

a) Monomodo: $M = 1$, entonces diámetro cero (teóricamente infinitamente pequeño).

b) Para dos modos: $M = 2$.

$$d = \frac{(2-1)1{,}550nm}{(1{,}8^2 - 1{,}6^2)^{0,5}} = 1{,}879nm$$

Se podría complementar la presencia de diferentes modos de propagación en la fibra óptica, indicando: que el rayo de luz en fibras ópticas se irradia de manera similar a las señales de radio en una guía de onda, entonces estas señales ópticas se propagan en varios modos específicos. Si el diámetro del núcleo de la fibra es relativamente grande (fibras multimodos), se presentan varios modos de propagación, debido a que el rayo de luz que entrada a la fibra incide en diferentes ángulos, generándose varios modos de propagación. En el caso de las fibras ópticas cuyo núcleo sea suficientemente estrecho (fibras monomodos) se presenta un solo modo de propagación Association *et al.* (2010a).

La propagación multimodo produce dispersión de la señal óptica, generándose esparcimiento en los pulsos y por lo tanto limitando el ancho de banda utilizable de la fibra. Para la propagación monomodo la dispersión es mucho menor, pero debido a que el diámetro del núcleo es pequeño se requiere que su apertura numérica sea también menor, lo que demanda un acople del rayo de luz más crítico, tanto hacia dentro como hacia fuera de la fibra Blumenthal (2002).

3.7. Diámetro máximo permisible del núcleo

Para el caso de la fibra monomodo, el diámetro máximo que puede tener su núcleo depende de la longitud de onda de la luz incidente, para que la señal de luz se pueda propagar en modo monomodo por esa fibra. La ecuación (16) indica como determinar este diámetro Tomasi (2003).

$$d = \frac{(2-1)1{,}550nm}{(1{,}8^2 - 1{,}6^2)^{0{,}5}} = 1{,}879nm \tag{16}$$

Ejemplo 6

Determinar el diámetro máximo que podría tener el núcleo, para una señal óptica de longitud de onda de 1.56 micrómetros, de una fibra con propagación monomodo, con índice de refracción en su núcleo de 1.54 y en su revestimiento de 1.49.

Solución

Aplicando las ecuaciones (14) y (16):

$$NA = sin(\theta_{max}) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{(1{,}54)^2 - (1{,}49)^2} \approx 0{,}3873$$

$$d_{max} = \frac{0{,}766 \cdot \lambda}{NA} = \frac{(0{,}766) \cdot (1{,}56 \times 10^{-6})}{0{,}3873} = 3{,}08\mu m$$

3.8. Ancho de banda de las fibras ópticas

En términos generales corresponde a la capacidad del medio de transmisión para transportar información. En el caso de la fibra óptica se da en valores normalizado a un kilómetro y corresponde a la menor anchura de banda de la fibra óptica que el fabricante recomienda para su operación. El valor más tipo de ancho de banda de las fibras ópticas es el 80 $MHz \times km$. Sin embargo, hay fibras con ancho de banda mayor.

Las pérdidas de una fibra óptica son inversamente proporcionales a su ancho de banda. De tal manera que a mayor ancho de banda las pérdidas serán menores. El ancho de banda de la fibra óptica monomodo es mayor que el de multimodo.

Para el caso de fibra monomodo su ancho de banda está limitado por el ancho de banda modal y el por el ancho de banda cromática. En la ecuación (17) se relaciona la expresión para calcular el ancho de banda de una fibra monomodo Agrawal (2012).

$$B_{total} = \frac{1}{B_{modal}^2} + \frac{1}{B_{cromatica}^2} \tag{17}$$

Para el caso de fibra multimodo su ancho de banda está limitado por la dispersión total de los pulsos en la fibra o sea por ensanchamiento del pulso. Si la dispersión es grande, los pulsos adyacentes se interpolan entre sí, produciéndose interferencias entre los símbolos, lo cual es un factor limitante para la capacidad de transmisión de la fibra.

A mayor tasa de transmisión binaria, se reduce el periodo de la señal de pulsos y por lo tanto se incrementa el efecto de la dispersión. Como solo se requiere transmitir el componente fundamental del pulso que corresponde a la onda cuadrada, para el caso de transmisión de pulsos (señal digital), entonces el ancho de banda B de la fibra es igual al inverso del periodo T de la señal de pulsos (ver ecuación (18)).

$$B = \frac{1}{T} \tag{18}$$

Para el caso más crítico, que corresponde cuando se presenta la máxima velocidad de transmisión de pulsos, se tiene que la dispersión total Δt (retardo del pulso) es igual a la mitad del periodo T (ver Figura 13 y ecuación (19))).

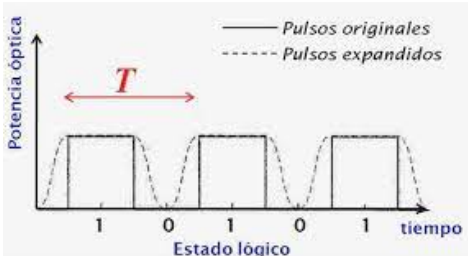


Figura 13: Pulsos originales y pulsos expandidos Coimbra (2017).

$$\Delta t = \frac{T}{2} \tag{19}$$

Si se despeja el periodo T de la ecuación (18) y se remplaza en la ecuación (19), se tiene que el ancho de banda de la fibra está dado por la ecuación (20).

$$B = \frac{1}{2\Delta t} \tag{20}$$

Según Nyquist, la máxima capacidad de transmisión C nominal para un canal de fibra óptica, para señales digitales, está dado por el doble de su ancho de banda (ver ecuación (21))

$$C = 2B \tag{21}$$

Generalmente, para las fibras ópticas, el ancho de banda se indica por kilómetro ($MHz \times kilometro$). En la Tabla 2 se relaciona algunos valores de este ancho de banda para diferentes características estructurales y de operación de las fibras ópticas Ingenia-T (2020).

Diámetro del Núcleo um	Recubrimiento um	NA	Atenuación dB/km 850nm	Ancho de banda Mhz-Km
1000	**1250**	**0.20**	**10**	**20**
800	**1000**	**0.20**	**10**	**20**
600	**750**	**0.20**	**10**	**20**
600	**620**	**0.37**	**6**	**9**
400	**500**	**0.20**	**10**	**20**
200	**240**	**0.26**	**10**	**20**
200	**230**	**0.37**	**6**	**17**
125	**200**	**0.29**	**5**	**20**
100	**150**	**0.20**	**5**	**25**
100	**150**	**0.20**	**5**	**25**
100	**140**	**0.29**	**5**	**20**

Tabla 2: Anchos de banda ($MHz \times Kilometro$) para diferentes características estructurales y de operación de las fibras ópticas Ingenia-T (2020).

Ejemplo 7

En un enlace óptico de 5 km de trayecto, se transmite una aplicación digital con velocidad de 622 Mbps, determinar el ancho de banda óptico por kilómetro requerido mínimo de la fibra.

Solución

Utilizando la ecuación (21):

$$B = \frac{C}{2} = \frac{622\ Mbps}{2} = 311 MHz$$

$$B(MHz \cdot Km) = 311 \times 4 = 1{,}244\ MHz \times Km$$

Ejemplo 8

Calcular la capacidad (velocidad) máxima de transmisión binaria que puede soportar un enlace óptico de 48 km de trayectoria, sí el ancho de banda máximo de la fibra es de 25.69 GHz.km.

Solución

Aplicando la ecuación (21) para ancho de banda en: $MHz \times Kilmetro$:

$$C = 2B(MHz \cdot Km)/Km$$

$$C = 2 \times 25{,}69(GHz \cdot Km)/48(Km) = 1{,}07 Gbps$$

Como se puede apreciar del ejemplo anterior, la capacidad máxima de transmisión que puede soportar un enlace óptico es inversamente proporcional a la distancia del trayecto del enlace.

En la Tabla 3 se relacionan los valores típicos de atenuación y de ancho de banda, de las fibras ópticas de acuerdo con el tipo de núcleo y revestimiento de estas Association *et al.* (2010b).

Núcleo/revestimiento	Atenuación	Ancho de banda	Aplicaciones/Notas
Multimodo de índice gradual	**@850/1300 nm**	**@850/1300 nm**	
50/125 micrones (OM2)	3/1 dB/km	500/500 MHz-km	Para láser para redes LAN GbE
50/125 micrones (OM3)	3/1 dB/km	2000/500 MHz-km	Optimizada para VCSEL de 850 nm
50/125 micrones (OM4)	3/1 dB/km	4700/500 MHz-km	Optimizada para VCSEL de 850 nm>10Gb/s
62.5/125 micrones (OM1)	3/1 dB/km	160-200/500 MHz-km	Fibra para red LAN (FDDI)
100/140 micrones	3/1 dB/km	150/300 MHz-km	Obsoleto
Monomodo	**@1310/1550 nm**	**@1310/1550 nm**	
9/125 micrones (OS1, B1.1, o G.652)	0.4/0.25 dB/km	∼100 Terahertz	Fibra estándar monomodo, telecomunicaciones /TV por cable, redes LAN de larga distancia y alta velocidad
9/125 micrones (OS2, B1.3, o G.652)	0.4/0.25 dB/km	∼100 Terahertz	Fibra de ”pico de agua reducido”(LWP)
9/125 micrones (B2, o G.653)	0.4/0.25 dB/km	∼100 Terahertz	Fibra con dispersión desplazada (DSF)

Núcleo/revestimiento	Atenuación	Ancho de banda	Aplicaciones/Notas
9/125 micrones (B1.2, o G.654)	0.4/0.25 dB/km	∼100 Terahertz	Fibra con corte desplazado (CSF)
9/125 micrones (B4, o G.654)	0.4/0.25 dB/km	∼100 Terahertz	Fibra con dispersión desplazada no nula (NZ-DSF)
Multimodo de índice escalonado	**@850 nm**	**@850 nm**	
200/240 micrones	4-6 dB/km	50 MHz-km	Núcleo de vidrio con revestimiento (cladding) de plástico
Redes LAN y enlaces de baja velocidad			
Fibra óptica de plástico (POF)	**@ 650 nm**	**@ 650 nm**	
1 mm	∼1 dB/m	∼5 MHz-km	Enlaces de corta distancia y de baja velocidad & vehículos

Tabla 3: Atenuación y ancho de banda de las fibras ópticas de acuerdo al tipo de núcleo y revestimiento de las mismas.

3.9. Características dimensionales y funcionales de la fibra óptica

Con el propósito de referencia general, en la Tabla 4 se relacionan las principales características dimensionales y de funcionamiento de las fibras ópticas. Para el caso de un tipo de fibra óptica especifico, se debe acudir al manual respectivo para conocer las características correspondientes de dicha fibra Association *et al.* (2010b).

Tipo de Fibra	Diámetro del núcleo (um)	Diámetro revestimiento (um)	Atenuación dB/Km @nm	Dis. Cromática (nm)	Ancho banda MHz-Km	Apertura Numerica
Mono modo	9.2\pm 0.4	125\pm 0.7	0.36@1300 0.25@1550	1310	—	0.14
Multi modo (50nm)	50\pm 3	125\pm 2	2.5@850 0.8@1300	1310	500	0.2\pm 0.015
Multi modo (62.5um)	62.5\pm 3	125\pm 2	3.0@850 0.7@1300	1340	200@850 500@1500	0.275\pm 0.015

Tabla 4: Características dimensionales y funcionales generales de la fibra óptica.

4. Resultados

El resultado propio de este trabajo se concreta como el haber logrado poder relacionar y describir las características estructurales y funcionales básicas de la fibra óptica y de algunos de sus principales aspectos, dentro de un marco práctico y académico.

Se espera que los resultados correspondientes al propósito de este trabajo, el cual se orienta a que sirva de apoyo a la fundamentación del conocimiento estructural funcional y aplicativo de las fibras ópticas, motive el interés de su difusión y aprovechamiento.

5. Conclusiones

Se espera haber logrado describir, de manera académica, los aspectos fundamentales de la estructura y funcionamiento de la fibra óptica, cuya difusión y conocimiento podrían ser de interés para el logro de su aprovechamiento.

La difusión de las características estructurales y funcionales de la fibra óptica, podrían reforzar los procesos de la formación profesional afines a esta temática.

El conocimiento del desarrollo y funcionamiento de la fibra óptica, pueden contribuir a motivar el interés de la investigación, aplicación e innovación de estas.

Referencias

Agrawal GP (2012). *Fiber-optic communication systems*. John Wiley & Sons.

Alvarez A, Torres P (2017). *Manual de Física Moderna*. Trillas.

Álvarez-Campana M, Berrocal Colmenarejo J, González Vidal F, Pérez Leal R, Román Martínez I, Vázquez Gallo E (2009). "Broadband technologies and Network convergence [Tecnologías de Banda Ancha y Convergencia de Redes]. Ministerio de Industria, Comercio y Turismo (Spain). Retrieved on July 2, 2016."

Association FO, *et al.* (2010a). "Guide to Fiber Optics & Premises Cabling." *Retrieved September*, **21**, 2015.

Association FO, *et al.* (2010b). "Guide to Fiber Optics & Premises Cabling." *Retrieved September*, **21**, 2015.

Bates RJ (2001). *Optical switching and networking handbook*. McGraw-Hill Professional.

Bauer W, Westfall G (2013a). *University physics with modern physics*. McGraw-Hill Higher Education.

Bauer W, Westfall G (2013b). *University physics with modern physics*. McGraw-Hill Higher Education.

Blumenthal DJ (2002). "All-optical label swapping for the future Internet." *Optics and Photonics News*, **13**(3), 22–25.

Coimbra E (2017). "Transmisión de datos por fibra óptica." URL https://hugepdf.com/download/download-ancho-de-banda-optico_pdf.

Córdoba M (2003). *Procesos de fabricación de fibras ópticas*. Ph.D. thesis, Universidad de Belgrano. Facultad de Ingeniería y Tecnología Informática . URL http://repositorio.ub.edu.ar/bitstream/handle/123456789/303/34_cordoba.pdf?sequence=2.

DeCusatis C (2013). *Handbook of fiber optic data communication: a practical guide to optical networking*. Academic Press.

Fernández J (2022). "Principio de Huygens." URL https://www.fisicalab.com/apartado/principio-huygens#contenidos.

Franco-García A (2006). "La ley de Snell de la refracción." URL https://www.fisicalab.com/apartado/principio-huygens#contenidos.

Ingenia-T (2020). "Tipos de fibra óptica Las fibras multimodos." URL https://lafibraopticaperu.com/tipos-de-fibra-optica-las-fibras-multimodos/.

Mena Salazar GP, Velasco García JC (2022). *Diseño de infraestructura de red y simulación GPON FTTH para la migración de WIMAX a fibra óptica en la cooperativa 28 de agosto del cantón Durán*. Ph.D. thesis, Universidad de Guayaquil. Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas .

Okonkwo C, Tangdiongga E, Yang H, Visani D, Loquai S, Kruglov R, Charbonnier B, Ouzzif M, Greiss I, Ziemann O, *et al.* (2011). "Recent results from the EU POF-PLUS project: Multi-gigabit transmission over 1 mm core diameter plastic optical fibers." *Journal of lightwave technology*, **29**(2), 186–193.

Olaf Z, Jürgen K, Peter EZ, Werner D (2008). "POF HandbooN: Optical Short Range Transmission Systems."

Salleg JA, Moreno CT, Vilardy JM, Calderón JE (2006). "Modos de propagación en una fibra óptica de índice de perfil escalonado." *Revista de la Sociedad Colombiana de Física*, **38**(1), 277–280.

Santa Cruz O (2008). "Principios generales del sistema de fibra óptica." *España, Año*.

Savory SJ (2013). "Digital signal processing for coherent optical communication systems." In *OptoElectronics and Communications Conference and Photonics in Switching*, p. TuR3_1. Optica Publishing Group.

Schultz PC (1980). "Fabrication of optical waveguides by the outside vapor deposition process." *Proceedings of the IEEE*, **68**(10), 1187–1190.

Sears FW, Zemansky MW, Young HD, Freedman RA (2013). *Física Universitaria: Volumen 1*. Pearson Educación de México, SA de CV.

Seo K, Nishimura N, Shiino M, Yuguchi R, Sasaki H (2003). "Evaluation of high-power endurance in optical fiber links." *Furukawa Review*, **24**(24), 17–22.

Serway RA, Jewett JW (2018a). *Physics for scientists and engineers*. Cengage learning.

Serway RA, Jewett JW (2018b). *Physics for scientists and engineers*. Cengage learning.

Tomasi W (2003). *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. Pearson educación.

Tong XC (2014). *Optical Fibers*, pp. 161–211. Springer International Publishing, Cham. ISBN 978-3-319-01550-7. doi:10.1007/978-3-319-01550-7_4. URL https://doi.org/10.1007/978-3-319-01550-7_4.

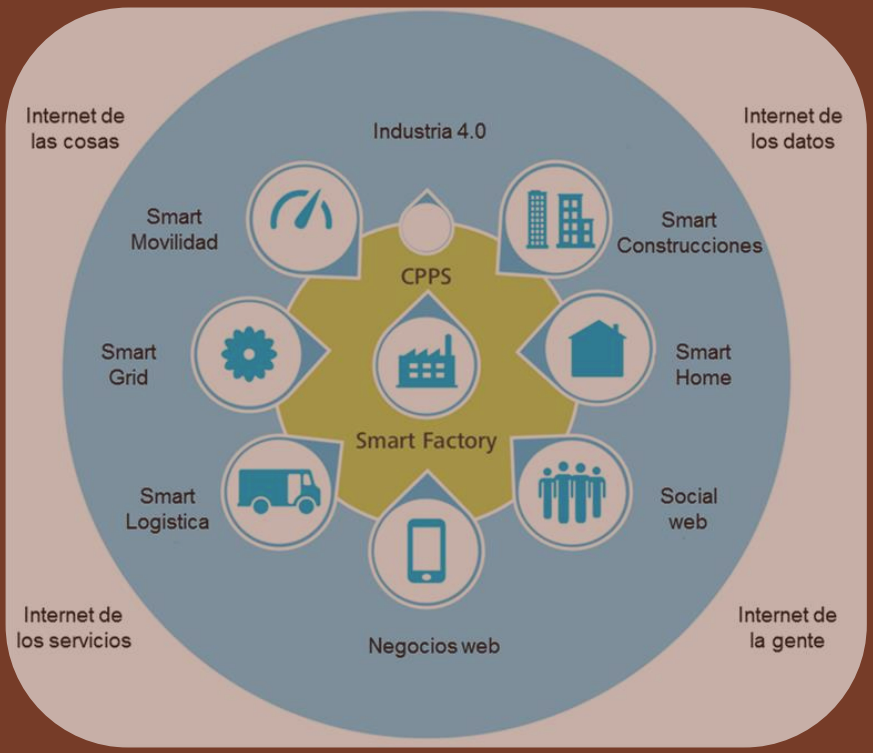
Wang K, Amin K, An Z, Cai Z, Chen H, Chen H, Dong Y, Feng X, Fu W, Gu J, *et al.* (2020). "Advanced functional polymer materials." *Materials Chemistry Frontiers*, **4**(7), 1803–1915.

Filiación institucional:

Jaime Ramírez Artunduaga
Fundación Universitaria
Los Libertadores
Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Ingeniería Electrónica
Carrera 16 # 63A - 68, Bogotá, D.C., Colombia
E-mail: jramireza@libertadores.edu.co

Revista Ciber-Sistemas https://repository.libertadores.edu.co/handle/11371/23
© Fundación Universitaria Los Libertadores https://www.ulibertadores.edu.co/
Volume 2 *Recibido por el editor:* 2022-15-10
Agosto 2022 *Aceptado por el comité editorial:* 2022-07-18

Revista Ciber-Sistemas



La Revista Ciber-Sistemas, es una publicación en formato electrónico que tiene el propósito de contribuir a la difusión de los profesionales de la Ingeniería. Se concibe como medio de presentación de artículos científico-técnicos. La revista publica resultados de investigación, tutoriales, casos de uso y notas de tendencias tecnológicas, en temáticas propias de la ingeniería.

Los Ciber-Sistemas integran sistemas ciber-físicos como mecanismos de control y monitoreo, en donde la algoritmia se estrecha con la computación y el internet (Internet de las Cosas) operando en diferentes escalas espaciales y temporales. Los Ciber-Sistemas presentan un enfoque multidisciplinario, que fusiona la teoría de la cibernética, con la mecatrónica, la ciencia de diseño y sistemas en procesos industriales. El control local, centralizado y distribuido de los procesos es derivado a sistemas embebidos, por sus elementos computacionales y físicos. La revista agradece cualquier aporte que se quiera realizar en estas áreas o en áreas propias de la ingeniería.

LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA
www.ulibertadores.edu.co