



Facultad
de Informática
y Electrónica



REVISTA PERSPECTIVAS

REVISTA TÉCNICA CIENTÍFICA DE LA FIE



ESCUELA SUPERIOR
POLITÉCNICA
DE CHIMBORAZO

▾ JULIO - DICIEMBRE 2023

e-ISSN: 2661-6688

VOL 5, N°2



REVISTA PERSPECTIVAS

La Revista Técnico - Científica de la FIE.

▀ **JULIO - DICIEMBRE 2023**

e - ISSN: 2661 - 6688

VOL 5, N°2

RIOBAMBA - ECUADOR



epoch
**HACEMOS
HISTORIA**



epoch

Facultad de
Informática y
Electrónica

Instituto de
Investigaciones

Dirección de
Publicaciones



REVISTA PERSPECTIVAS

PRÓXIMA
CONVOCATORIA

ENERO - JUNIO 2024

<http://perspectivas.esPOCH.edu.ec/>

CONVOCATORIA DE RECEPCIÓN DE MANUSCRITOS

PERIODICIDAD SEMESTRAL

PRIMERA CONVOCATORIA

RECEPCIÓN ABIERTA HASTA OCTUBRE 2023

Publicación: Enero 2024

SEGUNDA CONVOCATORIA

RECEPCIÓN ABIERTA HASTA ABRIL 2024

Publicación: Julio 2024



esPOCH
**HACEMOS
HISTORIA**



esPOCH Facultad de
Informática y
Electrónica



COMITÉ EDITORIAL

- **DIRECTOR**

Omar S. Gómez, Ph.D.

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Ecuador)

- **EDITOR EJECUTIVO**

Raúl H. Rosero, Ph.D.

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Ecuador)

- **EDITORES ASOCIADOS**

Raúl Antonio Aguilar Vera, Ph.D.

Universidad Autónoma de Yucatán (México)

Jesús Pardo Calvache, Ph.D.

Universidad del Cauca (Colombia)

Rosa Sumactika Delgadillo Avila de Mauricio, Ph.D.

Universidad Nacional Mayor de San Marcos (Perú)

George Enrique Figueras Benítez, Ph.D.

Universidad Simón Bolívar (Venezuela)

Luis Antonio Rivera Escriba, Ph.D.

Universidade Estadual do Norte Fluminense (Brasil)

Talia Beatriz Tene Fernandez, Ph.D.

Universidad Técnica Particular de Loja (Ecuador)

- **SECRETARIO CIENTÍFICO**

Mayra A. Pacheco Cunduri, M.Sc.

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Ecuador)

- **COORDINACIÓN PROCESO PUBLICACIÓN**

Diego Avila Pesántez, M.Sc.

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Ecuador)

- **REVISORES DE IDIOMA INGLÉS**

Nelly Padilla Padilla, M.Sc.

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Ecuador)

- **DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN**

Lcdo. José Luis Heredia Hermida Mgtr.

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Ecuador)



COMITÉ CIENTÍFICO

Lorena Molina Valdiviezo, Ph.D.
Universidad Nacional de Chimborazo (Ecuador)

Eliana Acurio Méndez, Ph.D.
Escuela Politécnica Nacional (Ecuador)

Miguel Delgado Prieto, Ph.D.
Universidad Politécnica de Cataluña (Ecuador)

Luis Miguel Procel Moya, Ph.D.
Universidad San Francisco de Quito (Ecuador)

Luis Tello Oquendo, Ph.D.
Universidad Nacional de Chimborazo (Ecuador)

Cristian Vacacela Gómez, Ph.D.
Universidad Yachay Tech (Ecuador)

Ciro Radicelli García, Ph.D.
Universidad Nacional de Chimborazo (Ecuador)

Lorena Guachi Guachi Núñez, Ph.D.
Universidad Yachay Tech (Ecuador)

Patricio Humanante Ramos, Ph.D.
Universidad Nacional de Chimborazo (Ecuador)

Edison Taco Lasso, Ph.D.
Universidad San Francisco de Quito (Ecuador)

Edison Espinosa, Ph.D.
Filiación: Universidad de las Fuerzas Armadas (Ecuador)

Maricela Jiménez Rodríguez, Ph.D.
Filiación: Universidad de Guadalajara (México)

Juan Carlos Estrada, Ph.D.
Filiación: Universidad de Guadalajara (México)



CONTENIDO

- 1 - 14 ANÁLISIS DE VULNERABILIDADES Y PRUEBAS DE ESTRÉS EN EL SISTEMA ACADÉMICO DE LA ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO: UNA EVALUACIÓN INTEGRAL
-
- 15 - 24 PROPAGATION MODELS APPLIED IN OPEN AREAS UNDER LTE TECHNOLOGIES AND FITTING WITH MEASUREMENTS
-
- 25 - 38 GAMIFICACIÓN PARA LA INNOVACIÓN DE LA EDUCACIÓN: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA LITERATURA
-
- 39 - 48 ANÁLISIS DE PROPAGACIÓN DE LAS COMUNICACIONES ÓPTICAS SUBACUÁTICAS
-
- 49 - 56 3D INDOOR PROPAGATION SIMULATOR USING RAY TRACING FOR 10-20 GHZ FREQUENCY BAND ON GPU WITH NVIDIA-OPTIX UNDER UNITY GRAPHIC ENGINE
-



PRESENTACIÓN

Apreciables lectores,

En este año que inicia, hacemos de su conocimiento la publicación del número 2 del volumen 5 de la revista Perspectivas. En este número se encuentran disponibles publicaciones afines a las áreas de informática, electrónica, telecomunicaciones y diseño. Sabemos que los contenidos ofrecidos en este número serán de interés para nuestra comunidad de lectores.

Reiteramos nuestro agradecimiento a todos aquellos quienes han hecho posible mantener la continuidad de esta revista, a nuestros autores por

sus contribuciones y por confiar en este medio de divulgación técnico-científica, a nuestro equipo de revisores que dedican parte de su tiempo en el proceso de revisión con el fin de contar con publicaciones de mayor calidad. Agradecemos también al equipo editorial así como a nuestras autoridades institucionales.

Recordamos a nuestra comunidad que continua abierta la recepción de manuscritos, los cuales tras su correspondiente proceso de revisión y aceptación se publicarán en los números correspondientes de este año.

**Cordialmente,
EQUIPO EDITORIAL**

Saber para Ser !

ANÁLISIS DE VULNERABILIDADES Y PRUEBAS DE ESTRÉS EN EL SISTEMA ACADÉMICO DE LA ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO: UNA EVALUACIÓN INTEGRAL

Vulnerability Analysis and Stress Testing in the Academic System of the Escuela Superior Politécnica de Chimborazo: A Comprehensive Evaluation

Astudillo Muñoz Erika Michelle ¹	erika.mastudillo@gmail.com
Vizuite Ulloa Andrea Elizabeth ²	eli.vizuite@gmail.com
Diego Avila-Pesantez ³	davila@esPOCH.edu.ec
Danilo Pástor Ramírez ⁴	dpastor@esPOCH.edu.ec

^{1,2} Investigador independiente,

³ Grupo de Investigación en Innovación Científica y Tecnológica. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo,

⁴ Facultad de Informática y Electrónica. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Facultad de Informática y Electrónica

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Riobamba – Ecuador

RESUMEN

En la era digital, es importante asegurar la seguridad y el óptimo rendimiento de las aplicaciones web, para proteger la información confidencial que se maneja. Con el aumento constante de las amenazas informáticas y los ataques cibernéticos, las organizaciones deben tomar medidas proactivas para evitar posibles violaciones de seguridad y pérdidas de datos. Además, un bajo rendimiento de las aplicaciones web puede tener un impacto negativo en la experiencia del usuario y en la eficiencia de los procesos empresariales. Con este antecedente, se llevó a cabo un análisis exhaustivo de las vulnerabilidades del sistema académico de la ESPOCH, siguiendo las etapas propuestas por la metodología OWASP y utilizando la herramienta OWASP ZAP. Además, se realizaron pruebas de estrés en el dicho aplicativo para comprobar si puede manejar la cantidad de solicitudes esperadas, mediante diversos cálculos. Como resultado de este análisis, se identificaron 15 debilidades en el sistema académico y se proporcionó las mejores prácticas para su mitigación, con resultados favorables. Finalmente, se determinó que el sistema académico está preparado para atender a una gran cantidad de peticiones de usuarios

durante un período de cinco años y garantizar la disponibilidad de los servicios en momentos críticos.

Palabras Clave: Análisis de Vulnerabilidades, Metodología OWASP, Pruebas de Estrés, Sistema Académico de la ESPOCH.

ABSTRACT

In the digital age, it is important to ensure the security and optimal performance of web applications to protect sensitive information. With the constant increase in cyber threats and attacks, organizations must take proactive measures to prevent potential security breaches and data loss. Additionally, poor performance of web applications can have a negative impact on user experience and the efficiency of business processes. With this background, a comprehensive analysis of vulnerabilities in the academic system of ESPOCH was conducted, following the stages proposed by the OWASP methodology and using the OWASP ZAP tool. Stress tests were also performed on the mentioned application to

verify if it can handle the expected number of requests through various calculations. As a result of this analysis, 15 weaknesses were identified in the academic system, and best practices were provided for their mitigation, yielding favorable results. Finally, it was determined that the academic system is prepared to handle many user requests over a period of five years and ensure the availability of services during critical moments.

Keywords: Vulnerability Analysis, OWASP Methodology, Stress Tests, ESPOCH Academic System.

► I. Introducción

En la actualidad, las aplicaciones web se han convertido en una herramienta imprescindible para las empresas y organizaciones de todo el mundo, dado que ofrecen a los usuarios la posibilidad de acceder a servicios y realizar tareas de forma rápida y eficiente desde cualquier ubicación. Sin embargo, a medida que aumenta la popularidad de estas aplicaciones, también aumentan los riesgos de seguridad. Las vulnerabilidades presentes en las aplicaciones web pueden ser explotadas por los atacantes para obtener información confidencial tanto de las empresas como de los usuarios involucrados [1]. Para abordar estos riesgos, es fundamental llevar a cabo un análisis de vulnerabilidades en las aplicaciones web, para implementar medidas preventivas que protejan la integridad de los datos y la privacidad de los usuarios [2]. Este artículo se enfoca en resaltar la importancia del análisis de vulnerabilidades en las aplicaciones web utilizando la metodología OWASP, la cual es ampliamente reconocida y utilizada en todo el mundo con el enfoque de prevenir y mantener la seguridad en las aplicaciones [3].

Por consiguiente, se propone aplicar esta metodología para realizar un estudio de vulnerabilidades en el sistema académico desarrollado por la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), con la finalidad de recomendar mejores prácticas de seguridad efectivas para reducir los riesgos de seguridad en el sistema académico. De la misma manera, es crucial realizar pruebas de estrés al sistema académico para evaluar su capacidad de respuesta ante grandes cargas de trabajo. Estas pruebas permiten determinar si el sistema puede mantener

un rendimiento óptimo y una disponibilidad adecuada bajo condiciones de alta exigencia [4]. Durante la ejecución de las pruebas de estrés, se simuló múltiples usuarios conectados en un tiempo estimado durante el periodo de matrículas, con la finalidad de observar si el sistema académico soportaba una gran cantidad de peticiones al mismo tiempo.

Cabe destacar que es crucial garantizar la seguridad y el buen rendimiento en las aplicaciones web para evitar posibles fallas y asegurar la satisfacción de los usuarios. En el presente artículo se proponen mejores prácticas con el objetivo de prevenir y mitigar los fallos y debilidades encontrados en el sistema académico de la ESPOCH. Asimismo, se detalla la gran cantidad de solicitudes hechas por parte de los usuarios simulados durante el periodo de matrículas, con la finalidad de conocer si el sistema ha sido capaz de soportar el gran número de peticiones o si ha presentado errores durante las pruebas de estrés realizadas.

Este trabajo tiene un enfoque descriptivo, porque proporciona una descripción detallada de las etapas requeridas para llevar a cabo el análisis de vulnerabilidades en el sistema académico de la ESPOCH utilizando la metodología OWASP. De igual manera, para diseñar y ejecutar las pruebas de estrés se detalla el procedimiento a seguir.

El artículo sigue la siguiente estructura: primero, se realiza una revisión de los trabajos anteriores relacionados con el tema. Luego, en la sección 3, se lleva a cabo un análisis de vulnerabilidades aplicando la metodología OWASP, que proporciona una guía detallada para llevar a cabo dicho análisis en aplicaciones web. La sección 4 describe las pruebas de estrés y las diferentes fases involucradas en su ejecución. A continuación, en la sección 5, se presentan los resultados obtenidos, así como una propuesta de mejores prácticas para el análisis de vulnerabilidades y las pruebas de estrés realizadas en tres niveles. Finalmente, se presentan las conclusiones del estudio.

► II. Trabajos similares

Se han realizado algunos estudios de vulnerabilidades en los sistemas académicos universidades del Ecuador y Argentina. Por ejemplo, en el sistema de matriculación de la unidad académica de ciencias empresariales de la UTMACH, se realizó un análisis de

vulnerabilidades, amenazas y riesgos al que tiene como finalidad mitigar las vulnerabilidades encontradas a través de una metodología descriptiva mediante un análisis comparativo, donde se destaca la falta de un plan integral que involucre a todas las dependencias y la insuficiencia de aplicación directa de metodologías de riesgo, por lo que es necesario renovar equipos, actualizarlos implementando controles diarios y tomar medidas para minimizar errores humanos, por lo cual se sugiere mejorar la usabilidad y funcionalidad mediante módulos adicionales, ya que el nivel de riesgo es bajo debido al control constante y la ausencia de incidentes [5]. Otro estudio realizado es un análisis de vulnerabilidades de sistema web en desarrollo y en producción, en el laboratorio de sistemas perteneciente a la Universidad Tecnológica Nacional en Argentina; para detectar las vulnerabilidades a través de pruebas de penetración en sistemas en desarrollo y en sistemas de producción, es importante tener en cuenta que obtener datos confiables para este tipo de pruebas depende de acuerdo de confidencialidad y confianza con los propietarios de los sistemas, los resultados obtenidos marcan el comienzo de un camino para establecer las bases de un sistema automatizado de pruebas de penetración. Además, se identificaron los desafíos en los términos de tiempo requerido para realizar estas acciones donde se enfatiza la necesidad de incorporar requisitos de seguridad desde la planificación de nuevos proyectos de desarrollo de software, así como gestionar múltiples pruebas de penetración en sistemas web en producción utilizando metodologías abiertas para identificar y analizar vulnerabilidades en el sistema, para que sea accesible y práctico para los expertos en seguridad [6].

En el trabajo de Jiang y Hassan realizaron pruebas de estrés en el sistema académico, con el objetivo de evaluar su capacidad de respuesta ante una carga de trabajo elevada. Se simularon situaciones de alta demanda, como la inscripción de estudiantes en línea, la consulta de notas y la generación de certificados, entre otras. Los resultados de la prueba de estrés permitieron identificar cuellos de botella y limitaciones en el sistema, que fueron corregidas para mejorar su capacidad de respuesta y garantizar la disponibilidad de los servicios en momentos críticos [6].

► III. Análisis de vulnerabilidades aplicando la metodología OWASP

Para llevar a cabo el análisis de vulnerabilidades en el sistema académico ESPOCH, se siguieron las etapas definidas en la metodología OWASP, las cuales se describen a continuación.

A. Fase 1: Recopilación de información y diseño de escenario

Se realizó un análisis de la estructura de la aplicación, la infraestructura y la arquitectura del sistema académico de la ESPOCH. A continuación se presenta la arquitectura del sistema académico (ver Fig: 1):

- *Frontend:* Para la arquitectura del sistema académico se utiliza el patrón Single Page-Application (SPA), el cual consiste en mostrar una sola página web que carga el contenido dependiendo de los datos recibidos del backend a través de JavaScript y para el diseño la página se utiliza el Framework Angular [7], [8].
- *Backend:* Para la lógica de la aplicación, se utiliza la arquitectura de microservicios, porque permite dividir al sistema académico en varios servicios para cada una de las funcionalidades del sistema; por ejemplo: matrículas, notas, datos personales, entre otros servicios. Las bases de datos de la aplicación son relacionales, trabajando con SQL Server como gestor principal y PostgreSQL para otros servicios. Cabe recalcar que, cada servicio cuenta con su base de datos [7].
- *Infraestructura:* El sistema académico cuenta con recursos para cada uno de los servicios brindados por el sistema académico, los cuales se encuentran distribuidos de la siguiente manera:
 - A nivel de interfaz de usuario, el sistema académico trabaja con 3 nodos, cada uno con 8 procesadores y 12 GB en memoria RAM.
 - Para el backend, el sistema académico trabaja con 3 nodos para cada uno de los servicios web programados en Ubuntu Server; a su vez, cada nodo cuenta con 8 procesadores y 14 GB en memoria RAM.

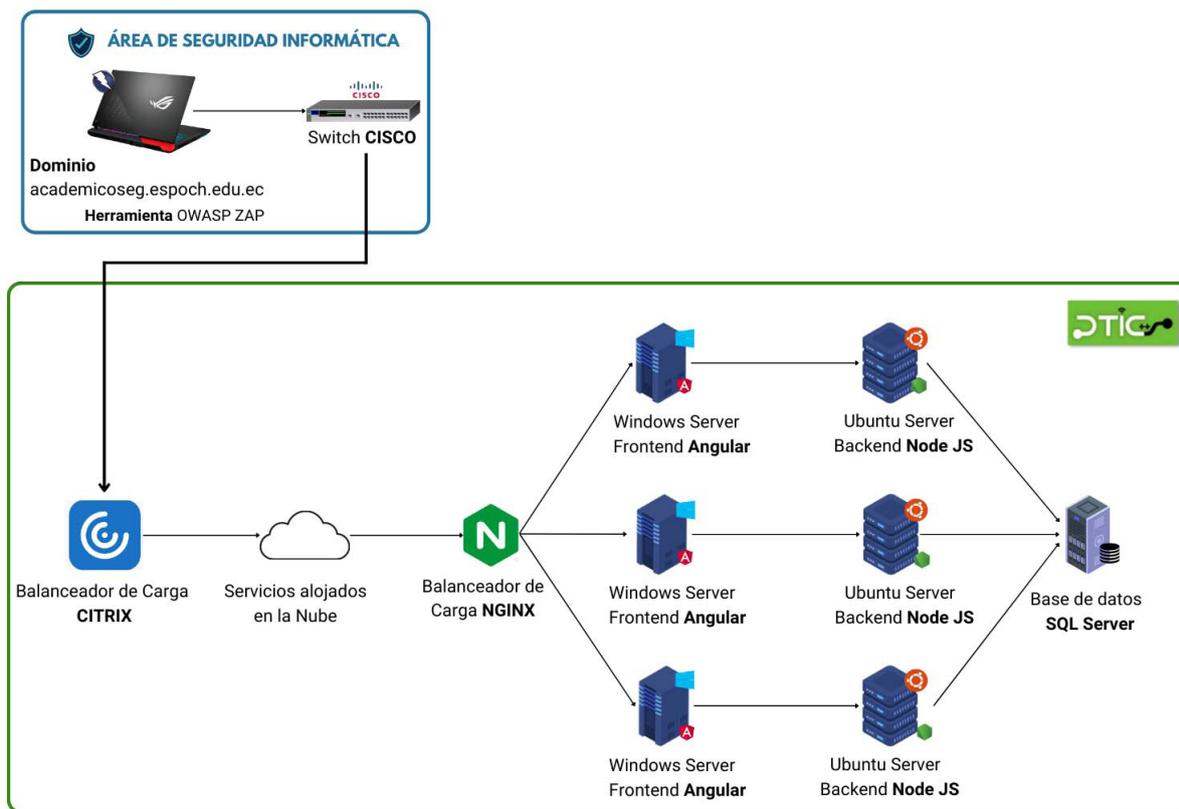


Fig. 1. Escenario de ejecución de análisis de vulnerabilidades.

B. Fase 2: Análisis y clasificación de vulnerabilidades

En esta fase se llevó a cabo el escaneo de vulnerabilidades en el sistema académico de la ESPOCH utilizando la herramienta OWASP ZAP

(OWASP Zen Attack Proxy). Durante el análisis, se identificaron un total de 15 vulnerabilidades, las cuales fueron calificadas como de riesgo medio y bajo (ver Fig: 2):

Id	Petición (Tiempo)	Marca de tiempo Respuesta	Método	URL	Código	Razón	RTT	Tamaño de la Cabecera de Respuesta	Respuesta (Tamaño del cuerpo)
744	9/1/23 22:39:15	9/1/23 22:39:15	GET	https://logins.esPOCH.edu.ec/assets/0/c2/modules/...	301	Moved Permanently	38milisegundos	424bytes	217bytes
745	9/1/23 22:39:15	9/1/23 22:39:15	GET	https://logins.esPOCH.edu.ec/assets/0/c2/modules/...	301	Moved Permanently	16milisegundos	409bytes	202bytes
746	9/1/23 22:39:15	9/1/23 22:39:15	GET	https://logins.esPOCH.edu.ec/assets/0/c2/modules/...	301	Moved Permanently	31milisegundos	412bytes	205bytes
747	9/1/23 22:39:15	9/1/23 22:39:15	GET	https://logins.esPOCH.edu.ec/assets/0/c2/modules/...	301	Moved Permanently	44milisegundos	412bytes	205bytes
748	9/1/23 22:39:15	9/1/23 22:39:15	GET	https://logins.esPOCH.edu.ec/assets/0/c2/modules/...	301	Moved Permanently	18milisegundos	415bytes	208bytes
749	9/1/23 22:39:15	9/1/23 22:39:15	GET	https://logins.esPOCH.edu.ec/assets/0/c2/4tes	200	OK	15milisegundos	392bytes	735bytes
750	9/1/23 22:39:15	9/1/23 22:39:16	GET	https://logins.esPOCH.edu.ec/assets/0/c2/4tes/default	200	OK	31milisegundos	392bytes	735bytes
751	9/1/23 22:39:16	9/1/23 22:39:16	GET	https://logins.esPOCH.edu.ec/assets/0/c2/4tes/default	200	OK	32milisegundos	392bytes	735bytes
752	9/1/23 22:39:16	9/1/23 22:39:16	GET	https://logins.esPOCH.edu.ec/assets/0/c2/4tes/default	200	OK	31milisegundos	392bytes	735bytes
753	9/1/23 22:39:16	9/1/23 22:39:16	GET	https://logins.esPOCH.edu.ec/arc	200	OK	31milisegundos	392bytes	735bytes
754	9/1/23 22:39:16	9/1/23 22:39:16	GET	https://logins.esPOCH.edu.ec/arc/assets	200	OK	32milisegundos	392bytes	735bytes
755	9/1/23 22:39:16	9/1/23 22:39:16	GET	https://logins.esPOCH.edu.ec/arc/assets/img/genes	200	OK	15milisegundos	392bytes	735bytes
756	9/1/23 22:39:16	9/1/23 22:39:17	GET	https://logins.esPOCH.edu.ec/styles/css/7-a	200	OK	220milisegundos	394bytes	714.985bytes

Fig. 2. Escaneo de Vulnerabilidades y Análisis de Vulnerabilidades

1) *Ausencia de fichas (tokens) Anti-CSRF*

Esta vulnerabilidad ocurre cuando una aplicación no utiliza tokens anti-CSRF (Cross-Site Request Forgery) para validar las solicitudes entrantes, lo que permite que un atacante pueda inyectar solicitudes maliciosas desde otro sitio web y realizar acciones en el contexto de la sesión activa del usuario. [9], [10].

2) *Encabezado de política de seguridad de contenido (CSP) no establecido*

Este problema se relaciona con la falta de una política de seguridad de contenido en el encabezado HTTP que informa al navegador web sobre qué tipo de contenido está permitido y desde qué origen puede provenir. [11], [12].

3) *Falta el encabezado antisequestro de clics*

Esta vulnerabilidad se refiere a la ausencia de una cabecera Anti-clickjacking, que es utilizada para prevenir ataques de secuestro de clics. Este tipo de ataque ocurre cuando un atacante duplica el contenido de una página web en un sitio malicioso con el objetivo de engañar a los usuarios, solicitándoles que proporcionen información confidencial o realizando acciones no autorizadas utilizando los datos del usuario [13], [14].

4) *Biblioteca JS vulnerable*

Esta vulnerabilidad se produce cuando se emplea un marco de JavaScript desactualizado, obsoleto o que contiene código malicioso. Esto permite la divulgación de información confidencial alojada en la aplicación y otorga permisos no autorizados a los atacantes [15].

5) *Cookie sin atributo SameSite*

Esta vulnerabilidad genera un problema de seguridad que está relacionado con la forma en que una página web gestiona las cookies. Si estas cookies no están configuradas con el atributo SameSite, un sitio malicioso puede enviar una solicitud POST al dominio del sitio vulnerable para obtener automáticamente las cookies. Esto puede dar lugar a un ataque de falsificación de solicitudes entre sitios CSRF [16], [17].

6) *Divulgación de la marca de hora – Unix*

Esta vulnerabilidad se identifica como un problema de seguridad que permite a los atacantes descubrir la fecha y hora exacta en que un sistema operativo Unix ha sido reiniciado. Esto brinda

a los atacantes la posibilidad de llevar a cabo ataques más efectivos, ya que tienen conocimiento de la última vez que el sistema fue reiniciado [18].

7) *El servidor divulga información mediante un campo de encabezado de respuesta HTTP “X-Powered-By”*

Esta debilidad de seguridad provoca una filtración de información confidencial a través de uno o más encabezados de respuesta X-Powered-By, los cuales pueden ser aprovechados por los atacantes. Estos encabezados concluyen detalles específicos sobre la tecnología utilizada y el servidor web, lo que permite a los atacantes obtener información detallada que puede ser utilizada en su beneficio [18], [19].

8) *Divulgación de IP privada*

Esta vulnerabilidad de seguridad en la protección de las direcciones IP privadas permite que los atacantes obtengan la dirección IP de un sistema o dispositivo mediante una solicitud HTTP o una conexión de red [20].

9) *Encabezado de respuesta del servidor HTTP*

Esta alerta señala que la aplicación está filtrando información en la respuesta HTTP bajo el encabezado 'Servidor'. Aunque los datos filtrados en sí mismos no son útiles, es necesario reducir este problema por razones de seguridad [21].

10) *Encabezado de seguridad de transporte estricto*

Es un encabezado HTTP que permite que un servidor web indique un navegador web que solo se deben realizar solicitudes seguras HTTPS a ese servidor y que se deben evitar solicitudes HTTP no seguras. El uso de HSTS (HTTP Strict Transport Security) previene ataques como la interceptación de la red y la falsificación de certificados, ya que asegura que todas las comunicaciones con el servidor se realizarán de manera segura a través de HTTPS [22], [23].

11) *Falta el encabezado X-Content-Type-Options*

Esta advertencia indica la ausencia del encabezado Content-Type. Como resultado, las versiones desactualizadas de los navegadores Internet Explorer y Chrome pueden llevar a cabo un rastreo MIME, lo que les permite explorar el contenido proporcionado por el servidor web y

determinar cómo utilizarlo. Esta situación puede ser aprovechada por un atacante para realizar un ataque de secuencia de comandos [24], [25].

12) *Divulgación de información - Comentarios sospechosos*

Esta observación hace referencia a los comentarios presentes en el código fuente. Aunque los comentarios son útiles para que los desarrolladores trabajen de manera colaborativa, también un riesgo, ya que un atacante puede comprender la lógica de programación a través de ellos y llevar a cabo acciones maliciosas [26].

13) *Aplicación web moderna*

Esta advertencia indica que la aplicación del sistema académico es moderna y sugiere que sería más efectivo explorarla utilizando la herramienta Ajax Spider. Esta herramienta proporciona un enfoque avanzado para analizar la aplicación y detectar posibles problemas, lo que contribuirá a que la aplicación funcione de manera óptima [27].

14) *Reexaminar las directivas de control de cache*

Esta alerta señala un problema de seguridad en el que las directivas de control de caché en una aplicación web no están configuradas correctamente. Como resultado, es posible que la información confidencial, como tokens de autenticación o datos sensibles, se almacene en caché y sea accesible por personas no autorizadas. El control de caché es un mecanismo utilizado por los navegadores y servidores web para almacenar en caché páginas y recursos frecuentes, con el objetivo de acelerar la navegación [28], [29].

15) *Fuzzer de agente de usuario*

Esta advertencia destaca que un atacante puede emplear un fuzzer para enviar información inválida o mal formada al campo "Agente de usuario" en la cabecera HTTP de una aplicación. Este campo identifica el tipo de navegador o la aplicación que solicita la página. El uso de un fuzzer de agente de usuario permite enviar información inválida o maliciosa, lo cual puede ocasionar errores y explotar potencialmente vulnerabilidades en la aplicación [30].

Fase 3: Reporte y resumen de análisis

Se presenta un informe completo y un resumen del análisis de vulnerabilidades realizado mediante

la herramienta OWASP ZAP (ver Fig: 3 y 4). El documento proporciona una descripción detallada de las vulnerabilidades identificadas en el sistema académico durante el análisis de seguridad. El informe incluye un resumen general de cada parámetro evaluado de cada vulnerabilidad, lo cual brinda una comprensión clara y concisa de los riesgos y debilidades presentes en la aplicación (ver Tabla 1):

C. Fase 3: Reporte y resumen de análisis

Se presenta un informe completo y un resumen del análisis de vulnerabilidades realizado mediante la herramienta OWASP ZAP (ver Fig: 3 y 4). El documento proporciona una descripción detallada de las vulnerabilidades identificadas en el sistema académico durante el análisis de seguridad. El informe incluye un resumen general de cada parámetro evaluado de cada vulnerabilidad, lo cual brinda una comprensión clara y concisa de los riesgos y debilidades presentes en la aplicación (ver Tabla 1):

Tipo de alerta	Riesgo	Contar
Ausencia de fichas Anti-CSRF	medio	14 (93,3 %)
Encabezado de política de seguridad de contenido (CSP) no establecido	medio	4 (26,7 %)
Falta el encabezado antisequestro de clics	medio	4 (26,7 %)
Biblioteca JS vulnerable	medio	4 (26,7 %)
Cookie sin atributo SameSite	bajos	37 (246,7 %)
Divulgación de la marca de hora - Unix	Bajo	1 (6,7 %)
El servidor divulga información mediante un campo(s) de encabezado de respuesta	Bajo	37 (246,7 %)
Total		15

Fig. 3. Reporte de escaneo

Private IP Disclosure	Bajo	1 (6,7 %)
Server Leaks Version Information via "Server" HTTP Response Header Field	Bajo	37 (246,7 %)
Strict-Transport-Security Header Not Set	Bajo	37 (246,7 %)
X-Content-Type-Options Header Missing	Bajo	37 (246,7 %)
Divulgación de información - Comentarios sospechosos	Informativo	43 (286,7 %)
Modern Web Application	Informativo	8 (53,3 %)
Re-examine Cache-control Directives	Informativo	2 (13,3 %)
User Agent Fuzzer	Informativo	348 (2.320,0 %)
Total		15

Fig. 4. Reporte de escaneo

TABLA I: Ausencia de fichas (tokens) Anti-CSRF

Detalles	Descripción
Identificación de alerta	10202
Tipo de alerta	Pasiva
CWE ID	352 – Falsificación de solicitudes entre sitios (CSRF)
Nivel de Riesgo	Medio
Fase del ciclo de vida del Software	Arquitectura y diseño
OWASP Top 10 2021	A01:2021 – Pérdida de control de acceso

D. Fase 4: Propuesta de mejores prácticas

Los resultados muestran la propuesta de prácticas recomendadas basadas en las vulnerabilidades encontradas en el sistema académico.

» IV. Pruebas de estrés

Para realizar las pruebas de estrés en el sistema académico se debe seguir un proceso metódico, el que se puede visualizar en la Fig. 5:

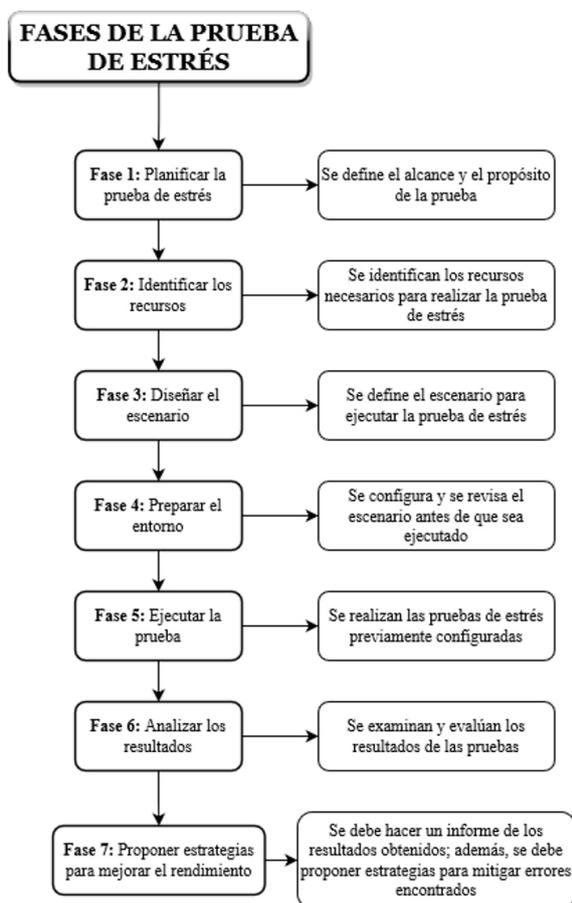


Fig. 5. Fases para realizar una prueba de estrés

A continuación, se describen las fases:

A. Fase 1: Planificar la prueba de estrés

El objetivo de la prueba de estrés es evaluar el rendimiento del sistema académico de la ESPOCH cuando es sometido a una gran cantidad de trabajo. Para el caso de estudio se considera el número de estudiantes en el período de matrículas en cinco años, porque se toma en cuenta que, la vida útil del sistema es de cinco años aproximadamente, lo que conlleva que la cantidad de estudiantes aumente, provocando un aumento de peticiones al sistema en el período de matrículas.

El sistema académico de la ESPOCH es una aplicación basada en el patrón de Single Page-Application (SPA), para el diseño la página se utiliza el Framework Angular y JavaScript para cargar el contenido de la vista. Para el backend utiliza una arquitectura de microservicios, la base de datos es relacional gestionada por SQL Server y se conecta con el sistema a través de NodeJS

Para el proceso de matrículas el sistema cuenta con los siguientes recursos: a nivel de interfaz de usuario, el sistema académico trabaja con un nodo que tiene 8 procesadores y 12 GB en memoria RAM. Para el backend, el sistema trabaja con un servidor Ubuntu Server con 8 procesadores y 14 GB en memoria RAM; mientras que, para el servidor de la base de datos cuenta con 8 procesadores y 12 GB en memoria RAM.

B. Fase 2: Identificar los recursos

Los recursos requeridos de Hardware, Software y Humanos se describen en la Tabla XIV, Tabla XV y Tabla XVI a continuación:

TABLA XIV: Recursos de Hardware

Cantidad	Descripción
1	ASUS ROG Strix SCAR 15 G532 Procesador: AMD Ryzen 9 Tarjeta Gráfica: RTX 3070 RAM: 32 GB Disco: SSD 1 TB
1	Lenovo Legion Y520 Procesador: Intel Core i7-7ma Tarjeta Gráfica: NVIDIA GeForce GTX 1060 RAM: 16 GB Disco: SSD 128 GB, HD 1 TB

TABLA XV: Recursos de Software

Cantidad	Descripción
1	OWASP ZAP, esta herramienta se usa para buscar vulnerabilidades
1	JMeter, esta herramienta se usa para realizar pruebas de estrés

TABLA XVI: Recursos Humanos

Cantidad	Descripción
2	Analista de Seguridad – Tester

C. Fase 3: Diseñar el escenario

Para el diseño del escenario se identificó los recursos involucrados en el proceso de matrículas (Ver Fig. 6).

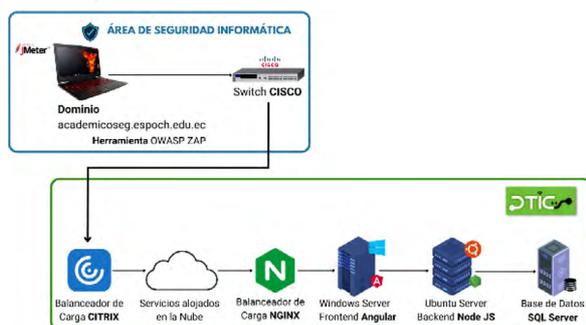


Fig. 6: Escenario de prueba

De igual manera, se considera que la institución hay aproximadamente 20000 estudiantes, cada semestre se abren 50 cupos por carrera, por lo que los estudiantes antes de inscribirse en la carrera pasan por un proceso de admisión y nivelación (UAN). Cada semestre, después de este proceso, a la institución ingresan aproximadamente un promedio de 35 a 40 estudiantes por carrera; cabe recalcar que la ESPOCH hay 40 carreras.

Por otra parte, se toma en cuenta el ingreso de 35 estudiantes a la institución por carrera, lo que da como promedio un aumento de 1400 estudiantes por cada semestre. No obstante, se considera la tasa de deserción, que es el 35% del total de los estudiantes que ingresan al primer semestre en la ESPOCH; es decir, 490 estudiantes que deciden retirarse de la carrera. Asimismo, se debe tomar en cuenta que la tasa de titulación es del 17%; es decir, del total de estudiantes que ingresan 238 se titulan; el 16% son estudiantes egresados; es decir, 224 estudiantes que han culminado sus estudios sin haberse titulado [31].

Por lo tanto, si se toma en cuenta todos estos factores, la cantidad aproximada de estudiantes por semestre es de 448 estudiantes, como se describe en la Ec. 1.

$$\frac{\text{Estudiantes}}{\text{Semestre}} = \text{Total} - (\text{Deserción} + \text{Titulados} + \text{Egresados}) \quad (1)$$

$$\frac{\text{Estudiantes}}{\text{Semestre}} = 448 \text{ estudiantes}$$

Por consiguiente, se toma en cuenta un período de cinco años para que el sistema cumpla su vida útil. Se considera una cantidad inicial de 20000 estudiantes y un incremento de 448 estudiantes por semestre, en cinco años habrá un total de 24480 estudiantes.

Asimismo, se toma en cuenta las horas pico en donde hay una gran afluencia de estudiantes en el período de matrículas. Según la entrevista realizada al Ingeniero Anibal Herrera, encargado del área de Desarrollo de DTIC's, mencionó que, a nivel institucional, las horas en donde hay más estudiantes ingresando al sistema son de 6 a 9 am durante este período, el número de estudiantes conectados es de 4000 a 5000 aproximadamente durante ese lapso.

Por otra parte, los estudiantes pueden matricularse en un lapso de cinco días; es decir, se considera solo una semana y, en esta, los días laborales. No obstante, se toma en cuenta solo los días: lunes, martes y miércoles, porque en estos se ha observado que hay muchos estudiantes conectados; mientras que, en los días restantes los estudiantes se conectan casualmente. Finalmente, para saber qué cantidad de estudiantes se conecta por minuto, se estima que son 5000 estudiantes conectados durante 3 horas; durante los tres días serían 15000 estudiantes conectados en un lapso de 9 horas. Para conocer la cantidad de estudiantes conectados en ese lapso en cinco años, se utiliza una proporción directa como se muestra en la Ec. 2.

$$\frac{\text{Estudiantes}}{\text{Semestre}} = 448 \text{ estudiantes} \quad (2)$$

$$\frac{\# \text{Estudiantes conectados (En este periodo)}}{\text{Total de estudiantes (En este periodo)}} = \frac{\# \text{Estudiantes conectados (5 años)}}{\text{Total de estudiantes en 5 años}}$$

$$\frac{15000}{20000} = \frac{18360}{24480}$$

Se conoce que el número de estudiantes conectados en el período de matrículas son de 18360 en un lapso de 9 horas en total. Para saber cuántos estudiantes hay por minuto, se aplica una proporción directa, tomando en cuenta que, 1 hora tiene 60 minutos. Esto se visualiza en la Ec. 3.

$$\frac{18360 \text{ estudiantes}}{540 \text{ minutos}} = \frac{34 \text{ estudiantes}}{1 \text{ minuto}} \quad (3)$$

En función a los cálculos realizados, se concluye que hay 26 estudiantes conectados por minuto; se considera que es un número ideal de estudiantes

conectados sin que el sistema colapse. Teniendo en cuenta el valor del nivel básico, se considera dos niveles más, el nivel medio y alto de número de estudiantes conectados por minuto. Para hacer los cálculos correspondientes, se considera que en el nivel medio se toma en consideración el promedio del número de estudiantes en el nivel básico y el total, considerando el tiempo del nivel básico, como se puede visualizar en la Ec. 4

$$\text{Promedio} = 21420 \text{ estudiantes}$$

$$\frac{21420 \text{ estudiantes}}{540 \text{ minutos}} = \frac{40 \text{ estudiantes}}{1 \text{ minuto}}$$

Mientras que, en el nivel alto, se toma el número total de estudiantes considerando las 9 horas, como se observa en la Ec. 5.

$$\frac{24480 \text{ estudiantes}}{540 \text{ minutos}} = \frac{46 \text{ estudiantes}}{1 \text{ minuto}}$$

En función a los cálculos correspondientes se obtiene lo siguiente, en el nivel básico son 34 estudiantes por minuto, en el nivel medio son 40 estudiantes por minuto y en el nivel alto son 46 estudiantes por minuto. Se debe considerar que el número de estudiantes considerados en cada nivel son el número de hilos por cada minuto en las pruebas de estrés.

D. Preparar el entorno de prueba

Para preparar el escenario de pruebas, se debe comenzar a configurar el Proxy. Como se visualiza en la Figura 4, para poder hacer la prueba, se debe configurar manualmente el Proxy, para que haya un intermediario entre el cliente y el servidor. En este caso, se utiliza Firefox como navegador para poder configurar el Proxy, como se observa para HTTP y para HTTPS el acceso es local y el puerto utilizado es el 8888.

Para continuar, debe configurar en la herramienta JMeter. Primero, se configura el Servidor Proxy HTTP de la siguiente manera:

- Puerto: el puerto 8888, como se configuró en Firefox.
- Controlador Objetivo: este campo guarda la información de las peticiones que se hacen en el proceso de matrículas.
- Nombre de la Transacción: para definir cada proceso que se desee hacer; es decir, el camino

a seguir simulando que es un usuario en la página.

Al dar clic en Arrancar, se inicia la grabación de peticiones al servidor del sistema académico durante el proceso de matrículas de un estudiante. A continuación, se debe colocar un árbol de resultados y un resumen de reporte para poder visualizar los resultados. Para que la prueba simule el comportamiento real de uno o varios usuarios, se debe agregar un Temporizador Aleatorio Uniforme, con la finalidad de que haya un retraso de milisegundos en cada petición, dado que, la experiencia de cada uno es diferente; a uno el sistema les carga más rápido y a otros más lento.

Para ingresar los valores de demora aleatoria y constante, se debe tomar en cuenta la fórmula que utiliza JMeter. Para el caso de estudio se considera:

- Máximo retardo aleatorio: 10 000 ms.
- Desplazamiento de retraso constante: 0 ms.

El primero detendrá a las peticiones en un número variado de milisegundos de 0 a 5000. La fórmula se visualiza en la Ecuación 6, como se muestra en esta ecuación, para cada ejecución, se considera que X tomará un valor aleatorio. Si se toma un valor de 8 para X y se rempazan los valores, la ejecución aleatoria 1 se visualiza en la Ec. 6.

(6)

Ecuación aleatoria N: $0.X * \text{Valor Random} + \text{Valor Constante}$

$$\text{Ecuación aleatoria 1: } 0.8 * 5000 + 0 = 4000\text{ms}$$

4 segundos de retardo

Tomando en cuenta estos parámetros, el máximo retardo aleatorio es de 5000.0 segundos y el desplazamiento de retraso es de 0 segundos. Finalmente, para configurar el grupo de hilos, se debe tener en cuenta que, cada hilo representa el proceso que sigue un estudiante al momento de matricularse en el sistema académico; es decir, cada hilo es un usuario conectado. Para la prueba de estrés considera tres niveles para el número de hilos, simulando los estudiantes conectados durante un periodo de tiempo.

- **Básico:** 34 hilos/60 segundos
- **Medio:** 40 hilos/60 segundos
- **Alto:** 46 hilos/60 segundos

- **Número de Hilos:** Es la cantidad de procesos en un intervalo de tiempo. Como se observa en la Figura 8, el número de hilos es 34.
- **Periodo de subida:** Es la cantidad de tiempo para que se ejecute cada una de las peticiones de un hilo simultáneamente. Como se observa en la Figura 8, se ejecutará 34 hilos cada 60 segundos.
- **Contador del bucle:** Es la cantidad de veces que se va a repetir el proceso, el proceso se ejecutará 180 veces para simular 3 horas en un día.

Para el nivel medio y el nivel alto, la configuración del entorno de prueba es similar. Una vez diseñado el entorno de las pruebas de estrés, se debe ejecutar tres veces cada prueba para simular los tres días de mayor afluencia de los tres estudiantes.

» V. Resultados

En el presente trabajo se enfoca en los resultados obtenidos a través del análisis exhaustivo de vulnerabilidades en el sistema académico de la institución. Se identificaron 15 vulnerabilidades que representan riesgos importantes para la seguridad de la información y la integridad.

A. Ausencia de fichas (tokens) Anti-CSRF.

Se detectó que el sistema no utiliza tokens Anti-CSRF para prevenir ataques CSRF (Cross-Site Request Forgery). Para evitar este tipo de vulnerabilidad, se recomienda implementar tokens Anti-CSRF en todas las solicitudes que modifiquen los datos del usuario.

B. Encabezado de política de seguridad de contenido (CSP) no establecido

El sistema no establece una política de seguridad de contenido (CSP), lo que aumenta el riesgo de ataques XSS (Cross-Site Scripting). Se recomienda implementar una política CSP adecuada para evitar este tipo de vulnerabilidad.

C. Falta el encabezado antisequestro de clics

Se descubrió que el sistema académico no implementa el encabezado antisequestro de clics (CHP), lo que aumenta el riesgo de ataques de sequestro de clics. Para prevenir este tipo de vulnerabilidad, se recomienda implementar el

encabezado CHP.

D. Biblioteca JS vulnerable

Para prevenir este tipo de vulnerabilidad, se recomienda actualizar la biblioteca JS a la versión más reciente que no tenga vulnerabilidades conocidas.

E. Cookie sin atributo SameSite

Se recomienda establecer el atributo SameSite en todas las cookies del sistema académico para prevenir este tipo de vulnerabilidad.

F. Divulgación de la marca de hora – Unix

Para prevenir este tipo de vulnerabilidad, se recomienda eliminar la marca de tiempo de Unix de las URL del sistema académico.

G. El servidor divulga información mediante un campo(s) de encabezado de respuesta HTTP "X-Powered-By"

Se discute la importancia de limitar la información expuesta a través de las respuestas HTTP para reducir la superficie de ataque.

H. Divulgación de IP privada

Se encontró que el sistema exponía información sobre la dirección IP privada del servidor. Se propone la implementación de medidas de seguridad para limitar el acceso a esta información.

I. Encabezado de respuesta del servidor HTTP

Se identificó que el sistema no está configurado para ocultar la información sobre el servidor web utilizado, lo que puede ser utilizado por atacantes para identificar vulnerabilidades específicas del software utilizado. Se discuten las implicaciones de esta vulnerabilidad y se proponen medidas para ocultar la información sobre el servidor.

J. Cookie sin atributo SameSite

Encabezado de seguridad de transporte estricto: se detectó que el sistema no utiliza el encabezado de seguridad de transporte estricto, lo que puede permitir a los atacantes interceptar las conexiones y robar información confidencial. Se discute la importancia de implementar este encabezado para mejorar la seguridad de las comunicaciones en línea.

K. Falta el encabezado X-Content-Type-Options

Esta vulnerabilidad se refiere a la falta de un encabezado HTTP de seguridad importante, que ayuda a prevenir ataques de tipo MIME sniffing. La solución para esta vulnerabilidad es agregar el encabezado X-Content-Type-Options en la respuesta HTTP.

L. Divulgación de información - Comentarios sospechosos

La solución para esta vulnerabilidad es revisar y eliminar cualquier comentario sospechoso en el código fuente.

M. Aplicación web moderna

La solución para esta vulnerabilidad es implementar controles de seguridad adecuados para mitigar estos riesgos.

N. Reexaminar las directivas de control de caché

La solución para esta vulnerabilidad es revisar y ajustar las directivas de control de caché de acuerdo con las necesidades de seguridad de la aplicación web.

O. Fuzzer de agente de usuario

Esta vulnerabilidad se refiere a la falta de pruebas adecuadas para detectar vulnerabilidades de seguridad en la aplicación web en relación con el comportamiento de diferentes navegadores y dispositivos. La solución para esta vulnerabilidad es utilizar herramientas de pruebas de fuzzer de agente de usuario para identificar y corregir posibles vulnerabilidades relacionadas con el comportamiento de diferentes navegadores y dispositivos.

P. Pruebas de estrés ejecutadas en función a los tres niveles

Las pruebas de estrés del sistema académico se realizaron para evaluar su capacidad de respuesta bajo cargas de trabajo pesado y determinar si el sistema puede mantener su rendimiento y disponibilidad en estas condiciones. Para las pruebas, se generaron múltiples escenarios en función de tres niveles, que simulaban la actividad de los usuarios en el sistema, durante el proceso de matriculación.

1. Análisis de resultados de las pruebas de estrés en función del nivel básico

TABLA XVII: Resultados de la ejecución de la prueba de estrés en nivel básico

Parámetros	1ra	2da	3ra	Promedio
# Procesos	6120	6120	6120	6120
# Peticiones	116.280	116.280	116.280	116.280
Error/pet	0.75%	1.21%	0.66%	0.87%
Rendimiento (pet/min)	720	726	729	725

1) El análisis de los resultados presentados en la Tabla XVII en función a las tres ejecuciones es:

- El número de peticiones que se enviaron en total al servidor es de 116.280.
- El error en función de la cantidad de peticiones en las tres ejecuciones es 0.87% en promedio.
- El rendimiento del sistema académico es de 725 peticiones por minuto en promedio.
- El rendimiento varía de acorde con los errores que se presentan en las peticiones y la cantidad de milisegundos de retraso en cada petición.
- Las peticiones que presentaban un porcentaje de error relativamente alto se presentan en la siguiente tabla.

TABLA XVIII: Porcentaje de error del total de peticiones por cada URL

Transacción – URL de la petición	Porcentaje de error
Ingresar – /d7f86710-01e1-461d-8599-758de4542e2b/oauth2/authorize-614	0.14%
Ingresar – /swSistemaAcademico/seguridad/obtenerkey-626	0.26%
Salir – /common/oauth2/logout-672	0.49%

2) Análisis de resultados de las pruebas de estrés en función del nivel medio

TABLA XIX: Resultados de la ejecución de la prueba de estrés en nivel medio

Parámetros	1ra	2da	3ra	Promedio
# Procesos	7200	7200	7200	7200
# Peticiones	136.800	136.800	136.800	136.800
Error/pet	0.46%	0.78%	0.44%	0.56%
Rendimiento (pet/min)	872	835	865	857

El análisis de los resultados presentados en la Tabla XIX en función a las tres ejecuciones es:

- El número de peticiones que se enviaron en total al servidor es de 136.800.
- El error en función de la cantidad de peticiones en promedio de las tres ejecuciones es 0.56%.
- El rendimiento del sistema académico es en promedio de 857 peticiones por minuto.
- El rendimiento varía de acorde con los errores que se presentan en las peticiones y la cantidad de milisegundos de retraso en cada petición.
- Las peticiones que presentaban un porcentaje de error relativamente alto en comparación con las otras se muestran en la Tabla XX.

TABLA XX: Porcentaje de error del total de peticiones por cada URL

Transacción – URL de la petición	Porcentaje de error
Ingresar – /d7f86710-01e1-461d-8599-758de4542e2b/oauth2/authorize-614	0.10%
Ingresar – /swSistemaAcademico/seguridad/obtenerkey-626	0.28%
Salir – /common/oauth2/logout-672	0.12%

3) Análisis de resultados de las pruebas de estrés en función del nivel alto

TABLA XXI: Resultados de la ejecución de la prueba de estrés en nivel alto.

Parámetros	1ra	2da	3ra	Promedio
# Procesos	8280	8280	8280	8280
# Peticiones	157.320	157.320	157.320	157.320
Error/pet	1.73%	0.32%	0.32%	0.79%
Rendimiento (pet/min)	995	996	996	996

El análisis de los resultados presentados en la Tabla XXI en función a las tres ejecuciones es:

- El número de peticiones que se enviaron en total al servidor es de 157.320.
- El error en función de la cantidad de peticiones en promedio de las tres ejecuciones es 0.79%.

- El rendimiento del sistema académico es en promedio de 996 peticiones por minuto.
- El rendimiento varía de acorde con los errores que se presentan en las peticiones y la cantidad de milisegundos de retraso en cada petición.
- Las peticiones que presentaban un porcentaje de error relativamente alto en comparación con las otras se muestran en la Tabla XXII.

TABLA XXII: Porcentaje de error del total de peticiones por cada URL

Transacción – URL de la petición	Porcentaje de error
Ingresar – /d7f86710-01e1-461d-8599-758de4542e2b/oauth2/authorize-614	0.03%
Ingresar – /swSistemaAcademico/seguridad/obtenerkey-626	0.21%
Salir – /common/oauth2/logout-672	0.12%
Salir – Salir - /cas/logout-673	0.58%

Q. Recomendaciones en base a las ejecuciones de las pruebas de estrés.

Se recomienda implementar un nodo de respaldo adicional con 8 procesadores y 12 GB de memoria RAM para cada uno de los procesos del sistema académico. Esta medida tiene como objetivo evitar posibles colapsos del sistema y asegurar su continuidad operativa. Además, se recomienda revisar detalladamente las solicitudes que presentan un porcentaje de error considerable en el sistema académico. Esto se debe a que a medida que aumentan los errores en las solicitudes, se ve comprometido el rendimiento general del sistema. Por lo tanto, es importante identificar y solucionar las causas de estos errores para mejorar la eficiencia y el rendimiento del sistema académico.

» VI. Conclusiones

En este estudio, se evaluaron las características de la metodología OWASP para la detección de vulnerabilidades y se desarrolló un procedimiento para llevar a cabo pruebas de estrés. El análisis de vulnerabilidades del sistema académico ha demostrado su alta eficiencia al identificar 15 debilidades, las cuales 4 de

riego medio, 7 de riego bajo y 4 informativas, proporcionando una visión completa y objetiva de las vulnerabilidades existentes. Los resultados e informes obtenidos brindan un análisis detallado sobre las debilidades más críticas. Para mejorar la seguridad del sistema académico a largo plazo, se recomienda implementar las mejores prácticas propuestas en base a estos hallazgos. Estas prácticas permitirán abordar de manera efectiva las debilidades identificadas, fortaleciendo la seguridad del sistema y protegiendo la información confidencial de manera más robusta.

Se realizaron múltiples pruebas de estrés en el sistema académico con el objetivo de evaluar su rendimiento durante el proceso de matrículas. Se observó que el servidor fue capaz de manejar hasta 157.320 peticiones durante 180 minutos; sin embargo, se detectaron algunos errores ocasionados por determinadas páginas web, provocando un retraso en el tiempo de respuesta del servidor, lo que generó que haya un 0.79% de error del total de peticiones. En base a estos hallazgos, se formularon recomendaciones para mejorar el rendimiento y optimizar su funcionamiento y reducir los tiempos de respuesta. Al implementar estas mejoras, se espera que el rendimiento general del sistema académico mejore significativamente durante el proceso de matrículas, brindando una experiencia más eficiente a los usuarios.

► VII. Referencias

- [1] F. E. Arévalo Cordovilla, I. B. Ordoñez Sigcho, M. F. Peñaherrera Larenas, y V. J. Suárez Matamoros, «Importancia de la seguridad de los sistemas de información frente el abuso, error y hurto de información», *Rev. Científica Dominio Las Cienc.*, vol. 6, n.o 2, p. 12, jun. 2020, doi: <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v6i2.1197>.
- [2] R. Andrian y A. Fauzi, «Security Scanner For Web Applications Case Study: Learning Management System», *J. Online Inform.*, vol. 4, n.o 2, p. 63, feb. 2020, doi: [10.15575/join.v4i2.394](https://doi.org/10.15575/join.v4i2.394).
- [3] The OWASP Foundation, *Web Security Testing Guide*, 4.2. The OWASP Foundation, 2020.
- [4] S. Pradeep y Y. Kumar Sharma, «A Pragmatic Evaluation of Stress and Performance Testing Technologies for Web Based Applications», en 2019 Amity International Conference on Artificial Intelligence (AICAI), Dubai, United Arab Emirates: IEEE, feb. 2019, pp. 399-403. doi: [10.1109/AICAI.2019.8701327](https://doi.org/10.1109/AICAI.2019.8701327).
- [5] V. P. Agila Tinoco, «ANÁLISIS DE VULNERABILIDADES, AMENAZAS Y RIESGOS AL SISTEMA DE MATRICULACIÓN DE LA UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS EMPRESARIALES DE LA UTMACH», Universidad Técnica de Machala, Machala, ago. 2019.
- [6] Z. M. Jiang y A. E. Hassan, «A Survey on Load Testing of Large-Scale Software Systems», *IEEE Trans. Softw. Eng.*, vol. 41, n.o 11, pp. 1091-1118, nov. 2019, doi: [10.1109/TSE.2015.2445340](https://doi.org/10.1109/TSE.2015.2445340).
- [7] Anibal Herrera, «Entrevista para conocer la arquitectura del nuevo Sistema Académico de la ESPOCH», 13 de octubre de 2022.
- [8] D. Kornienko, S. Mishina, y M. Melnikov, «The Single Page Application architecture when developing secure Web services - IOPscience», *J. Phys. Conf. Ser.*, p. 13, 2021, doi: [10.1088/1742-6596/2091/1/012065](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2091/1/012065).
- [9] The MITRE Corporation, «CWE-352: Cross-Site Request Forgery (CSRF)», *CWE - Common Weakness Enumeration*, 31 de enero de 2023. <https://cwe.mitre.org/data/definitions/352.html> (accedido 31 de enero de 2023).
- [10] the ZAP Dev Team, «Absence of Anti-CSRF Tokens», *OWASP ZAP*, 2023. <https://www.zaproxy.org/docs/alerts/10202/> (accedido 29 de enero de 2023).
- [11] The MITRE Corporation, «CWE-693: Protection Mechanism Failure», *CWE - Common Weakness Enumeration*, 31 de enero de 2023. <https://cwe.mitre.org/data/definitions/693.html> (accedido 31 de enero de 2023).
- [12] the ZAP Dev Team, «Content Security Policy (CSP) Header Not Set», *OWASP ZAP*, 2023. <https://www.zaproxy.org/docs/alerts/10038/> (accedido 2 de febrero de 2023).
- [13] OWASP Foundation, Inc., «Clickjacking», *OWASP Foundation*, 2023. <https://owasp.org/www-community/attacks/Clickjacking> (accedido 3 de febrero de 2023).

- [14] The MITRE Corporation, «CWE-1021: Improper Restriction of Rendered UI Layers or Frames», CWE - Common Weakness Enumeration, 2023. <https://cwe.mitre.org/data/definitions/1021.html> (accedido 31 de enero de 2023).
- [15] The MITRE Corporation, «CWE-829: Inclusion of Functionality from Untrusted Control Sphere», CWE - Common Weakness Enumeration, 31 de enero de 2023. <https://cwe.mitre.org/data/definitions/829.html> (accedido 2 de febrero de 2023).
- [16] The MITRE Corporation, «CWE-1275: Sensitive Cookie with Improper SameSite Attribute», CWE - Common Weakness Enumeration, 31 de enero de 2023. <https://cwe.mitre.org/data/definitions/1275.html> (accedido 2 de febrero de 2023).
- [17] the ZAP Dev Team, «Cookie without SameSite Attribute», OWASP ZAP, 2023. <https://www.zaproxy.org/docs/alerts/10054/> (accedido 3 de febrero de 2023).
- [18] The MITRE Corporation, «CWE-200: Exposure of Sensitive Information to an Unauthorized Actor», CWE - Common Weakness Enumeration, 31 de enero de 2023. <https://cwe.mitre.org/data/definitions/200.html> (accedido 2 de febrero de 2023).
- [19] the ZAP Dev Team, «Server Leaks Information via “X-Powered-By” HTTP Response Header Field(s)», OWASP ZAP, 2023. <https://www.zaproxy.org/docs/alerts/10037/> (accedido 3 de febrero de 2023).
- [20] the ZAP Dev Team, «Private IP Disclosure», OWASP ZAP, 2023. <https://www.zaproxy.org/docs/alerts/2/> (accedido 2 de febrero de 2023).
- [21] the ZAP Dev Team, «Server Leaks its Webserver Application via “Server” HTTP Response Header Field», OWASP ZAP, 2023. <https://www.zaproxy.org/docs/alerts/10036-1/> (accedido 29 de enero de 2023).
- [22] ScanRepeat, «Strict-Transport-Security Header Not Set», ScanRepeat, 2020. <https://scanrepeat.com/web-security-knowledge-base/strict-transport-security-header-not-set> (accedido 29 de enero de 2023).
- [23] the ZAP Dev Team, «Strict-Transport-Security Header», OWASP ZAP, 2023. <https://www.zaproxy.org/docs/alerts/10035/> (accedido 29 de enero de 2023).
- [24] ScanRepeat, «X-Content-Type-Options Header Missing», ScanRepeat, 2020. [https://scanrepeat.com/web-security-knowledge-base/\\${'https://scanrepeat.com/' + path}](https://scanrepeat.com/web-security-knowledge-base/${'https://scanrepeat.com/' + path}) (accedido 30 de enero de 2023).
- [25] the ZAP Dev Team, «X-Content-Type-Options Header Missing», OWASP ZAP, 2023. <https://www.zaproxy.org/docs/alerts/10021/> (accedido 30 de enero de 2023).
- [26] ScanRepeat, «Information Disclosure - Suspicious Comments», ScanRepeat, 2020. [https://scanrepeat.com/web-security-knowledge-base/\\${'https://scanrepeat.com/' + path}](https://scanrepeat.com/web-security-knowledge-base/${'https://scanrepeat.com/' + path}) (accedido 30 de enero de 2023).
- [27] the ZAP Dev Team, «Modern Web Application», OWASP ZAP, 2023. <https://www.zaproxy.org/docs/alerts/10109/> (accedido 30 de enero de 2023).
- [28] The MITRE Corporation, «CWE-525: Use of Web Browser Cache Containing Sensitive Information», CWE - Common Weakness Enumeration, 31 de enero de 2023. <https://cwe.mitre.org/data/definitions/525.html> (accedido 3 de febrero de 2023).
- [29] the ZAP Dev Team, «Re-examine Cache-control Directives», OWASP ZAP, 2023. <https://www.zaproxy.org/docs/alerts/10015/> (accedido 30 de enero de 2023).
- [30] the ZAP Dev Team, «User Agent Fuzzer», OWASP ZAP, 2023. <https://www.zaproxy.org/docs/alerts/10104/> (accedido 30 de enero de 2023).
- [31] M.C.NoboaCevallosyD.E.CuencaObregon, «LEVANTAMIENTO Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO DESCRIPTIVO DE LAS TASAS DE DESERCIÓN, RETENCIÓN Y TITULACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA ESPOCH EN LOS PERÍODOS 2014-2020», Proyecto de Investigación, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, 2021.

PROPAGATION MODELS APPLIED IN OPEN AREAS UNDER LTE TECHNOLOGIES AND FITTING WITH MEASUREMENTS

Luis Javier Sefla Urquizo ¹	luis.sefla@esPOCH.edu.ec
Daniel Alejandro Basantes Cherrez ¹	daniel.basantes@esPOCH.edu.ec
Erick Alexander Tintin Sanchez ²	erick.tintin@esPOCH.edu.ec
Joseph Alexander Aguilar Bonilla ³	joseph.aguilar@esPOCH.edu.ec

¹ Telecomunicaciones Riobamba, Ecuador

² Telecomunicaciones Banos, Ecuador

³ Telecomunicaciones Ambato, Ecuador

ABSTRACT

This paper presents an analysis of propagation models used to measure power intensity levels in the Department of Informatics and Electronics Sciences of ESPOCH University, using Movistar's LTE technology. Using the Cell Info Lite application and Google Earth software, the base radio was precisely located and concentric circles were drawn covering 145 points outside the department, covering an area of 36400 m². Three measurement campaigns were carried out at each point on different days and similar schedules, with the objective of comparing the propagation models and observing the variations in losses in the proposed scenario. The results indicate a close alignment between the Erceg model and the measured values obtained from Cell Info Lite, suggesting that this model is the most suitable for this specific scenario. These results have important implications for LTE technology planning and optimization, especially in environments similar to the Department of Informatics and Electronics Sciences at ESPOCH University, since the selection of an appropriate propagation model, such as the Erceg model, can significantly improve coverage and network performance for Movistar users..

Palabras Clave: Propagation Model, LTE, Movistar.

➤ I. Introduction

Mobile communication technology has evolved tremendously in recent decades, going through various generations that have significantly

improved the connectivity and data transmission speed. The first generation of mobile cellular technology, 1G, was characterized by limited voice quality and network capacity. Subsequently, 2G technology improved voice quality and added features such as text messaging and international roaming. 3G technology added data capabilities and enabled simultaneous voice and data transmission. 4G technology offered faster data speeds and improved data handling capacity for high-demand applications such as video conferencing and online video streaming. [1]

Long Term Evolution (LTE) technology is a mobile communication technology that has had a significant impact on how people communicate and access information. LTE is considered like an advanced version of 4G technology and has significantly improved data transmission speeds, mobile network capacity, and energy efficiency of mobile devices. [2] It has enabled the transmission of high-definition services and fast downloading of large files. Additionally, its ability to support multiple users simultaneously has enhanced the capacity of mobile networks, allowing more users to connect and enjoy advanced services without affecting connection stability. LTE is a wireless broadband technology capable of reaching speeds of up to 300 Mbps. [3]

Presently, Propagation models are used to predict the strength of signal power between a base and a receiver. These models consider various factors, such as distance, frequency, and environmental conditions. Among the most used models are the renowned Ericsson 999 model, [4] which stands out for its precision in urban environments when

considering the presence of buildings and artificial obstacles. On the other hand, the Erceg model specializes in estimating attenuation in microcell and macrocell scenarios, taking into account the density of buildings and surrounding vegetation. Furthermore, the Walfisch-Ikegami model focuses on propagation prediction in urban and suburban environments, considering diffraction and reflection in the presence of natural and artificial obstacles. The SIU model is relevant in path loss estimation and signal power adjustment in various communication environments. This model considers factors such as path loss, attenuation, and interference effects to calculate the expected signal power at a given point. For its part, the Log-Distance model is a widely used basic reference model that is based on the assumption that path loss increases logarithmically with distance. [5]

In this research, the Network Cell Info Lite application was used to measure the power intensity of Movistar’s LTE technology. The base station was located using Google Earth to place the analysis areas and to place 145 points covering the Faculty of Informatics and Electronics. Three measurement campaigns were carried out at similar times to evaluate variations in signal strength due to environmental factors such as weather and vegetation, among others. Subsequently, a more detailed comparative analysis was performed using the propagation models to evaluate the average results obtained. [6]

► II. Theoretical Framework

Propagation Models

A. Log-Distance Model

A radio propagation model that predicts the path loss encountered by a signal within a building or in densely populated areas over distance. In many cases, empirical results agree with Friis on a logarithmic decay with distance, however, the quadratic exponent is not the best fit to the data in many real propagation environments. Path loss is generally expressed as a function of distance by an exponent n according to: [7]

$$Pr(d) = Pr(d_0) + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (1)$$

Where:

$Pr(d)$: The signal propagation power loss at a distance d .

$Pr(d_0)$: The signal propagation power loss at a distance d_0 .

d : Distance between transmitter and receiver [m].

n : Is the attenuation exponent.

d_0 : First distance measurement performed.

B. Cost 231 Walfish-Ikegami Model

The COST 231 model is a semi-empirical path loss prediction model. It is recommended for macro-cells in urban and sub-urban scenarios, with good path loss results for transmitting antennas located above average rooftop height. However, the error in the predictions increases considerably as the transmitter height approaches rooftop height, leading to very poor performance for transmitters below that level. Compared to previous models such as Okumura-Hata, the COST 231 model includes a series of additional parameters to the calculation process, in addition to expanding the frequency range in which it can be used (800 - 2000 MHz). The model performs a more detailed calculation of the attenuation, based on four additional parameters. [8] [9]

- Height of buildings.
- Width of streets.
- Separation between buildings.
- Orientation of the street concerning the direction of propagation.

For LOS scenarios, the propagation loss considers only the free space loss, $L_b = LO(los)$

$$LO(los) = 42.6 + 26 \log(d) + 20 \log(f) \quad (2)$$

Where:

d : Is expressed in km.

f : is expressed in MHz.

The typical NLOS path described in the COST 231 model is shown in Figure 1 and Figure 2.

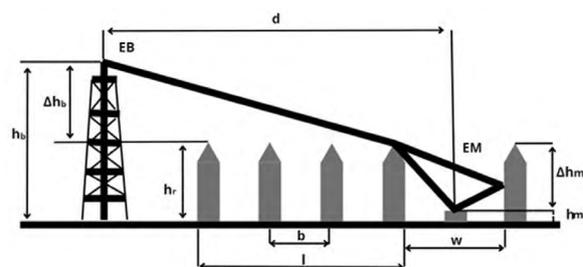


Fig. 1. Typical NLOS Propagation Scenario Profile view [8].

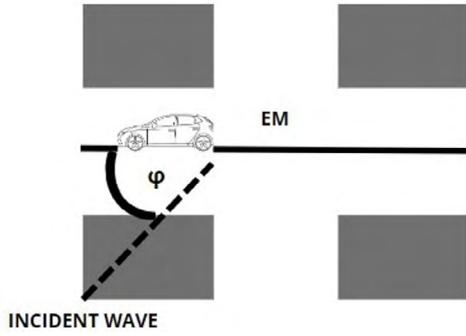


Fig. 2. Typical NLOS Propagation Scenario Top view [8]

The parameters defined in the COST 231 model (Figure 2) are the following:

- hr : Average height of the buildings (m).
- w : Street width (m).
- bl : Average spacing between buildings (m).
- ϕ : Angle formed by the direction of propagation and the axis of the street.
- hb : Height of the base station antenna (m).
- hm : Height of mobile device antenna (m).
- $(\Delta h_m = h_r - h_m)$ (m).
- $(\Delta h_b = h_b - h_r)$ (m).
- l : Total distance between the first and last building (m).
- d_r : Distance between base station and mobile device (km).
- f : Frequency of operation of the MOVISTAR cellular network (MHz).

When there is no line of sight, the propagation losses are determined by:

$$L_{NLOS} = \begin{cases} L_0 + L_{rst} + L_{msd} & , \text{ for } L_{rst} + L_{msd} > 0 \\ L_0 & , \text{ for } L_{rst} + L_{msd} \leq 0 \end{cases}$$

The propagation loss in free space conditions, L_0 , is obtained according to the expression:

$$L_0 = 32.4 + 20\log(d) + 20\log(f) \quad (3)$$

The term L_{rst} considers the width of the street and its orientation concerning the direction of ray propagation.

The expression for the calculation of L_{rst} is given by:

$$L_{rst} = -8.2 - 10\log(w) + 10\log(f) + 20\log(\Delta h_m) + L_{ori} \quad (4)$$

Where:

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0.35\phi, & \text{For } 0^\circ \leq \phi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.007(\phi - 35), & \text{For } 35^\circ \leq \phi < 55^\circ \\ 4.0 + 0.11(\phi - 35), & \text{For } 55^\circ \leq \phi \leq 90^\circ \end{cases}$$

“The L_{ori} term is a correction factor that quantifies losses due to street orientation. If the value of L_{rst} is 0, it should be considered as $L_{rst} = 0$.

The multiscreen diffraction loss, L_{msd} , is a function of the frequency, the distance between the mobile device and the base station, as well as the height of the base station and the height of buildings. Similar to L_{rst} , if L_{msd} is negative, it is considered as $L_{msd} = 0$. Its value is calculated using the following expression:”

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log(d) + k_f \log(f) - 9\log(b) \quad (5)$$

Where:

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log(1 + \Delta h_b) \phi & , \text{ For } h_r > h_b \\ 0 & , \text{ For } h_r \leq h_b \end{cases}$$

Is a term that depends on the height of the base station.

In addition, the following parameters are defined:

$$K_a = \begin{cases} 54, & \text{For } h_b > h_r \\ 54 - 0.8 \Delta h_b, & \text{For } h_b \leq h_r \text{ and } d \geq 0.5 \text{ Km} \\ 54 - \frac{0.8 \Delta h_b d}{0.5}, & \text{For } h_b \leq h_r \text{ and } d < 0.5 \text{ Km} \end{cases}$$

$$K_d = \begin{cases} 18, & \text{For } h_b > h_r \\ 18 - 15 \frac{\Delta h_b}{h_r}, & \text{For } h_b \leq h_r \end{cases}$$

$$K_f = \begin{cases} -4 + 0.7 \frac{f}{925 - 1}, & \text{For medium - sized cities} \\ -4 + 1.5 \frac{f}{925 - 1}, & \text{For metropolitan centers} \end{cases}$$

The k_a term presents the increase in path loss for the case of base stations located below the average height of the buildings. The terms k_d and k_f control the dependence of L_{msd} on distance and frequency, respectively. If there is no data on the buildings on the route, the COST 231 model recommends using the following values [10]:

$$hr = 3m * (\text{No. of Floors}) + \text{ceiling height} \quad (6)$$

$$\text{ceiling height} = \begin{cases} 3m, & \text{sloping roof} \\ -0m, & \text{flat roof} \end{cases}$$

C. Ericsson 9999 Model

The Ericsson 9999 model, developed by the company Ericsson, is used for network addressing. It is an extension of the Hata model. The advantage of this model is that it allows for parameter adjustments according to the specific scenery in which the model is being applied. [11]

The mathematical expression that describes the loss predicted by this model is as follows:

$$L = a_0 + a_1 \log(d) + a_2 \log(h_b) + a_3 (h_b) \log(d) - 3.2(\log(11.75h_r))^2 + g(f) \quad (7)$$

Considering that:

$$g(f) = 44.43\log(f) - 4.78(\log(f))^2 \quad (8)$$

Where:

- f : Frequency (GHz)
- d : Distance between transmitter and receiver (m).
- h_b : Height of buildings (m).
- h_r : Receiver height (m).

The TABLE 1 below shows the correction factor values for different sectors:

TABLE 1: Factor of correction for different sectors

Factor	Urban	Suburban	a
a_0	36.2	43.20	45.95
a_1	30.2	68.93	100.6
a_2	-12.0	-12.0	-12.0
a_3	0.1	0.1	0.1

D. Erceg Model

Erceg et al. [12] proposed a model derived from a vast amount of data at 1.9 GHz, which makes it a preferred model for PCS and higher frequencies. The model was in particular adopted in the 802.16 [13] study group and is popular with WiMAX suppliers for 2.5 GHz products, and even 3.5 GHz fixed WiMAX.

$$l = l_0 + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + s \quad \text{For } d \geq d_0 \quad (9)$$

where free space approximation is used $d < d_0$ for. Values for l_0 , γ , and s are defined in tables 2 and 3.

TABLE 2: Values for Erceg model.

Parameter	Value (dB)
L_0	$20 \log \frac{4\pi d_0}{\lambda}$
d_0	100 (m)
γ	$(a - bh_B + c/h_B) + \phi_\gamma$
s	$\gamma\phi$
ϕ	$\mu_\phi + z\phi_\phi$
x, y, z	Gaussian random variables $N(0, 1)$

TABLE 3: Values for Erceg model parameters in various terrain categories.

Parameter	Terrain Category		
	A (Hilly/moderate to heavy tree density)	B (Hilly/light tree density or flat)	C (Flat/light tree density)
a	4.6	4.0	3.6
b	0.0076	0.0065	0.0050
c	12.6	17.1	20.0
ϕ_γ	0.57	0.75	0.59
μ_ϕ	10.6	9.6	8.2
ϕ_ϕ	2.3	3.0	1.6

E. SUI Model

Stanford University Interim (SUI) model is developed for IEEE 802.16 by Stanford University. It is used for frequencies above 1900 MH. In this propagation model, three different types of terrains or areas are considered. These are called terrain A, B, and C. Terrain A represents an area with the highest path loss, it can be a very densely populated region while terrain B represents an area with moderate path loss, a suburban environment. Terrain C has the least path loss which describes a rural or flat area. In Table 4, these different terrains and different factors used in the SUI model are described [8] (Table 4).

TABLE 4: Different terrains and their parameters.

Parameter	Terrain A	Terrain B	Terrain C
a	4.6	4.0	3.6
$b(1/m)$	0.0076	0.0065	0.0050
$c(m)$	12.6	17.1	20.0

The path loss in the SUI model can be described as:

$$PL = A + 10\gamma \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_f + X_h + S \quad (10)$$

Where PL represents Path Loss in DBS, d is the distance between the transmitter and receiver, d_0 is the reference distance, X_f is the frequency correction factor, X_h is the correction factor for base station height, S is shadowing and γ is the path loss component and it is described as [14]:

$$\gamma = A - bh_b + \frac{c}{h_b} \quad (11)$$

where h_b is the height of the base station and a, b and c represent the terrain for which the values are selected from the above table.

$$A = 20 \log \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) \quad (12)$$

where A is free space path loss while d_0 is the distance between Tx and Rx and λ is the wavelength. The correction factor for frequency and base station height are as follows:

$$X_f = 6 \log \left(\frac{f}{2000} \right) \quad (13)$$

$$X_b = -10,8 \log \left(\frac{h_r}{2000} \right) \quad (14)$$

where f is the frequency in MHz, and h_r is the height of the receiver antenna. This expression is used for terrain types A and B. For terrain C, the blow expression is used.

$$X_h = -20 \log \left(\frac{h_r}{2000} \right) \quad (15)$$

$$S = 0.65 (\log(f))^2 - 1.3\log(f) + \alpha \quad (16)$$

For rural and suburban environments (Terrain A and B):

$$\alpha = 5.2 \text{ dB.}$$

For urban environments (Terrain C): $\alpha = 6.6 \text{ dB.}$ [15]

» III. Metodología

Shown in Figure 3 is the block diagram in which the steps that were carried out to perform the power intensity measurements outside the Computer and Electronics Department were specified in order to later compare them with the propagation models.

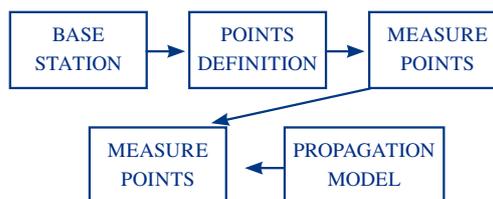


Fig. 3. Process Block Diagram

The Figure 4 shows the Movistar LTE base station located next to ESPOCH, with an EIRP of 46 dBm at coordinates -1.656432, -78.680327. The location is determined by the Network Cell Info Lite application, which allows you to identify it based on power intensity levels, taking as reference the criteria of shortest distance and highest power level. [16]



Fig. 4. Figure 4 Base Station

Show in Figure 5 the device used to measure the field strength (NARDA), obtaining a result of 0.5 v/m at a distance of 142 meters from the radio base, with the recommendation ITU-R P.525-4 the EIRP was determined from the electric field obtaining an EIRP of 52dBm.



Fig. 5. NARDA

The parameters of the transmitting antenna are shown in Table 5, where a frequency of 1940MHz.

TABLE 5: Base Station Parameters.

Parameter	Value
Operator	Movistar
Frequency	1940 MHz
Band	2
Latitude	1°39'23.2"S
Length	78°40'49.2"W
Height	20 m

Knowing the location of the base radio, 14 radios were plotted obtaining a total of 145 points covering all the exteriors of the Department of Informatics and Electronics in which the measurements of the receiving power were taken, Google Earth was used to mark the 14 radios shown in Figure 6 .



Figure 7. LOCATION OF POINTS

The distances of the radios are shown in Table 6. The distance from the transmitting antenna to the outer space of the Department of Computer Science and Electronics was considered. The number of radios was determined to cover all this area, obtaining a total of 14 radios.

TABLE 6: SPOKE DISTANCES

Radios	Distance (m)	Average power measured (dBm)
1	284.25	-89
2	303.98	-90
3	324.35	-91.33333
4	344.09	-92.33333
5	364.30	-93
6	384.81	-95
7	403.93	-97
8	423.67	-96
9	443.88	-96.33333
10	463.77	-96.33333
11	483.67	-96.66666
12	503.72	-97
13	523.61	-67.66666
14	543.83	-99.33333

To obtain the measurements of the power intensity levels at each point, the Network Cell Info Lite application was used. Three measurement campaigns were carried out at similar times and in similar scenarios to analyze the power variations in each campaign. This allowed obtaining an average value of the power intensity at each point. Figure 7 shows the results of the three measurement campaigns carried out on different days of the week in the Computer and Electronics Department. In the campaigns, the relationship between power and distance is observed without the presence of factors affecting the measurements in open spaces. In each of the campaigns it was analyzed how the power varies as the distance increases.

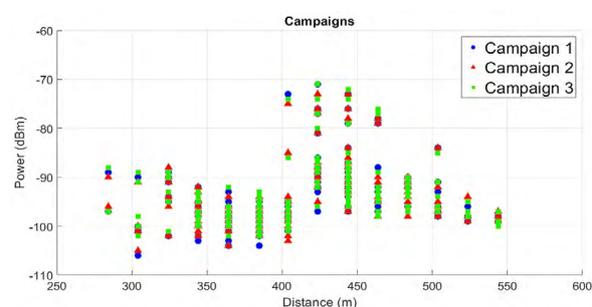


Figure 6. Results Campaigns

A. Log-distance Model

In this propagation model, equation 1 was used, which depends on data shown in Table 6. Substituting the values in the equation, the results in terms of n could be obtained. This process was applied to the 14 radii, then the mean square error was calculated, which is the sum of squared errors divided by the number of measurements. Once this process was completed, an equation was obtained for the mean squared error which is a function of n to minimize the mean squared error, the mean squared error was derived and equaled to zero, resulting in the optimum value of n, which in this case is n = 3.6395. And with this value determine the powers calculated for each radius.

B. Cost 231 Walfish-Ikegami Model

The Cost 231 Ikegami model was designed using a frequency of 1940 MHz, with a transmitting antenna located at a height of 20 meters and a receiving antenna at a height of 1.5 meters. To obtain more accurate data, the IT and Electronics department was divided into two scenarios, and measurements were taken to determine the

average width of the streets and the average height of the buildings. These additional parameters were considered in order to improve the accuracy of the results and allow a more appropriate comparison with other available models. In the model, an Equivalent Isotropic Radiated Equivalent Radiated Power (EIRP) of 52 dBm was used, while the receiver gain was estimated at 2 dBi. Taking into account these additional parameters and performing measurements in the two scenarios mentioned above, a higher accuracy in the results and a better application in similar scenarios is achieved. I am sorry for the above confusion and hope this answer is clearer and more accurate.

C. Ericsson 9999 Model

The current model was developed using a frequency of 1940 MHz, with a transmit antenna height of 20 m and a receive antenna height of 1.5 m. In addition, an EIRP (Equivalent Isotropic Radiated Power) of 52 dBm and a receiver gain of 2 dBi were found. It is important to highlight that in this model the specific parameters of a suburban environment that are shown in the table 1 have been taken into account.

D. Erceg Model

This model was developed using a frequency of 1940 MHz, with a transmitting antenna height of 20 m and a receiving antenna height of 1.5 meters. The effective isotropically radiated power (EIRP) has a value of 52 dBm and the receiver gain is 2 dBi. It should be noted that this model takes into account the parameters established in Table 2 and Table 3, specifically in Table 3, For the Faculty of Computer Science and Electronics it was ruled that it is a suburban environment, based on that category C is used (density of light trees and flat terrain).

E. SUI Model

The model developed was based on a frequency of 1940 MHz, with a transmitting antenna located at a height of 20 meters and a receiving antenna at a height of 1.5 meters. The EIRP used was 52 dBm and the receiver gain was set to 2 dBi. It is important to note that additional parameters specific to a suburban environment were considered in this model, such as the 5.2 dB attenuation due to the presence of obstacles and other factors. These additional considerations may affect the results

obtained, which explains the differences with the initial expectations.

» IV. Analysis of Results

A comparison between different propagation models, including Log-Distance, Erceg, Ericsson 9999, SUI and the Walfish-Ikegami model, along with the average measured values, is presented in Figure 8. The figure is divided into two categories: points with direct line of sight and points without direct line of sight.

The results reveal that generally points with direct line of sight present better average power values compared to points without line of sight. It is observed that the maximum value recorded is -104 dBm, while the minimum value is -71.7 dBm.

In terms of the fit of the models to the scenario, it was determined that the Erceg model fits more accurately to the measurements made. The mean square error (MSE) was used to evaluate the quality of the models' fit, and the Erceg model obtained the lowest MSE, with a value of 3.62, compared to the other models.

On the other hand, the Ericsson 9999 model tends to overestimate the values in relation to the measurements made, which implies that it predicts mean powers higher than those observed. In contrast, the SUI model underestimates the values, i.e., it predicts mean powers lower than those observed. The Walfish-Ikegami model also shows some degree of fit to the scenario, although not as accurate as the Erceg model.

These results emphasize the importance of selecting an appropriate propagation model to improve accuracy in the planning and optimization of telecommunication networks. In this case, the Erceg model proved to be the most suitable for the evaluated scenario due to its adjustment capacity and accuracy in predicting propagation losses.

In summary, the Erceg model more accurately fits the measured data in this scenario, showing better agreement with the observed mean powers. This indicates that the Erceg model is able to more accurately capture the propagation characteristics in the specific environment evaluated. On the other hand, both the SUI model and the Ericsson 9999 model show discrepancies compared to the measured mean powers. These discrepancies can be attributed to the limitations and simplifications inherent in these models. The SUI model, despite its versatility and adaptability, may overlook environment-specific

factors and oversimplify certain propagation effects, resulting in less accurate predictions. In addition, the Ericsson 9999 model may have limited accuracy in scenarios with variable terrain, dense vegetation, or natural obstacles, leading to less accurate estimates, especially in suburban environments similar to the present study.

► V. References

- [1] J. Gallagher, «Fifth-Generation (5G) Telecommunications Technologies: Issues for Congress,» Congressional Research Service, 2019.
- [2] G. González, D. Prado, F. Marante y A. Ledesma, «Analysis of LTE and LTE-Advanced system features through simulation processes,» *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 25, n° 3, 2017.
- [3] A. Gillis, «LTE (Long-Term Evolution),» TechTarget, 2023.
- [4] J. Gomez y J. Zorro, «Unbosque,» Mayo 2019. [En línea]. Available: <https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/10265/Estudio%20comparativo%20entre%205%20modelos%20de%20propagaci%C3%B3n%20de%20la%20red%204g%20Lte-A%20en%20diferentes%20ambientes%20de%20la%20ciudad%20de%20Bogot%C3%A1?sequence=1>. [Último acceso: julio 2023].
- [5] H. Moreno, D. Moreno, A. Flores y J. Ribadeneira, «Análisis comparativo de modelos de propagación en la telefonía móvil en la banda de 1900 MHz (LTE) a través de mediciones de campo eléctrico en la ciudad de Ambato,» *MAskay*, vol. 13, n° 2, pp. 1-8, 2023.
- [6] E. Ponce, J. Ledesma, R. Puchaicela y K. Miraba, «Estudio comparativo de modelos de propagación con el análisis de la intensidad de la señal LTE de las estaciones base con el área de cobertura en Riobamba -Ecuador,» *Coinciencia Digital*, vol. 5, n° 3, 2022.
- [7] J. Torres, Á. Pinto-Mangones, M. Macea, N. A. Pérez y L. Rujano, «MODELO PARA LA ESTIMACIÓN DE LAS PÉRDIDAS,» *UNIVERSIDAD, CIENCIA y TECNOLOGÍA V*, vol. 20, n° 78, pp. 1-12, 2016.
- [8] B. Vique, M. Escobar, A. Proaño, C. Bayas y A. Infante, «Comparación de modelos de propagación de radio en cinco celdas de cobertura LTE de Riobamba - Ecuador,» *Revista Tecnológica Espol*, vol. 34, n° 3, pp. 171-190, 2022.
- [9] J. d. C. V. Calero, «Universidad Tecnica de Amabto,» 12 2015. [En línea]. Available: https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/19382/1/Tesis_t1094ec.pdf. [Último acceso: junio 2023].
- [10] L. Aguilar, «Walfisch Bertoni model,» 7 septiembre 2010. [En línea]. Available: <https://pt.slideshare.net/eliche04/modelo-de-walfisch-bertoni>. [Último acceso: junio 2023].
- [11] K. M. R. Jiménez, «ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/132244/D-CD106670.pdf>. [Último acceso: mayo 2023].
- [12] Erceg, Greenstein y Tjandra, «An Empirically Based Path Loss Model for Wireless Channels in Suburban Environments,» *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 17, n° 12, pp. 1205--1211, 1999.
- [13] IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, «Channel Models for Fixed Wireless Applications,» Contribution to 802.16a, 2003. [En línea]. Available: http://wirelessman.org/tga/docs/80216a-03_01.pdf. [Último acceso: mayo 2023].
- [14] A. Barrios, R. Arjona y R. Alvarez, «COMPARISON OF RADIO PROPAGATION MODELS IN THE SUBURBAN,» *Revista Colombiana de*, vol. 32, n° 32, 2018.
- [15] N. Shabbir, M. T. Sadiq, H. Kashif y R. Ullah, «Comparison of radio propagation models for long term evolution (LTE) network,» 2011. [En línea]. Available: https://elearning.esPOCH.edu.ec/pluginfile.php/1518137/mod_resource/content/1/1110.1519.pdf. [Último acceso: junio 2023].
- [16] N. Shabbir, «Comparison of radio propagation models for long term evolution (LTE) network - Ecuador,» *International Journal of Next-Generation Network*, 2011.
- [17] L. Yopez y M. Gragirena, «Corroboración del modelo de propagación “indoor”,» X

- JORNADAS DE INVESTIGACION , pp. 64-67, 2012.
- [18] C. Valero, «adslzone.net,» 21 04 2016. [En línea]. Available: <https://www.adslzone.net/2016/04/21/la-tecnologia-lte-pro-nos-hara-mas-corta-la-espera-del-5g-volando-1-gbps-movil/>. [Último acceso: 15 06 2023].
- [19] A. Galo, J. Gusñay , M. Ovaco, A. Puma y A. Uvidia, «Comparative analysis of propagation path loss models,» MASKAY, vol. 13, n° 1, 2022.
- [20] D. Curipoma y C. Macas, «UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA,» enero 2019. [En línea]. Available: <https://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/20.500.11962/23844/1/Curipoma%20Hernandez%20Danny%20Fabian%20y%20Macas%20Malan%20Carlos%20Andr%C3%A9.pdf>. [Último acceso: 06 2023].

GAMIFICACIÓN PARA LA INNOVACIÓN DE LA EDUCACIÓN: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA LITERATURA

Gamification for Educational Innovation: A Systematic Literature Review

María Augusta Cáceres Hidalgo	macaceresh@pucesa.edu.ec
Teresa Milena Freire Aillón	tfreire@pucesa.edu.ec

Departamento de Posgrado
Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ambato
Ambato, Ecuador.

RESUMEN

La gamificación nace como una herramienta de innovación educativa con la finalidad de mejorar las competencias en la educación. En este trabajo se propone llevar a cabo una revisión sistemática de la literatura, centrándose en investigaciones que hayan explorado los efectos de esta técnica de aprendizaje en estudiantes de secundaria y universitarios. Se utilizó el método de Kitchenham & Carters con el planteamiento de tres preguntas directrices, en base a aspectos como enfoques, metodologías y aportes al proceso enseñanza-aprendizaje. En efecto, tras aplicar criterios de inclusión y exclusión, se identificaron 26 documentos relevantes provenientes de las bases de datos electrónicas de IEEE, Springer y ScienceDirect, recopilados durante los últimos 5 años. Los resultados apuntan a que la gamificación es una herramienta valiosa para la innovación educativa puesto que promueve la motivación, el compromiso, el aprendizaje activo, la retroalimentación inmediata, la colaboración y la personalización.

Palabras Clave: Gamificación, enseñanza, aprendizaje, educación, innovación.

ABSTRACT

Gamification was born as an educational innovation tool to improve skills in education. This paper proposes to carry out a systematic review of the literature, focusing on research that has explored the effects of this learning technique on high school and university students. The Kitchenham & Carters method was used with the formulation of three guiding questions, based on

aspects such as approaches, methodologies, and contributions to the teaching-learning process. Indeed, after applying inclusion and exclusion criteria, 26 relevant documents were identified from the electronic databases of IEEE, Springer and ScienceDirect, collected during the last 5 years. The results suggest that gamification is a valuable tool for educational innovation since it promotes motivation, commitment, active learning, immediate feedback, collaboration, and personalization.

Palabras Clave: Gamification, teaching, learning, education, innovation.

► I. Introducción

La innovación en educación ha sido un tema de gran interés durante las últimas décadas. La importancia y la urgencia de la innovación educativa son claramente reconocidas por la amplia audiencia, incluida la sociedad, los académicos, los políticos y las empresas. Las innovaciones educativas son definidas como cualquier técnica de enseñanza novedosa, estrategia, herramienta o recurso de aprendizaje que pueda ser utilizado por un instructor para conducir a técnicas de instrucción efectivas o prometedoras que beneficien el aprendizaje y la participación de los estudiantes [1]. Por ejemplo, la gamificación en educación podría ser una forma de innovación de servicios y la gamificación de los procesos educativos requiere cambiar los procesos subyacentes que brindan el servicio, en particular, la creación de infraestructura, alteración de la matriz de

evaluación y estudiantes con más poder para elegir. Esto indica claramente que la gamificación y la innovación son complementarias entre sí [2].

La gamificación surge a finales del siglo XXI como una poderosa herramienta de innovación educativa, captando la atención de una amplia gama de profesionales e investigadores. Se reconoce como una estrategia eficaz para desarrollar habilidades emocionales, cognitivas y sociales, alentando el cambio de comportamiento y fomentando la productividad [3]. Es así como los educadores están interesados en nuevas formas de aumentar la motivación y estimular la participación de los estudiantes. Un estudiante comprometido aprende más rápido y retiene mejor la información aprendida.

Junto con el surgimiento de tecnología en las aulas, se ha visto un aumento en el aprendizaje basado en el juego como un mecanismo para unir un aspecto que los estudiantes aman (jugar videojuegos) con el logro de objetivos pedagógicos. La comprensión del aprendizaje basado en juegos ha evolucionado significativamente en los últimos años y el uso de juegos dentro del aula ahora es común. Más allá de esto, actualmente se ve a la gamificación como una nueva vía de investigación para emplearla en la educación. Al considerar la gamificación en un contexto de aprendizaje, el interés es explorar cómo las ideas de acumular puntos, establecer y alcanzar objetivos, trabajar en equipos competitivos y recibir recompensas, se puede utilizar como un mecanismo para estimular la participación de los estudiantes e impulsar el logro de los objetivos de aprendizaje [4].

Las personas, el conocimiento, los procesos y la tecnología son elementos fundamentales en la innovación educativa debido a su relevancia y contribución en el proceso de transformación educativa. Las personas, tanto estudiantes como docentes, son los protagonistas del proceso de aprendizaje y su participación activa y comprometida es esencial para impulsar la innovación. El conocimiento, entendido como el conjunto de contenidos curriculares y habilidades necesarias adquiridas a través del proceso de aprendizaje, constituye la base fundamental para lograr un aprendizaje más efectivo. Este conocimiento es crucial para generar mejoras significativas en el nivel de entendimiento de los estudiantes, promoviendo

un aprendizaje más profundo y significativo. Los procesos pedagógicos, incluyendo las metodologías, enfoques, estrategias y actividades utilizadas en el aula, permiten la creación de entornos de aprendizaje estimulantes que fomentan el pensamiento crítico, la creatividad y la colaboración. Por último, la tecnología, con su amplio abanico de herramientas digitales, plataformas y recursos, brinda nuevas posibilidades y oportunidades para personalizar el aprendizaje, acceder a información actualizada y promover la interactividad en el aula. En conjunto, estos elementos interactúan y se complementan, generando un entorno educativo innovador y efectivo que prepara a los estudiantes para enfrentar los desafíos del siglo XXI y promueve un aprendizaje significativo y en constante evolución [5].

Esta revisión sistemática de la literatura identifica enfoques y metodologías basadas en gamificación para la educación, con el fin de evidenciar lo que se ha producido hasta el momento. En la estructura del presente trabajo, inicialmente se introduce al campo de estudio, en la siguiente sección se especifica la metodología de investigación utilizada para el análisis de la Gamificación para la Innovación educativa. Finalmente, se presenta las conclusiones.

► II. Metodología

En este estudio se aplicaron las pautas generales propuestas por [6] en base al proceso de revisión sistemática de la literatura, lo que permitió identificar, recolectar e interpretar evidencias empíricas sobre las preguntas de investigación formuladas. Las tres fases son: Planificación de la revisión, realización de la revisión y análisis de resultados. Estos se detallan a continuación.

A. Planificación de la revisión

El propósito de este artículo es ofrecer una revisión de la literatura que se centra en el estudio de la Gamificación en la educación, con varios enfoques orientados a metodologías que tengan un aporte significativo para la innovación educativa para lo cual se plantearon las siguientes preguntas de investigación:

RQ1: ¿Qué enfoques basados en gamificación han sido estudiados en la educación?

RQ2: ¿Qué metodologías apoyadas en gamificación

han sido analizadas en la educación?

RQ3: ¿Cuál es el aporte de la gamificación en la innovación educativa?

Se utilizaron bases de datos electrónicas, que incluyeron áreas asociadas a la Ingeniería, Tecnología y Educación, mismas que se mencionan a continuación: IEEE, Springer y ScienceDirect. La estrategia de búsqueda se basó en tres aspectos: (a) enfoques, (b) metodologías, (c) o información general relacionados a "gamification & education" O "gamification & education & innovation". Para afinar la selección de las obras se aplicaron criterios de inclusión y exclusión mostrados en la Tabla I.

TABLA 1: Criterios de selección

Inclusión	Exclusión
Artículos sobre enfoques basados en gamificación para la educación.	Artículos publicados en sitios web generales.
Artículos sobre metodologías basadas en gamificación para la educación.	Artículos que no generen un aporte sólido a las preguntas de investigación.
Artículos sobre gamificación e innovación en la educación.	Tesis, blogs y editoriales.

B. Realización de la revisión

En esta fase se seleccionaron los artículos en base a los criterios de inclusión y exclusión, además se revisaron los títulos de los artículos, contenido y conclusiones, lo que permitió determinar la contribución de éstos a las preguntas de investigación planteadas. Como resultado de la búsqueda se identificaron 74 documentos de los cuales se seleccionaron 26, los mismos que cumplían con los criterios establecidos, expuestos en la Fig. 1.

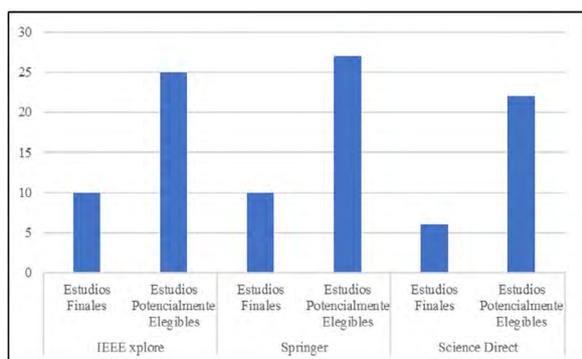


Fig. 1. Typical NLOS Propagation Scenario Top view [8]

C. Análisis

En base a los documentos analizados en este artículo, los aportes han sido significativos permitiendo abordar las tres preguntas de investigación relacionadas con enfoques, metodologías y contribuciones de la gamificación en la innovación educativa.

En la Tabla II, se lleva a cabo una evaluación del impacto de enfoques gamificados identificados sobre los elementos fundamentales de la innovación educativa mencionados en la introducción, como son las personas, el conocimiento, los procesos y la tecnología. Esta evaluación proporciona una visión sobre cómo la gamificación puede influir en cada uno de estos elementos, y cómo su implementación puede promover mejoras significativas en la educación.

RQ1: ¿Qué enfoques basados en gamificación han sido estudiados en la educación?

Entre los trabajos encontrados se observa el [7], que plantea un enfoque basado en gamificación para mejorar la motivación de un curso, se utilizaron herramientas tecnológicas del paquete de Google. Esta propuesta se la denomina "Marketplace", que busca entregar puntos por la realización de distintas actividades como: participación en clases, desarrollo de tareas, y más; estos puntos son canjeados por distintos artículos definidos por el docente como: realizar evaluaciones en parejas, décimas adicionales en evaluaciones, entre otros. Para evaluar los resultados se utilizaron los dos primeros niveles del Modelo de Kirkpatrick (Reacción/Motivación y Aprendizaje) lo que logró aumentar la motivación y condujo de mejor manera el aprendizaje de los estudiantes mientras que en el uso de herramientas TICS, el curso esperó una plataforma más robusta y tecnológica.

Los autores [8], presentaron el análisis del enfoque de gamificación sobre el aprendizaje de la historia de Malasia a través de una aplicación de juegos móviles llamada "History Learning Mobile Game" (HLMG). Se evaluó su efectividad a través de un estudio de grupo focal sobre la experiencia del usuario, historia, complejidad del juego, sesión de juego promedio, compromiso y contenido histórico entregado. Se tuvo como resultado que el contenido histórico entregado y la sesión de juego promedio fue excelente, mientras que la complejidad del juego y el compromiso fueron suficientes. HLMG mejoró la experiencia

de aprendizaje del estudiante, a través de una herramienta educativa efectiva y disponible, con incremento en la comprensión del estudiante sobre su programa de estudios.

La investigación [9], propone un enfoque de gamificación para la enseñanza y la educación de la “Enterprise Resource Planning” (ERP), se implementó un juego de simulación basado en la web que simula una compañía de bicicletas que tiene los siguientes procesos comerciales: ventas, adquisiciones, gestión de inventario y finanzas. Este enfoque se evaluó en un pequeño grupo de estudiantes universitarios con el uso de cuestionarios previos y posteriores donde se descubrió que los estudiantes tuvieron una mejor comprensión de los conceptos de ERP después de usar el juego.

El trabajo [10], propone un enfoque de gamificación para ayudar a los estudiantes a comprender completamente el problema de minimax/ maximin (método de teoría de decisiones) mientras juegan. El desarrollo se realizó mediante el uso del software Android Studio, y busca la motivación de los jugadores (alumnos) involucrándolos con alguna tarea relacionada con el problema de minimax (maximin) y comprometiéndolos más para que logren dominar el contenido, después de completar cada tarea, cada jugador obtiene una recompensa por sus logros en el juego. El estudio se lo evaluó con dos grupos, el primer grupo fue gamificado mientras que el segundo grupo siguió el método tradicional de enseñanza en pizarra, los resultados arrojaron que la gamificación de minimax (maximin) mejoró la capacidad de aprendizaje de los usuarios y proporcionó un entorno claro y conciso.

Los autores [11], evaluaron la efectividad de un enfoque de gamificación basado en un juego de simulación llamado “Cities Skylines” para enseñar la disciplina de Planificación Urbana, la evaluación se la realizó a varios estudiantes mediante entrevistas profundas sobre su experiencia después de haber experimentado el juego, los hallazgos proporcionaron que los elementos del juego podrían ayudar a desarrollar habilidades específicas relevantes para la disciplina de planificación urbana, incluido el pensamiento crítico, la resolución de problemas y el pensamiento creativo, también podría ser una herramienta pedagógica efectiva para mejorar el conocimiento conceptual de los estudiantes, al

tiempo que aumenta la motivación y la satisfacción con respecto al proceso de aprendizaje.

Los investigadores [12], presentaron un enfoque de gamificación en las lecciones de matemáticas para analizar su influencia en los logros y emociones de los estudiantes, se utilizó la plataforma “Kahoot!”, y los resultados mostraron que la gamificación en las lecciones de matemáticas con Kahoot! siguen un proceso educativo efectivo y los estudiantes están más motivados y concentrados, sin embargo, su interés no está relacionado con las matemáticas, quizás se deba a que la plataforma no es tan robusta y tecnológica como otras.

En el trabajo [13], muestra un enfoque de gamificación basado en piezas “LEGO” en el curso de la Distribución Logística Internacional, cuyo objetivo fue identificar el papel de las áreas de compra, centros de distribución, logística, producción, costos y calidad. El juego simuló la línea de producción para construir un juguete, con el objetivo de, al final, entregar un producto final con piezas LEGO, también se utilizó una hoja de cálculo Excel para calcular los impuestos, aplicaciones como bloc de notas y whatsapp para escribir los números de código de las piezas a comprar, el resultado fue muy positivo porque los estudiantes pudieron entender que es posible asociar teoría y práctica en una actividad placentera enfocada a la profundización del conocimiento y con nuevas dinámicas al aula, sin embargo el uso de tecnologías más robustas dentro de la gamificación hará que el juego sea aún más atractivo.

En la investigación [14], evaluaron el grado de satisfacción y percepción de un enfoque de gamificación con Instagram basado en un juego educativo para el aprendizaje de los estudiantes de enfermería, el juego fue un complemento de las actividades en clase de Dietética y Nutrición, y fue alojado en un canal de Instagram, el objetivo era dar consejos de dieta y nutrición para ayudar a los astronautas a elegir alimentos adecuados para realizar actividades como una caminata espacial para reparar la estación, todos los días se subían desafíos de preguntas a una historia de Instagram relacionado con el contenido de esa semana con la posibilidad de ganar puntos dentro del juego, una vez terminado el período se realizaban comentarios, se publicaban los puntos ganados y la clasificación de los participantes, al final los ganadores se convertían en astronautas

en entrenamiento. La mayoría de los encuestados mencionaron que el juego basado en Instagram les ayudó a consolidar su conocimiento, aprender sobre el contenido del tema y comprender conceptos del tema, también se señaló que habían disfrutado la experiencia y que los motivó a aprender más.

Finalmente, en el trabajo [15], evaluaron la experiencia lúdica de los estudiantes de un curso de enfermería en la disciplina Enfermería en Salud Comunitaria II mientras jugaban un juego de sala de escape. El juego gira en torno a un estudio de caso que ilustra los efectos de un derrame cerebral, los acertijos y las pruebas se organizaron de tal manera que un desafío llevó al siguiente. El caso comenzó con un resumen del historial clínico del paciente y una llamada telefónica de la hija del paciente reprodujo el sistema de sonido en el aula, después los estudiantes tuvieron que romper un código para acceder al historial clínico completo del paciente, completar un genograma, realizar una evaluación del paciente y sus familiares, identificar 5 problemas de atención médica y 3 necesidades de enfermería, una vez que se completaron estas tareas, se abrió la puerta del aula y se permitió a los estudiantes salir de la habitación. Inmediatamente después del final de la actividad, los estudiantes completaron individualmente una encuesta sobre la actividad, donde los resultados arrojaron que el juego de sala de escape hizo que el aprendizaje fuera atractivo y divertido incentivando a los estudiantes y ayudando a recordar y aplicar el contenido teórico a un estudio de caso hipotético para salir de la sala y terminar el juego, también promovió el uso de habilidades importantes como trabajo en equipo, pensamiento crítico y resolución de problemas.

TABLA 2: Evaluación de enfoques gamificados para la innovación.

Referencias	Personas	Conocimiento	Procesos	Tecnología
[7][12]	✓	x	✓	x
[8][10][11]	✓	✓	✓	✓
[9]	x	✓	✓	✓
[13][14][15]	✓	✓	✓	x

Para RQ2 se evaluó el impacto de las metodologías gamificadas identificadas, las cuales de resumen en la tabla III.

RQ2: ¿Qué metodologías apoyadas en gamificación han sido analizadas en la educación?

Entre las metodologías encontradas está el trabajo [16], que propone un proceso metodológico que aprovecha la gamificación a través de una “Artificial Neural Network” (ANN) con un método de enseñanza basado en competencias apoyado en la “Theory of Planned Behaviour” (TPB) para motivar a los estudiantes a desarrollar habilidades y competencias requeridas para que enfrenten los desafíos actuales. La metodología consiste en utilizar elementos de gamificación específicos asociados a las creencias presentadas en el modelo TPB para crear una intención de comportamiento que, como consecuencia, desarrollará una acción deseada. Este modelo será validado y evaluado posteriormente con una ANN y se espera que motive a los estudiantes y desarrolle sus competencias y subcompetencias transversales.

En la investigación [17], los autores presentaron una metodología para desarrollar y validar un marco de aprendizaje de programación basado en la gamificación. Este marco se construye con teorías de aprendizaje, elementos de juego y requisitos de aprendizaje de programación. La metodología se divide en tres fases, la fase de análisis, la fase de innovación y la fase de validación. La primera fase fue determinar los problemas de aprender un lenguaje de programación, las brechas relacionadas y la técnica de gamificación. En la segunda fase se tiene dos partes: el diseño, que se utiliza para determinar los elementos del juego, los requisitos de aprendizaje de programación y los requisitos del usuario, estos conducen a la construcción y validación del marco de gamificación utilizando el método de recorrido cognitivo. Esto es seguido por el prototipo de desarrollo de la interfaz de gamificación y la validación de la aplicación. La tercera es la fase de validación que consta en medir el marco de gamificación en su efectividad y motivación.

En el trabajo [18], los investigadores presentaron una metodología de enseñanza de la calidad de software a través de la gamificación y “Project Based Learning” (PBL), la metodología se dividió en: Macro visión: la aplicación del PBL para la estructura del experimento y Micro visión: El uso de la gamificación a través del desarrollo y la práctica de juegos de aprendizaje de calidad. Este proceso resultó en la implementación de tres juegos diferentes orientados al aprendizaje de la calidad del software y permitió una interacción activa de los estudiantes en la realización de las actividades, a través de una dinámica colaborativa

y con el incremento del interés de los estudiantes al darse cuenta de que el método aplicado permitió un mayor aprendizaje de contenido de calidad de software, en donde los estudiantes son productores de su propio conocimiento.

La investigación [19], propone una metodología para identificar perfiles a través del uso de actividades lúdicas y cuestionarios impulsados por la gamificación. La elección de actividades sigue información del público objetivo, como rango de edad, uso de teléfonos celulares, acceso a internet y otros datos. Se utiliza el marco “Octalysis” de Yu Kai-Chou para identificar y modelar el perfil del estudiante. Se aplicó el proceso a cuatro clases de dos escuelas públicas diferentes y los resultados indicaron las principales motivaciones de los estudiantes para el juego y se identificaron los perfiles de gamificación de los estudiantes para poder crear una base clara para proyectos de gamificación en los perfiles identificados. Actualmente, el juego está en proceso de implementación para recopilar más datos y validar el proyecto.

En [20], los autores presentaron una metodología innovadora llamada “Commercium & Cognitionis” que combina tecnología y gamificación pedagógica en la disciplina de lenguajes visuales y gráficos en un curso de periodismo. El objetivo es valorar el contenido didáctico y la interacción entre estudiantes a través de teléfonos inteligentes y se busca alinear la formación con la cultura tecnológica e imágética de los jóvenes. El estudio demuestra la falta de interés en la comunicación visual y la necesidad de un juego que combine competencia y colaboración. Durante el juego los estudiantes recibieron dos tarjetas semanales con QR Codes que les permitieron acceder a contenidos ocultos alojados en un sitio web, los mismos que contenían misiones cada semana y debían trabajar en grupo para cumplirlas. La adopción de este enfoque pedagógico mejoró la evaluación y construcción de conocimiento, la dedicación al juego tuvo un impacto positivo en la dedicación académica y estimuló el aprendizaje significativo y la independencia en el proceso educativo.

En la investigación [21], exponen un experimento que aborda la aplicación de gamificación en el proceso de aprendizaje con la metodología “Agile” en ingeniería de software. Se investigó el uso de Gamificación integrado con la metodología Agile la cual logra la calidad y la productividad a través de iteraciones en el desarrollo de

aplicaciones móviles a través de Android Studio. La investigación reveló diversos beneficios en cuanto a minimización de riesgos, productividad, garantía de calidad y lanzamiento a tiempo. Se creó un marco para incluir la gamificación en el ciclo de vida de la metodología Agile. Al usar “Gamification Agile” en el experimento, se logró aumentar la motivación, el compromiso de los estudiantes y la calidad del proyecto. También permitió evaluar al equipo individual y colectivamente.

Los autores [22], proponen un juego educativo llamado “ClassCraft” para apoyar un curso de programación, se hizo un estudio que compara su efectividad con la metodología tradicional. Durante el juego los estudiantes se dividen en equipos de 4 a 6 miembros y juegan como magos, guerreros o curanderos. Los estudiantes pueden ganar puntos de experiencia (XP) por comportamiento positivo en clase y perder puntos de salud (HP) por comportamiento negativo. Los puntos XP tienen efectos reales en el juego y en el equipo, mientras que los puntos HP afectan tanto al estudiante como al equipo. El juego se realiza en el laboratorio de computación de la escuela y el maestro usa un proyector de video y una herramienta de anuncio de clase de juego para recompensar o castigar a los estudiantes por su desempeño. El uso del juego en el aula contribuyó positivamente a aumentar la motivación, mejorar el comportamiento en el aula y formó una colaboración significativa. También los estudiantes involucrados en el juego dieron una sensación más lúdica y agradable al proceso de aprendizaje en comparación con el enfoque tradicional.

Los investigadores [23], evaluaron la percepción de los estudiantes sobre la implementación de una metodología que fusiona la gamificación con el aula invertida y la simulación clínica, se la llama “Gymkhana Room for Education and Evaluation in Nursing Studies” (GREENS). Todo comienza con la creación de equipos de trabajo y un entorno seguro. Después, se llevan a cabo pruebas teóricas y prácticas, y el equipo más eficiente se considera ganador y está exento de futuras preguntas en esa área. La evaluación teórica se llevó a cabo a través del aula invertida y la evaluación práctica se realizó a través de una simulación clínica. Después de cada prueba, los profesores brindaron retroalimentación y al final de la simulación, el equipo con el puntaje más alto recibió un certificado de ganador. Los resultados mostraron que se generó una alta satisfacción, motivación,

trabajo en equipo, aprendizaje, diversión y como herramienta de evaluación, hubo una ansiedad menor que el examen oral.

Por último, los autores [24], compararon la influencia de dos metodologías activas con gamificación para la enseñanza de contenidos de ciencias y matemáticas, basadas en “Escape Room – Breakout” (ERB), en el ERB de Ciencia, se cubrieron contenidos sobre el Universo, que incluyó el sistema solar, planetas, satélites, y conceptos matemáticos como densidad y diámetro. La actividad consistió en resolver varios desafíos, como un rompecabezas, completar una tabla, ver videos y responder preguntas, hacer un crucigrama, calcular densidades y construir un modelo del sistema solar. Cada desafío ayudó a los estudiantes a aprender y comprender los conceptos, mientras que, para el ERB de Matemáticas, se estudiaron temas sobre números y aritmética, que incluye la naturaleza de los números, sistemas numéricos y operaciones aritméticas. Los estudiantes completaron diferentes tareas, como buscar un enlace oculto en un texto, completar tablas aplicando descomposición de números, resolver una búsqueda de palabras y descifrar un código resolviendo problemas numéricos. La actividad final consistió en construir un cubo con piezas de Lego para medir el volumen y obtener la llave del laboratorio, comúnmente estas disciplinas son difíciles y han generado una sensación de rechazo, emociones y actitudes negativas entre los estudiantes. Los resultados muestran que hay un aumento significativo en las emociones positivas en ambos ERB, pueden aumentar la motivación, las emociones positivas, la alta autoeficacia y las actitudes positivas hacia estas disciplinas, también pueden mejorar el rendimiento de los estudiantes.

TABLA 3: Evaluación de enfoques gamificados para la innovación.

Referencias	Personas	Conocimiento	Procesos	Tecnología
[16][17]	✓	x	✓	x
[18][23][24]	✓	✓	✓	x
[19]	✓	x	x	x
[20]	✓	✓	✓	✓
[21][22]	✓	x	✓	✓

Finalmente, para RQ3, la evaluación del impacto de los aportes encontrados se puede ver en la tabla IV.

RQ3: ¿Cuál es el aporte de la gamificación en la innovación educativa?

Para esta pregunta los autores [4], proponen un marco de gamificación innovador que se incorpora en un “Learning Management Systems” (LMS) y se presenta el modelo “NEWTON-Enhanced Gamification Model (N-EGM). N-EGM combina elementos de juego con elementos de socialización. A pesar de los desafíos, el modelo N-EGM es efectivo para mejorar la experiencia de aprendizaje y el compromiso de los estudiantes, así como para aumentar el conocimiento adquirido por los estudiantes. Los resultados en un proyecto piloto implementado en una escuela secundaria demuestran la eficacia de la solución de gamificación propuesta.

En [25], describieron una metodología para el diseño y desarrollo de una aplicación móvil que ayuda a los estudiantes de secundaria a elegir su programa universitario que se adapte a sus habilidades e intereses con el fin de poder limitar los abandonos que pueden derivarse de una decisión inicial apresurada. Se basa en enfoques de innovación abierta e innovación abierta impulsados por los usuarios e involucra a estudiantes de secundaria y universitarios, los resultados recopilados de tales actividades han sido explotados en el desarrollo de la aplicación “MyAlmaOrienta”, la misma que incluye elementos de gamificación para atraer a la próxima generación de usuarios y motivarlos a participar.

La investigación [26], propone un juego de cartas centrado en la educación para la innovación, basado en el uso de roles “Role Playing Game” (RPG) para mejorar la colaboración y motivación de los estudiantes en un curso emparejados en equipos interdisciplinarios. Se realizó una interfaz para un juego educativo con elementos identificados en tres pantallas: perfil del jugador, tarjeta del jugador y tareas. El perfil del jugador muestra información personal, evaluación del jugador en tareas realizadas y su desempeño. La tarjeta del jugador muestra el desarrollo personal y las habilidades del jugador. La visibilidad de las tareas de cada miembro permitió una distribución equitativa de actividades en tareas grupales. La investigación mostró que el descubrimiento de habilidades y competencias de los estudiantes aumentó positivamente la motivación.

Los autores [27], utilizan la gamificación como una alternativa innovadora en la educación superior para mejorar el aprendizaje y acelerar la adquisición de habilidades en la enseñanza de la asignatura Fundamentos de Programación, en

este sentido, se presenta la aplicación “Funprog” que define un conjunto de niveles de juego y desafíos para los estudiantes, también les alienta a alcanzar sus objetivos otorgándoles premios durante el proceso de aprendizaje, los resultados de las encuestas denotan una clara aceptación de esta aplicación para que los estudiantes obtengan más conocimiento y mejoren sus habilidades.

Los investigadores [28], se enfocaron en el uso de la gamificación como una herramienta de aprendizaje estratégico en las clases virtuales para estudiantes universitarios de la disciplina de Educación Elemental. La gamificación se implementó mediante actividades en línea en plataformas como ClassDojo, Kahoot y Educaplay. La aplicación de la gamificación mejoró el rendimiento académico y la participación de los estudiantes. La metodología de “Analysis, Design, Development, Implementation and Evaluation” (ADDIE) fue utilizada para desarrollar los recursos y los resultados demostraron que la gamificación es una herramienta efectiva para mejorar el aprendizaje en línea y promover una mejor participación de los estudiantes.

En el trabajo [29], investigaron el impacto de la innovación educativa y la gamificación en un proyecto de implementación de software empresarial “Enterprise Resource Planning” (ERP). Para ello, se llevaron a cabo dos experimentos que se centraron en la cuarta fase del proyecto de la implementación, que es la capacitación y prueba, a los usuarios a capacitar se los dividieron en dos grupos, al primer grupo su capacitación incluyó diapositivas de power point y trabajar directamente en el producto ERP implementado mientras que, al segundo grupo se realizó, trabajo colaborativo, materiales digitales, enfoque combinatorio, técnicas de gamificación, pensamiento colectivo, los resultados demuestran que tanto la innovación educativa como la gamificación impactan positivamente la efectividad en los proyectos de implementación de software empresarial.

Los autores [30], investigaron los motivos que impulsan la intención de los estudiantes de utilizar una aplicación gamificada como una herramienta de aprendizaje complementaria en la educación en turismo. Para ello, crearon y probaron la aplicación "HegameApp", diseñada para motivar a los estudiantes con la implementación de estrategias de gamificación, tales como tablas de clasificación y medallas. Esto permite a los estudiantes

contribuir con diversos elementos, como artículos, noticias, videos, recursos web, teorías, entre otros, y al final alcanzar una puntuación de su desempeño. Los resultados indican que los factores hedonistas y sociales esperados tienen un impacto en la intención de los estudiantes de utilizar HegameApp, así como también la actitud hacia el aprendizaje y la innovación tiene un papel positivo y significativo en la intención de un estudiante de usar una aplicación gamificada.

Por último [31], exploró la eficacia de la gamificación para aumentar la retención de información, el estudio fue un análisis longitudinal con estudiantes de educación secundaria y terciaria y comparó varios talleres con el mismo contenido, pero diferentes diseños. Algunos de los talleres incluían elementos de gamificación mientras que otros no. Después de un proceso de prueba y perfeccionamiento a lo largo del tiempo, se descubrió que la gamificación tenía un impacto positivo en la retención de información. Se examinaron también los efectos moderadores de género y edad, pero no se encontraron diferencias significativas. Además, se descubrió que los efectos positivos de la gamificación en la educación van más allá de la mejora en la memoria, también contribuyen a mejorar habilidades sociales y prácticas como la resolución de problemas, la colaboración y la comunicación.

TABLA 4: Evaluación de gamificación para la innovación educativa.

Referencias	Personas	Conocimiento	Procesos	Tecnología
[4][27]	✓	✓	✓	✓
[25][26][30]	✓	x	✓	✓
[28][29]	✓	✓	✓	x
[31]	✓	✓	x	x

» III. Discusiones y Conclusiones

La gamificación es una herramienta efectiva para fomentar la innovación en la educación, es así como en este estudio y a través de la respuesta a la primera pregunta de investigación formulada (RQ1), se concluye que los enfoques encontrados en los trabajos [8][10][11] tienen un impacto positivo en todos los aspectos de innovación, la propuesta de gamificación influye directamente en las personas (estudiantes), así también en el conocimiento adquirido, mejora el proceso de enseñanza-aprendizaje con el uso de tecnología. Sin embargo, los trabajos [7][12][13][14][15] coinciden

en que el uso de tecnología más robusta, y en los casos en que no se utiliza, su implementación en el contexto de la gamificación haría que el proceso resulte aún más atractivo. (Tabla II).

Para la segunda pregunta (RQ2), la metodología [20] que combina tecnología y gamificación pedagógica tiene una influencia positiva sobre las personas y el conocimiento. Mientras que la investigación [19] se enfoca únicamente en el individuo, por otro lado, los trabajos [16][17][21][22] no prestan mucha atención al conocimiento adquirido por los estudiantes y tampoco hacen uso de tecnología que resulte llamativa, aunque sí utilizan tecnología [21][22] (Tabla III).

Finalmente, para la tercera pregunta (RQ3) los trabajos [4][27], contribuyen positivamente en el individuo, al preocuparse por el desarrollo de conocimientos y mejora de habilidades, convirtiendo el proceso educativo en una experiencia divertida y atractiva gracias al uso de tecnología; sin embargo, en cuanto se refiere a conocimiento [25][26] [30] no se centran en este aspecto, por otra parte [28][29] [31] carecen del uso de tecnología o no logran que esta sea lo suficientemente estimulante (Tabla IV).

En general, al incorporar elementos de juegos en el proceso de aprendizaje, se incrementa la motivación en los estudiantes, mejora su compromiso y aumenta su interés por el tema en cuestión. La gamificación también ayuda a los estudiantes a desarrollar habilidades importantes, como la resolución de problemas, la colaboración y la toma de decisiones, también mejora los conocimientos adquiridos durante el proceso de enseñanza-aprendizaje. Al mismo tiempo, la gamificación proporciona a los educadores una forma más efectiva de evaluar el progreso de los estudiantes y ajusta sus estrategias de enseñanza en consecuencia. En cuanto al uso de tecnología y lo encontrado en la literatura, la mayoría de los estudiantes prefieren el uso de tecnología más robusta y desarrollada.

Sin embargo, del análisis realizado, es importante tener en cuenta que la gamificación no es una solución mágica para todos los desafíos de la educación. El éxito de la gamificación en la educación depende en gran medida de cómo se implementa y se adapta a las necesidades y objetivos específicos de cada estudiante y situación de enseñanza. En última instancia, la gamificación es una herramienta valiosa para la innovación en la

educación si se utiliza adecuadamente y se integra de manera efectiva en los procesos de enseñanza y aprendizaje.

► IV. References

- [1] Z. Yordanova, «Gamification for Handling Educational Innovation Challenges», *Digital Transformation of the Economy: Challenges, Trends and New Opportunities*, pp. 529-541, 2020, doi: 10.1007/978-3-030-11367-4_53. Yordanova, Z. (2020). Gamification for Handling Educational Innovation Challenges. *Digital Transformation of the Economy: Challenges, Trends and New Opportunities*, 529–541. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11367-4_53
- [2] A. Shpakova, V. Dörfler, y J. MacBryde, «The role(s) of gamification in knowledge management», en *EURAM 2016: 16th Annual Conference of the European Academy of Management*, FRA, jun. 2016, pp. 1-40. Accedido: 6 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://strathprints.strath.ac.uk/56368/Shpakova, A., Dörfler, V., & MacBryde, J. \(2016\). The role\(s\) of gamification in knowledge management. EURAM 2016: 16th Annual Conference of the European Academy of Management, 1–40. <https://strathprints.strath.ac.uk/56368/>](https://strathprints.strath.ac.uk/56368/Shpakova,A.,Dörfler,V.,&MacBryde,J.(2016).The%20role(s)%20of%20gamification%20in%20knowledge%20management.EURAM%202016:%2016th%20Annual%20Conference%20of%20the%20European%20Academy%20of%20Management,%201-40.%20https://strathprints.strath.ac.uk/56368/)
- [3] L. Sardi, A. Idri, y J. L. Fernández-Alemán, «A systematic review of gamification in e-Health», *Journal of Biomedical Informatics*, vol. 71, pp. 31-48, jul. 2017, doi: 10.1016/j.jbi.2017.05.011. Sardi, L., Idri, A., & Fernández-Alemán, J. L. (2017). A systematic review of gamification in e-Health. *Journal of Biomedical Informatics*, 71, 31–48. <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2017.05.011>
- [4] D. Zhao et al., «An Innovative Multi-Layer Gamification Framework for Improved STEM Learning Experience», *IEEE Access*, vol. 10, pp. 3879-3889, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3139729. Zhao, D., Playfoot, J., De Nicola, C., Guarino, G., Bratu, M., Di Salvatore, F., & Muntean, G.-M. (2022). An Innovative Multi-Layer Gamification Framework for Improved STEM Learning Experience. *IEEE Access*, 10, 3879–3889. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3139729>

- [5] M. J. V. Ledo, «Innovación educativa». Vidal Ledo, M. J., Miralles Aguilera, E. de los Á., Morales Sánchez, I. del R., Gari Calzada, M., Vidal Ledo, M. J., Miralles Aguilera, E. de los Á., Morales Sánchez, I. del R., & Gari Calzada, M. (2022). *Innovación educativa. Educación Médica Superior*, 36(3). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0864-21412022000300019&lng=es&nrm=iso&lng=es
- [6] B. Kitchenham, «Procedures for Performing Systematic Reviews», 2004. Kitchenham, B. (2004). *Procedures for Performing Systematic Reviews*.
- [7] S. Diaz, J. Diaz, y D. Ahumada, «A Gamification Approach to Improve Motivation on an Initial Programming Course», en 2018 IEEE International Conference on Automation/XXIII Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA), Concepcion: IEEE, oct. 2018, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICA-ACCA.2018.8609701. Diaz, S., Diaz, J., & Ahumada, D. (2018). A Gamification Approach to Improve Motivation on an Initial Programming Course. 2018 IEEE International Conference on Automation/XXIII Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA), 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICA-ACCA.2018.8609701>
- [8] W. S. Yue y C. Y. Ying, «The Evaluation Study of Gamification Approach in Malaysian History Learning via Mobile Game Application», en 2017 IEEE 17th International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT), Timisoara, Romania: IEEE, jul. 2017, pp. 150-152. doi: 10.1109/ICALT.2017.69. Yue, W. S., & Ying, C. Y. (2017). The Evaluation Study of Gamification Approach in Malaysian History Learning via Mobile Game Application. 2017 IEEE 17th International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT), 150-152. <https://doi.org/10.1109/ICALT.2017.69>
- [9] P. Munogee, H. Moctaram, y Z. Cadarsaib, «Using a Gamification Approach to teach ERP in Higher Education», en 2019 Conference on Next Generation Computing Applications (NextComp), Mauritius: IEEE, sep. 2019, pp. 1-6. doi: 10.1109/NEXTCOMP.2019.8883612. Munogee, P., Moctaram, H., & Cadarsaib, Z. (2019). Using a Gamification Approach to teach ERP in Higher Education. 2019 Conference on Next Generation Computing Applications (NextComp), 1-6. <https://doi.org/10.1109/NEXTCOMP.2019.8883612>
- [10] S. N. Lone, B. Pandey, y A. Khamparia, «Minimax (Maximin) with Special Approach of Gamification in Higher Education», *ICT Based Innovations*, pp. 11-22, 2018, doi: 10.1007/978-981-10-6602-3_2. Lone, S. N., Pandey, B., & Khamparia, A. (2018). Minimax (Maximin) with Special Approach of Gamification in Higher Education. *ICT Based Innovations*, 11-22. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6602-3_2
- [11] T. A. Khan y X. Zhao, «Perceptions of Students for a Gamification Approach: Cities Skylines as a Pedagogical Tool in Urban Planning Education», en *Responsible AI and Analytics for an Ethical and Inclusive Digitized Society*, Springer, Cham, 2021, pp. 763-773. doi: 10.1007/978-3-030-85447-8_64. Khan, T. A., & Zhao, X. (2021). Perceptions of Students for a Gamification Approach: Cities Skylines as a Pedagogical Tool in Urban Planning Education. *Responsible AI and Analytics for an Ethical and Inclusive Digitized Society*, 763-773. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85447-8_64
- [12] M. Stoyanova, D. Tuparova, y K. Samardzhiev, «Gamification in 11th Grade Mathematics Lessons – One Possible Interactive Approach», en *Interactive Collaborative Learning*, Springer, Cham, 2017, pp. 41-53. doi: 10.1007/978-3-319-50340-0_4. Stoyanova, M., Tuparova, D., & Samardzhiev, K. (2017). Gamification in 11th Grade Mathematics Lessons – One Possible Interactive Approach. *Interactive Collaborative Learning*, 41-53. https://doi.org/10.1007/978-3-319-50340-0_4
- [13] R. Vescovi Bassani, «Gamification with Lego in Higher Education: Experience in the Course of Logistic Distribution», en *Learning and Collaboration Technologies. Learning and Teaching*, Springer, Cham, 2018, pp. 211-224. doi: 10.1007/978-3-319-91152-6_17. Vescovi Bassani, R. (2018). Gamification with Lego in Higher Education: Experience in the Course of Logistic Distribution. *Learning and*

- Collaboration Technologies. Learning and Teaching, 211–224. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91152-6_17
- [14] A. Rosa-Castillo, O. García-Pañella, E. Maestre-Gonzalez, A. Pulpón-Segura, A. Roselló-Novella, y M. Solà-Pola, «Gamification on Instagram: Nursing students' degree of satisfaction with and perception of learning in an educational game», *Nurse Education Today*, vol. 118, p. 105533, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nedt.2022.105533>. Rosa-Castillo, A., García-Pañella, O., Maestre-Gonzalez, E., Pulpón-Segura, A., Roselló-Novella, A., & Solà-Pola, M. (2022). Gamification on Instagram: Nursing students' degree of satisfaction with and perception of learning in an educational game. *Nurse Education Today*, 118, 105533. <https://doi.org/10.1016/j.nedt.2022.105533>
- [15] A. Anguas-Gracia, A. B. Subirón-Valera, I. Antón-Solanas, B. Rodríguez-Roca, P. J. Satústegui-Dordá, y F. Urcola-Pardo, «An evaluation of undergraduate student nurses' gameful experience while playing an escape room game as part of a community health nursing course», *Nurse Education Today*, vol. 103, p. 104948, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nedt.2021.104948>. Anguas-Gracia, A., Subirón-Valera, A. B., Antón-Solanas, I., Rodríguez-Roca, B., Satústegui-Dordá, P. J., & Urcola-Pardo, F. (2021). An evaluation of undergraduate student nurses' gameful experience while playing an escape room game as part of a community health nursing course. *Nurse Education Today*, 103, 104948. <https://doi.org/10.1016/j.nedt.2021.104948>
- [16] O. Mata, I. Mendez, M. Aguilar, P. Ponce, y A. Molina, «A Methodology to Motivate Students to Develop Transversal Competencies in Academic Courses Based on the Theory of Planned Behavior by using Gamification and ANNs», en 2019 IEEE Tenth International Conference on Technology for Education (T4E), Goa, India: IEEE, dic. 2019, pp. 174-177. doi: [10.1109/T4E.2019.00041](https://doi.org/10.1109/T4E.2019.00041). Mata, O., Mendez, I., Aguilar, M., Ponce, P., & Molina, A. (2019). A Methodology to Motivate Students to Develop Transversal Competencies in Academic Courses Based on the Theory of Planned Behavior by using Gamification and ANNs. 2019 IEEE Tenth International Conference on Technology for Education (T4E), 174–177. <https://doi.org/10.1109/T4E.2019.00041>
- [17] F. L. Khaleel, N. S. Ashaari, T. S. M. T. Wook, y A. Ismail, «Methodology for developing gamification-based learning programming language framework», en 2017 6th International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), Langkawi: IEEE, nov. 2017, pp. 1-6. doi: [10.1109/ICEEI.2017.8312378](https://doi.org/10.1109/ICEEI.2017.8312378). Khaleel, F. L., Ashaari, N. S., Wook, T. S. M. T., & Ismail, A. (2017). Methodology for developing gamification-based learning programming language framework. 2017 6th International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICEEI.2017.8312378>
- [18] T. C. dos Santos y R. B. Parizi, «Gamification and Project-Based Learning as Software Quality Teaching Methodologies», en 2019 38th International Conference of the Chilean Computer Science Society (SCCC), Concepcion, Chile: IEEE, nov. 2019, pp. 1-6. doi: [10.1109/SCCC49216.2019.8966397](https://doi.org/10.1109/SCCC49216.2019.8966397). dos Santos, T. C., & Parizi, R. B. (2019). Gamification and Project-Based Learning as Software Quality Teaching Methodologies. 2019 38th International Conference of the Chilean Computer Science Society (SCCC), 1–6. <https://doi.org/10.1109/SCCC49216.2019.8966397>
- [19] S. A. Andrade Freitas, A. R. T. Lacerda, P. M. R. O. Calado, T. S. Lima, y E. Dias Canedo, «Gamification in education: A methodology to identify student's profile», en 2017 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE), Indianapolis, IN: IEEE, oct. 2017, pp. 1-8. doi: [10.1109/FIE.2017.8190499](https://doi.org/10.1109/FIE.2017.8190499). Gamification in education: A methodology to identify student's profile. 2017 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE), 1–8. <https://doi.org/10.1109/FIE.2017.8190499>
- [20] J. L. Farbiarz, A. Farbiarz, G. Xavier, y C. M. Dias, «Gamification for Graphic Education: A Case Study on Innovative Methodology», en *Videogame Sciences and Arts*, Springer, Cham, 2019, pp. 208-219. doi: [10.1007/978-3-030-37983-4_16](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37983-4_16). Farbiarz, J. L., Farbiarz, A., Xavier, G., & Dias, C. M. (2019). Gamification for Graphic Education: A Case Study on Innovative Methodology.

- Videogame Sciences and Arts, 208–219. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37983-4_16
- [21] R. Al-Azawi, S. A. Joe, M. Al-Obaidy, y J. Westlake, «The Use of Gamification Technique in Agile Development Methodology», en *Learning Technology for Education Challenges*, Springer, Cham, 2019, pp. 3-13. doi: 10.1007/978-3-030-20798-4_1.
- [22] S. Papadakis y M. Kalogiannakis, «Using Gamification for Supporting an Introductory Programming Course. The Case of ClassCraft in a Secondary Education Classroom», en *Interactivity, Game Creation, Design, Learning, and Innovation*, Springer, Cham, 2018, pp. 366-375. doi: 10.1007/978-3-319-76908-0_35. Papadakis, S., & Kalogiannakis, M. (2018). Using Gamification for Supporting an Introductory Programming Course. The Case of ClassCraft in a Secondary Education Classroom. *Interactivity, Game Creation, Design, Learning, and Innovation*, 366–375. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76908-0_35
- [23] D. Jiménez-Rodríguez, T. Belmonte Garcia, y V. Arizo Luque, «Perception of nursing students about the implementation of GREENS© methodology in nursing studies», *Nurse Education Today*, vol. 92, p. 104495, sep. 2020, doi: 10.1016/j.nedt.2020.104495. Jiménez-Rodríguez, D., Belmonte Garcia, T., & Arizo Luque, V. (2020). Perception of nursing students about the implementation of GREENS© methodology in nursing studies. *Nurse Education Today*, 92, 104495. <https://doi.org/10.1016/j.nedt.2020.104495>
- [24] F. Yllana-Prieto, D. González-Gómez, y J. S. Jeong, «Influence of two educational Escape Room– Breakout tools in PSTs’ affective and cognitive domain in STEM (science and mathematics) courses», *Heliyon*, vol. 9, n.º 1, Art. n.º 1, ene. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e12795. Yllana-Prieto, F., González-Gómez, D., & Jeong, J. S. (2023). Influence of two educational Escape Room– Breakout tools in PSTs’ affective and cognitive domain in STEM (science and mathematics) courses. *Heliyon*, 9(1), e12795. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e12795>
- [25] S. Mirri, C. Prandi, N. Parisini, M. Amico, M. Bracuto, y P. Salomoni, «User-driven and open innovation as app design tools for high school students», en *2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Bologna: IEEE, sep. 2018, pp. 6-10. doi: 10.1109/PIMRC.2018.8580855. Mirri, S., Prandi, C., Parisini, N., Amico, M., Bracuto, M., & Salomoni, P. (2018). User-driven and open innovation as app design tools for high school students. *2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 6–10. <https://doi.org/10.1109/PIMRC.2018.8580855>
- [26] E. Carvalho, A. Eusebio, G. Ranoya, C. Araujo, y G. Ramalho, «A Proposal For Micromanagement Of People Through Rpg Cards In Education For Innovation», en *2022 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, Tunis, Tunisia: IEEE, mar. 2022, pp. 822-828. doi: 10.1109/EDUCON52537.2022.9766495. Carvalho, E., Eusebio, A., Ranoya, G., Araujo, C., & Ramalho, G. (2022). A Proposal For Micromanagement Of People Through Rpg Cards In Education For Innovation. *2022 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, 822–828. <https://doi.org/10.1109/EDUCON52537.2022.9766495>
- [27] M. Tejada-Castro, M. Aguirre-Munizaga, E. Yerovi-Ricaurte, L. Ortega-Ponce, O. Contreras-Gorotiza, y G. Mantilla-Saltos, «Funprog: A Gamification-Based Platform for Higher Education», en *Technologies and Innovation*, Springer, Cham, 2018, pp. 255-268. doi: 10.1007/978-3-030-00940-3_19. Tejada-Castro, M., Aguirre-Munizaga, M., Yerovi-Ricaurte, E., Ortega-Ponce, L., Contreras-Gorotiza, O., & Mantilla-Saltos, G. (2018). Funprog: A Gamification-Based Platform for Higher Education. *Technologies and Innovation*, 255–268. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00940-3_19
- [28] C. Páez-Quinde, D. Morocho-Lara, A. Chasipanta-Nieves, y X. Sulca-Guale, «Gamification Tools as a Learning Strategy in Virtual Classes in University Students: Elemental Education Major Case Study», en *Technologies and Innovation*, Springer,

- Cham, 2021, pp. 95-106. doi: 10.1007/978-3-030-88262-4_7. Páez-Quinde, C., Morocho-Lara, D., Chasipanta-Nieves, A., & Sulca-Guale, X. (2021). Gamification Tools as a Learning Strategy in Virtual Classes in University Students: Elemental Education Major Case Study. *Technologies and Innovation*, 95–106. https://doi.org/10.1007/978-3-030-88262-4_7
- [29] Z. Yordanova, «Educational Innovations and Gamification for Fostering Training and Testing in Software Implementation Projects», en *Software Business*, Springer, Cham, 2019, pp. 293-305. doi: 10.1007/978-3-030-33742-1_23. Yordanova, Z. (2019). Educational Innovations and Gamification for Fostering Training and Testing in Software Implementation Projects. *Software Business*, 293–305. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33742-1_23
- [30] L. Aguiar-Castillo, L. Hernández-López, P. De Saá-Pérez, y R. Pérez-Jiménez, «Gamification as a motivation strategy for higher education students in tourism face-to-face learning», *Journal of Hospitality, Leisure, Sport & Tourism Education*, vol. 27, p. 100267, nov. 2020, doi: 10.1016/j.jhlste.2020.100267.
- [31] L.-M. Putz, F. Hofbauer, y H. Treiblmaier, «Can gamification help to improve education? Findings from a longitudinal study», *Computers in Human Behavior*, vol. 110, p. 106392, sep. 2020, doi: 10.1016/j.chb.2020.106392. Putz, L.-M., Hofbauer, F., & Treiblmaier, H. (2020). Can gamification help to improve education? Findings from a longitudinal study. *Computers in Human Behavior*, 110, 106392. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106392>

ANÁLISIS DE PROPAGACIÓN DE LAS COMUNICACIONES ÓPTICAS SUBACUÁTICAS

Analysis of underwater optical communications propagation

Sebastian Ruiz	emilio.ruiz@epoch.edu.ec
Madelaine Muñoz	madelaine.munioz@epoch.edu.ec

Facultad de Informática y Electrónica
 Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
 Riobamba, Ecuador.

RESUMEN

Este artículo presenta un estudio de la propagación de luz en medios acuáticos. El objetivo principal fue investigar y comprender los fenómenos que causan pérdidas de propagación en la transmisión de luz en medios líquidos, específicamente agua bajo diferentes condiciones. Para estudiar el comportamiento de estas ondas en un medio líquido se realizó una simulación utilizando una fibra óptica monomodo Corning SMF-28 con una transición de agua utilizando el software FIMMWAVE y realizando un análisis a través de regresión polinomial, relacionando la variación de la longitud de onda en función de la permitividad del agua, con lo cual se obtuvo una ecuación con un comportamiento polinómico de orden 11. Las longitudes de onda analizadas abarcaron un rango de 0.18 a 1.13 μm , considerando agua potable como el medio de transición. En el análisis de resultados se utilizó la herramienta WG Scanner de FIMMWAVE para analizar los modos de propagación en la fibra óptica, observando un comportamiento exponencial más allá de cierto valor de longitud de onda. Este estudio busca avanzar en el conocimiento de las comunicaciones subacuáticas y proporcionar información relevante para el diseño y la optimización de sistemas de transmisión óptica en entornos acuáticos. La comprensión de la propagación de la luz en este contexto es fundamental para mejorar la calidad y la eficiencia de las comunicaciones submarinas.

Palabras Clave: Fibra Óptica, Fibra Monomodo, Fimmwave, Comunicaciones, Comunicaciones Subacuáticas.

ABSTRACT

This article presents a study of light propagation in aquatic environments. The main objective was to research and understand the phenomena that cause propagation losses in the transmission of light in liquid media, specifically water under different conditions. To study the behavior of these waves in a liquid medium, a simulation was carried out using a Corning SMF-28 single-mode optical fiber with a water transition using the FIMMWAVE software and performing an analysis through polynomial regression, relating the variation of the wavelength as a function of the permittivity of the water, with which an equation with a polynomial behavior of order 11 was obtained. The wavelengths analyzed spanned a range of 0.18 to 1.13 μm , considering drinking water as the transition medium. In the analysis of results, FIMMWAVE's WG Scanner tool was used to analyze the propagation modes in the optical fiber, observing an exponential behavior beyond a certain wavelength value. This study seeks to advance the knowledge of underwater communications and provide relevant information for the design and optimization of optical transmission systems in aquatic environments. Understanding light propagation in this context is critical to improving the quality and efficiency of submarine communications.

Palabras Clave: Optical Fiber, Single-Mode Fiber, Fimmwave, Communications, Submarine Communications.

► I. Introducción

En los últimos años, las comunicaciones subacuáticas han experimentado un importante desarrollo, encontrando diversas aplicaciones en la actualidad, como el monitoreo ambiental, la recolección de datos oceanográficos, el monitoreo de desastres y la exploración submarina [1] [2]. Estas comunicaciones se basan principalmente en el uso de tres tipos de señales para su propagación: señales electromagnéticas, señales ópticas y señales acústicas [3] [4]. Sin embargo, estas señales presentan ventajas y desventajas en su propagación debido a las características dieléctricas del medio en el que se transmiten [5] [6].

Las señales pueden variar dependiendo del entorno en el que se propaguen. Por ejemplo, en el caso de las ondas electromagnéticas, su velocidad máxima de propagación se alcanza en el aire o el vacío, con un valor de 3×10^8 m/s a diferencia del resto de tipos de medios como el agua dulce que presenta una permitividad relativa de 80 [7] [8].

Para analizar el comportamiento de una onda en las comunicaciones subacuáticas, se debe considerar también la conductividad del medio, ya que este valor puede afectar la atenuación y la velocidad de propagación de la onda [9] [10]. El agua potable tiene una conductividad que varía de 500 mhos/cm a 800 mhos/cm y el agua de mar puede llegar a tener una conductividad de 60000 mhos/cm [11] [12].

Las ondas al propagarse en el agua presentan problemas como la atenuación, que reduce la intensidad de la señal a medida que avanza, y la dispersión, que causa desviaciones en la trayectoria de la onda provocando pérdida de información [13] [14]. Además, el ruido en las comunicaciones subacuáticas disminuye la tasa de transmisión y afecta la calidad de la señal. Existen diferentes fuentes de ruido en este tipo de comunicaciones, como el ruido del fondo del océano, el ruido generado por barcos, animales marinos y actividades humanas [15] [16]. Por último, otro factor a considerar es el ancho de banda limitado que se tiene en este tipo de comunicaciones. Para transmitir la información en una comunicación subacuática el tipo de modulación más utilizada es la multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM) [17] [18].

Las señales ópticas son una opción viable para la propagación en el agua. Estas señales no se ven

afectadas por el efecto Doppler, y la distancia que pueden recorrer depende de la frecuencia de funcionamiento [19] [20]. Un ejemplo donde se utilizan señales ópticas es la fibra óptica, que consta de un hilo muy fino de material transparente, como vidrio o materiales plásticos, por donde se transmiten pulsos de luz [21] [22].

La fibra monomodo, permite la propagación de un único modo de luz, esto se logra reduciendo el diámetro del núcleo de la fibra a un tamaño de 8.3 a 10 micrones, lo que asegura una sola dirección de propagación [23] [24]. Las fibras monomodo permiten alcanzar grandes distancias de propagación de hasta 400 km y transmitir elevadas tasas de información [25] [26] [27] [28].

En este trabajo de investigación, se analizaron las pérdidas de propagación utilizando señales ópticas a través de una transición con diferentes tipos de agua realizando simulaciones en el software FIMMWAVE. Estas simulaciones permitieron variar la transición, en específico la permitividad y observar el comportamiento de la señal de luz antes y después de la transición considerando los diferentes modos de propagación.

► II. Metodología

En esta investigación se diseñó una estructura formada por una fibra comercial monomodo Corning SMF-28 con una transición intermedia de material líquido (agua potable como base), como se observa en la figura 1, con un índice de refracción que varía en un rango de 1.330 a 1.340, valores que dependen de factores como la temperatura y la presión. Para analizar esta estructura se utilizó el software de simulación FIMMWAVE.

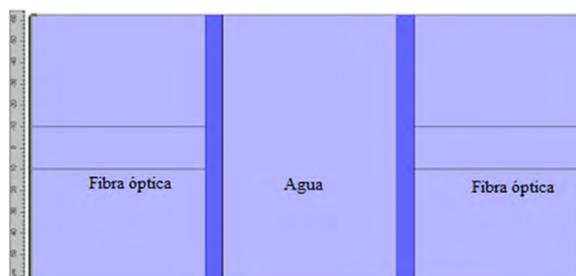


Fig. 1. Estructura de la unión de la fibra monomodo y agua.

Para el análisis de propagación se creó una fibra monomodo, utilizando las características y dimensiones de la fibra óptica monomodo Corning SMF-28. Aunque esta fibra está optimizada para longitudes de onda cercanas a $1.55 \mu\text{m}$,

se puede utilizar en el rango de 1.12 μm con algunas limitaciones en términos de atenuación y dispersión. Para el análisis se utilizó un índice de refracción en un rango de longitud de onda de 0.18 a 1.13 μm en función de los materiales que se encuentra en las librerías del software como se detalla en la Tabla I.

TABLA 1: RIX (fimmwave – material del agua).

No	Lambda	Indice de Refracción
1	0.18178736	1.468725
2	0.18261377	1.465757
3	0.18365075	1.462235
4	0.18457517	1.459262
5	0.18496831	1.458039
6	0.852344	1.327733
7	0.894596	1.327068
8	1.01426	1.325273
9	1.08333	1.324248
10	1.12895	1.323559

Con los datos de la tabla I se realizó una regresión polinómica para obtener la permitividad en función de la longitud de onda ajustando la función a los datos originales registrados en FIMMWAVE. El polinomio fue de grado 11 de la forma:

$$p(x) = p_1x^{11} + p_2x^{10} + \dots + p_{10}x^2 + p_{11}x^1 + p_{12} \quad (1)$$

Y la curva ajustada se visualiza en la figura 2 con los coeficientes pi de la ecuación Ec.1. que se obtuvieron utilizando la función *polyfit* de Matlab.

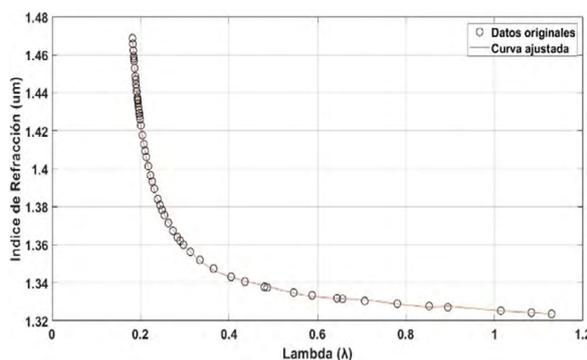


Fig. 2. Modelo de la variación de la permitividad del agua en función de lambda.

Para realizar la simulación se empleó el modo FDM (Frequency Division Multiplexing) debido a que proporciona el solucionador más potente de FIMMPROP, permitiendo calcular superposiciones de modos de manera eficiente. La figura 3 presenta un ejemplo de una fibra monomodo utilizada en la simulación [29].

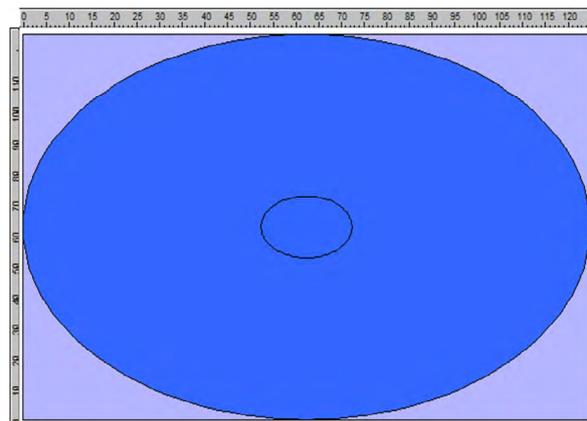


Fig. 3. Fibra Monomodo.

El "Mode Finder" (Buscador de Modos) es una herramienta que se utiliza para encontrar y analizar los modos de propagación en guías de onda ópticas. El modo de propagación se refiere a la distribución espacial del campo electromagnético dentro de una estructura óptica, como una fibra óptica o una guía de onda plana. El objetivo principal del "mode finder" es determinar los modos de propagación que son soportados por una estructura óptica específica. Esto es importante porque cada modo de propagación tiene características únicas, como el perfil de campo electromagnético, la frecuencia de resonancia y la constante de propagación.

En FIMMWAVE, el "mode-finder" utiliza métodos numéricos de elementos finitos (FEM) para resolver las ecuaciones de Maxwell que describen la propagación de la luz en una estructura óptica. Estos algoritmos encuentran los modos de propagación que satisfacen las condiciones de contorno y las propiedades del material definidas para la estructura como se observa en las figuras 4, 5.

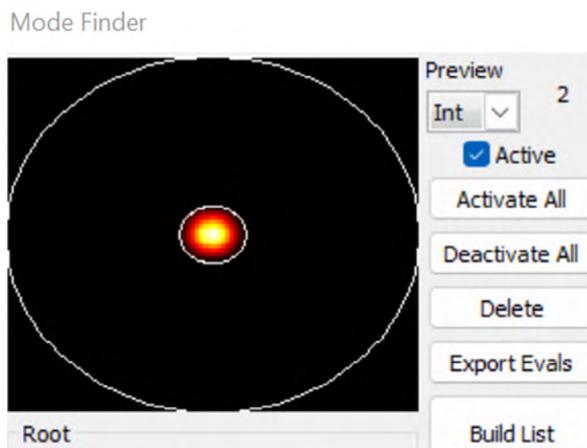


Fig. 4. Modo de propagación 2 de la fibra óptica.

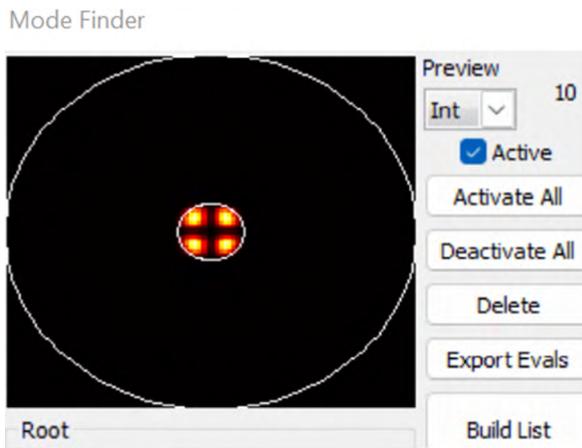


Fig. 5. Modo de propagación 10 de la fibra óptica.

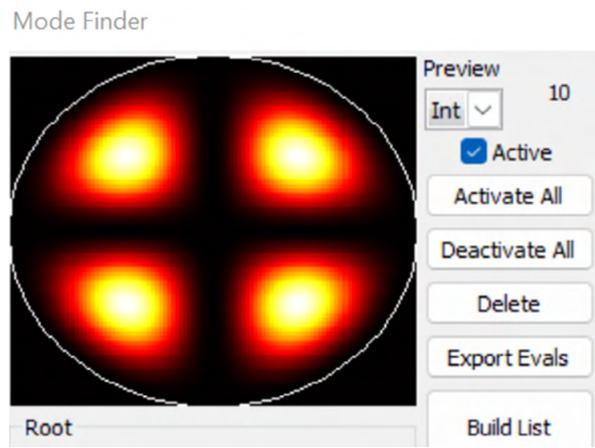


Fig. 8. Modo de propagación 10 del agua.

En la Figura 6 se observa la transición de agua en FIMMWAVE, esta contiene varios modelos en el espectro visible e infrarrojo cercano para la mayoría de los materiales comúnmente utilizados en ópticas. Al igual que en la fibra óptica se aplicó el modo finder en la transición de agua como se muestra en la Figura 7 y 8.

La estructura simulada considera la fibra SMF-28 con una longitud de 1000 μm , una transición de agua de 1000 μm con un radio de 125 μm y una segunda fibra SMF-28 con una longitud de 1000 μm . La figura 9 muestra la propagación de la luz a diferentes longitudes de onda con una vista lateral y la figura 10 define cortes laterales donde se aprecia como está la intensidad de luz en la fibra y en la transición.

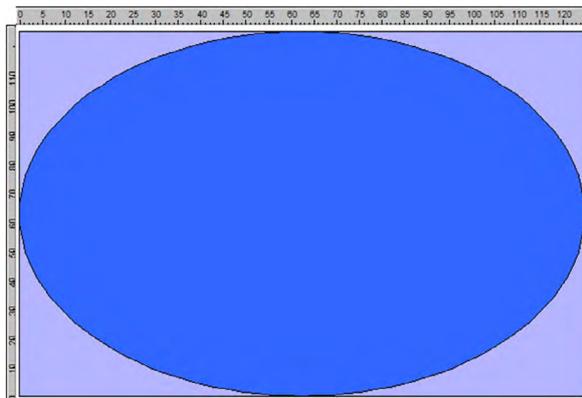


Fig. 6. Material de Agua dentro de la base de datos de FIMMWAVE.

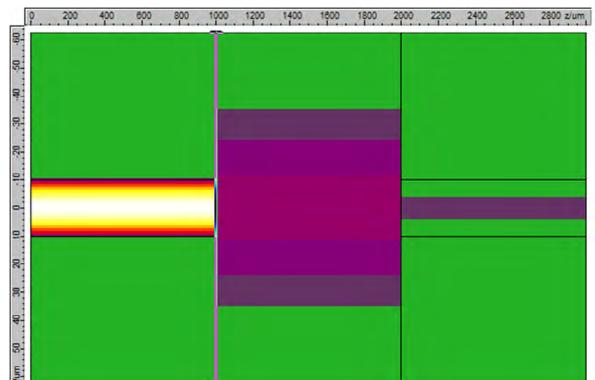


Fig. 9. Simulación de las estructuras unidas.

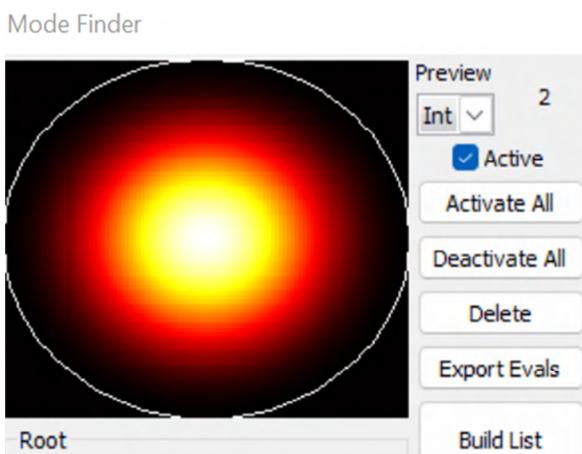


Fig. 7. FModo de propagación 2 del agua.

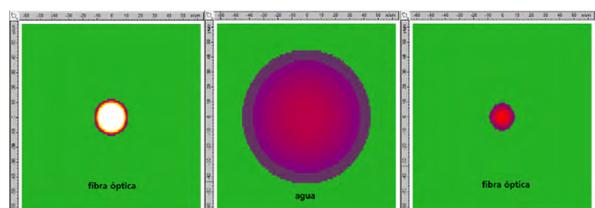


Fig. 10. Corte Lateral de la figura 9.

Para la figura 11 la estructura simulada comprende una fibra SMF-28 de 1000 μm de longitud, seguida de una transición de agua de 0.4 μm de longitud con un diámetro de 125 μm , y finalmente otra fibra SMF-28 de 1000 μm de longitud. La figura 11 ilustra la propagación de la luz a distintas

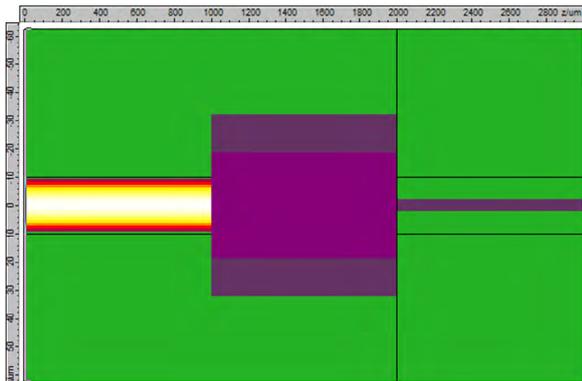


Fig. 11. Simulación de las estructuras unidas con un lambda de 0.4um.

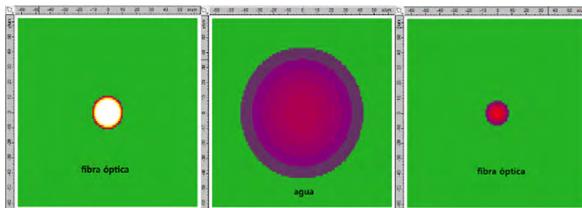


Fig. 12. Corte Lateral de la figura 11.

Para la figura 13 la estructura simulada comprende una fibra SMF-28 de 1000 um de longitud, seguida de una transición de agua de 0.6 um de longitud con un diámetro de 125 um, y finalmente otra fibra SMF-28 de 1000 um de longitud. La figura 13 ilustra la propagación de la luz a distintas longitudes de onda desde una perspectiva lateral, mientras que la figura 14 presenta secciones laterales que muestran la distribución de la intensidad lumínica tanto en la fibra como en el agua.

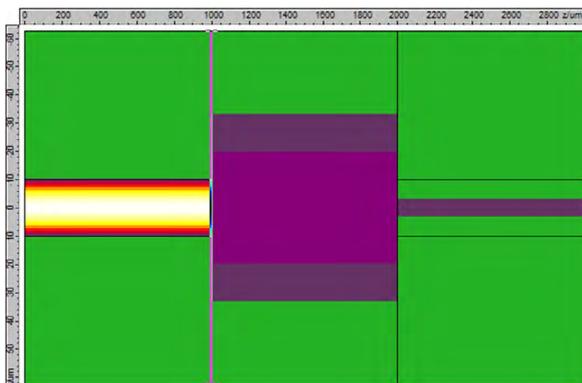


Fig. 13. Simulación de las estructuras unidas con un lambda de 0.6um.

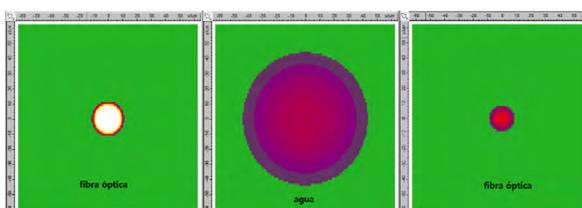


Fig. 14. Corte Lateral de la figura 13.

Para la figura 15 la estructura simulada comprende una fibra SMF-28 de 1000 um de longitud, seguida de una transición de agua de 0.8 um de longitud con un diámetro de 125 um, y finalmente otra fibra SMF-28 de 1000 um de longitud. La figura 15 ilustra la propagación de la luz a distintas longitudes de onda desde una perspectiva lateral, mientras que la figura 16 presenta secciones laterales que muestran la distribución de la intensidad lumínica tanto en la fibra como en el agua.

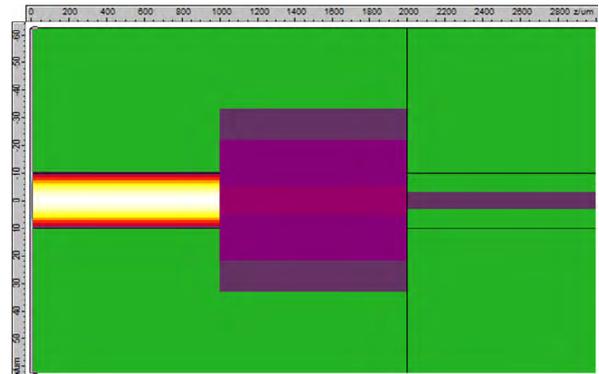


Fig. 15. Simulación de las estructuras unidas con un lambda de 0.8um.

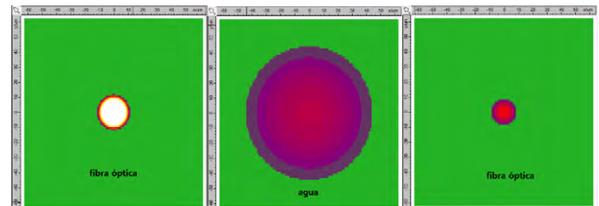


Fig. 16. Corte Lateral de la figura 15.

Para la figura 17 la estructura simulada comprende una fibra SMF-28 de 1000 um de longitud, seguida de una transición de agua de 1 um de longitud con un diámetro de 125 um, y finalmente otra fibra SMF-28 de 1000 um de longitud. La figura 17 ilustra la propagación de la luz a distintas longitudes de onda desde una perspectiva lateral, mientras que la figura 18 presenta secciones laterales que muestran la distribución de la intensidad lumínica tanto en la fibra como en el agua.

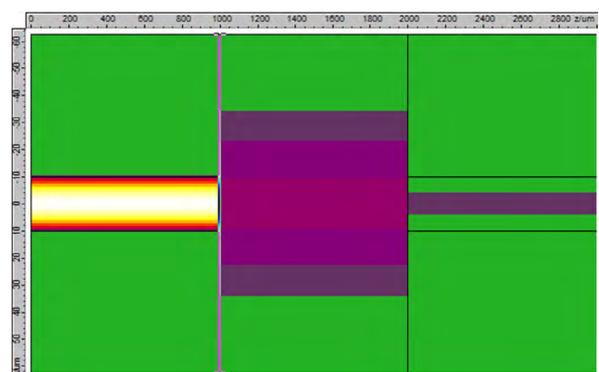


Fig. 17. Simulación de las estructuras unidas con un lambda de 1 um.

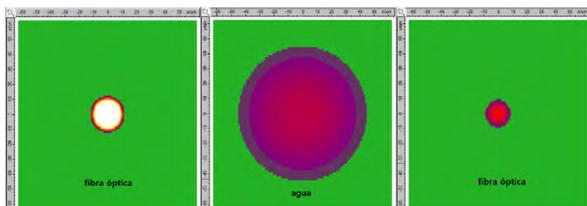


Fig. 18. Corte Lateral de la figura 17.

Las simulaciones realizadas se hicieron para los 10 primeros modos de propagación y sus resultados se analizarán en el siguiente apartado.

➤ III. Resultados

La convergencia de las pérdidas de los modos con un espesor de la capa perfectamente adaptada (PML), se simuló utilizando el WG Scanner dentro de FIMMWAVE el cual ayudó a estudiar los modos los cuales se utilizaron para mejorar la precisión y la eficiencia de las simulaciones de dispositivos ópticos, permitiendo la simulación de campos electromagnéticos que se propagan en un medio dieléctrico sin los efectos indeseados de los bordes de la región de simulación.

En la figura 18 se muestra el resultado del análisis de la fibra en el segundo modo de propagación. En este modo existe una banda de $0.24 \mu m$ hasta $0.4 \mu m$ que impiden la transmisión, y a partir de $0.5 \mu m$ empieza una tendencia de crecimiento exponencial que muestra una propagación mínima. Para la parte de la ganancia al tener valores menores a 0.3 (adimensional) se visualiza una propagación directa.

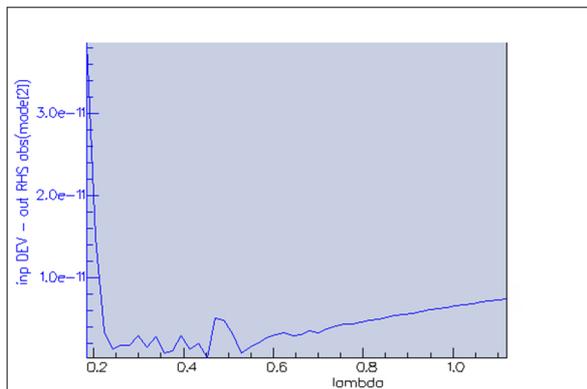


Fig. 18. Propagación en la fibra óptica del segundo modo.

Para el cuarto modo de propagación de la fibra óptica, tiene una banda de $0.2 \mu m$ donde comienza una tendencia de crecimiento exponencial que muestra una propagación mínima. Para la parte de la ganancia al tener valores menores a 1.6

(adimensional) se visualiza una propagación directa. Este resultado se muestra en la Figura 19.

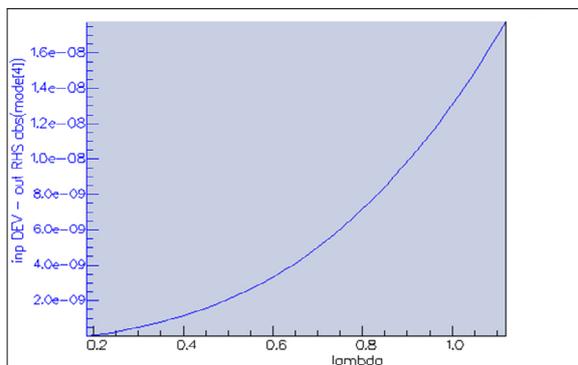


Fig. 19. Propagación en la fibra óptica en el cuarto modo.

En la figura 20 se observa el quinto modo de propagación en la fibra óptica, a diferencia del Modo 4 desde la banda de $0.2 \mu m$ empieza una tendencia de crecimiento exponencial que muestra una propagación mínima. Para la parte de la ganancia al tener valores menores a 1.6 (adimensional) se visualiza una propagación directa.

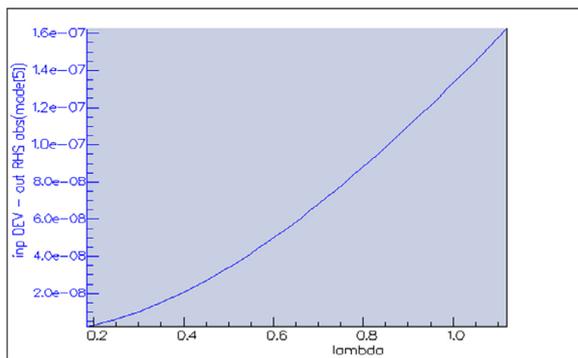


Fig. 21. Propagación en la fibra óptica en el quinto modo.

Para el sexto modo de propagación en la fibra óptica se tiene una banda de $0.19 \mu m$ donde empieza una tendencia de crecimiento exponencial que muestra una propagación mínima como se muestra en la Figura 22. Para la parte de la ganancia al tener valores menores a 1.2 (adimensional) se visualiza una propagación directa.

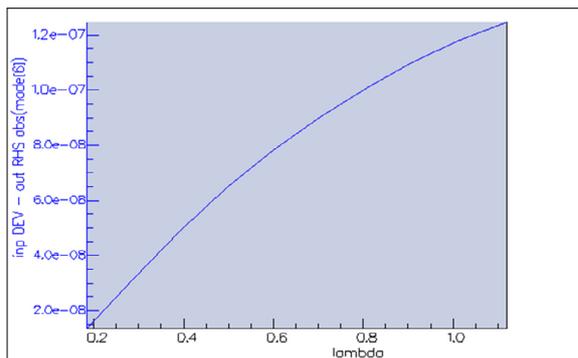


Fig. 22. Propagación en la fibra óptica en el sexto modo.

En la Figura 23 se muestra el resultado de la propagación de la fibra óptica en el séptimo modo. En este caso a longitudes bajas no existe propagación, pero empieza una tendencia de crecimiento exponencial, la cantidad es mínima debido al material, pero existe propagación desde la banda de $0.19\mu m$. Para la parte de la ganancia al tener valores menores a 0.003 (adimensional) se visualiza una propagación directa.

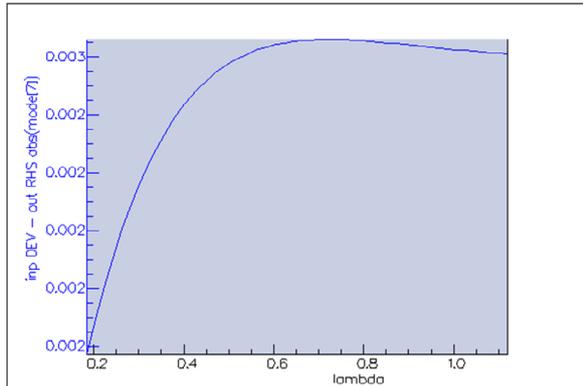


Fig. 23. Propagación en la fibra óptica en el séptimo modo.

Para el octavo modo de propagación en la fibra óptica se tiene un valor de mínimo 1.25 (adimensional) y tiene una caída a 1(adimensional) hacia la banda de $0.22\mu m$ donde empieza una tendencia de crecimiento exponencial que muestra una propagación mínima. Para la parte de la ganancia al tener valores menores a 8 (adimensional) se visualiza una propagación directa. Este resultado se muestra en al Figura 24.

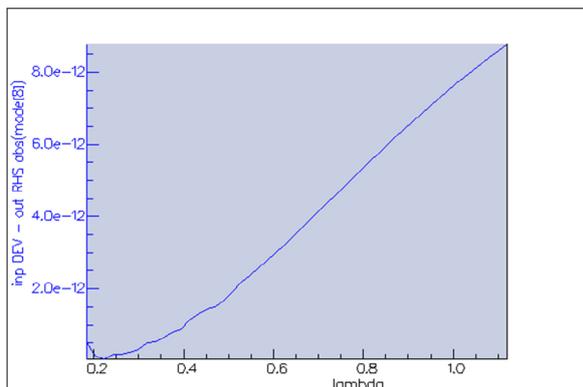


Fig. 24. Propagación en la fibra óptica en el octavo modo.

En la Figura 25 se muestra el noveno modo de propagación en la fibra óptica. En este caso desde la banda de $0.22\mu m$ hasta $0.775\mu m$ se abre una ventana de propagación. Para la parte de la ganancia al tener valores menores a 5 (adimensional) se visualiza una propagación directa.

(adimensional) se visualiza una propagación directa.

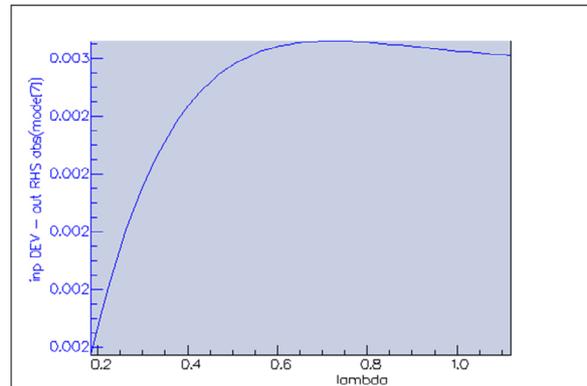


Fig. 25. Propagación en la fibra óptica en el noveno modo.

Para el décimo modo de propagación en la fibra óptica se tiene una banda de $0.25\mu m$ hasta $0.75\mu m$ donde se abre una ventana de rechazo en el cual no existirá una propagación nula, y desde la banda de $0.75\mu m$ hasta $1.12\mu m$ se abre una ventana de propagación, como se muestra en la Figura 26. Para la parte de la ganancia al tener valores menores a 5 (adimensional) se visualiza una propagación directa.

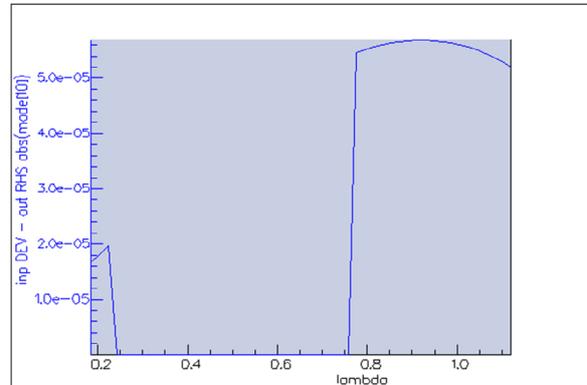


Fig. 26. Propagación en la fibra óptica en el décimo modo.

» IV. Discusión

Este trabajo permitió analizar los diferentes modos de propagación dentro de la fibra óptica con una transición de agua donde se obtuvo una distancia de propagación máxima de 1000 μm . Las limitaciones que se presentaron en la propagación de las ondas se dan en la longitud de onda debido a que el rango está delimitado a 0.18 hasta 1.12 μm debido a las características del material donde para valores superiores el índice de refracción se considera constante. Al trabajar a distancias de 0.4 μm hasta 1 μm , se realizaron comparaciones determinando como se comporta la onda en base

a los parámetros establecidos de la permitividad, longitud de onda y distancia.

» V. Conclusiones

A partir del exhaustivo análisis realizado sobre la propagación de las comunicaciones ópticas subacuáticas, se ha demostrado que la utilización de señales ópticas mediante fibra óptica monomodo es una opción altamente viable y eficiente para la transmisión de información a grandes distancias en entornos acuáticos. El estudio de los modos de propagación mediante herramientas como WG Scanner ha permitido un mejor entendimiento del comportamiento de las señales, evidenciando una tendencia de crecimiento exponencial de la propagación mínima a partir de ciertas longitudes de onda. Asimismo, la eficiencia de la propagación se refleja en los valores de ganancia adimensionales, donde valores menores indican una mejor propagación directa. En conclusión, este estudio brinda una perspectiva prometedora para el desarrollo de comunicaciones subacuáticas ópticas más avanzadas y eficientes, al revelar las características y rangos en los cuales se abre una ventana de propagación para diferentes modos de onda.

» VI. Agradecimientos

Deseo dedicar un sincero agradecimiento al Ingeniero Hugo Moreno por la guía y paciencia al ayudarme a realizar este artículo.

» VII. Referencias

- [1] H. KAUSHAL y G. KADDOUM, «Underwater Optical Wireless Communication,» IEEE access, vol. 4, pp. 1518-1547, 2016.
- [2] I. F. AKYILDIZ, P. WANG y S.-C. LIN, «SoftWater: Software-defined networking for next-generation underwater communication systems,» Ad Hoc Networks, vol. 46, pp. 1-11, 2016.
- [3] M. Zou, X. Tu, S. Yang, H. Fang, X. Wen y F. Qu, «Channel Distribution and Noise Characteristics of Distributed Acoustic Sensing Underwater Communications,» IEEE Sensors Journal, vol. 21, n° 21, pp. 24185-24194, 2021.
- [4] Y. Ata, A. Hanaa, L. Bariah, S. Muhaidat y M. A. Imran, «Intelligent Reflecting Surfaces for Underwater Visible Light Communications,» IEEE Photonics Journal, vol. 15, n° 1, pp. 1-10, 2023.
- [5] F. Yu, D. Li, Q. Guo, Z. Wang y W. Xiang, «Block-FFT Based OMP for Compressed Channel Estimation in Underwater Acoustic Communications,» IEEE Communications Letters, vol. 19, n° 11, pp. 1937-1940, 2015.
- [6] S. Gu, L. Zhang, S. Guo, L. Zheng, R. An, T. Jiang y A. Xiong, «Communication and Cooperation for Spherical Underwater Robots by Using Acoustic Transmission,» IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 28, n° 1, pp. 292-301, 2023.
- [7] J. Oberreuter, J. Uribe, R. Zamora, G. Gacitúa y A. Rivera, «semanticscholar,» 13 06 2014. [En línea]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Mediciones-de-espesor-de-hielo-en-Chile-usando-eco-Oberreuter-Uribe/86be6a1df0ecc8afe9793a602aaf9f7cba56666f>. [Último acceso: 05 04 2023].
- [8] S. He, N. Wang, M. Ho, J. Zhu y G. Song, «Design of a New Stress Wave Communication Method for Underwater Communication,» IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 68, n° 8, pp. 7370-7379, 2021.
- [9] Z. YU y P. WU, «Underwater communication and optical camouflage ionogels,» Advanced Materials, vol. 33, n° 24, p. 2008479.
- [10] M. Jain, N. Sharma, A. Gupta, D. Rawal y P. Garg, «Performance Analysis of NOMA Assisted Underwater Visible Light Communication System,» IEEE Wireless Communications Letters, vol. 9, n° 8, pp. 1291-1294, 2020.
- [11] C. G. d. I. Fuente, «PV ALBEITAR,» 07 11 2013. [En línea]. Available: https://www.avideter.com/ftp_public/A3081113.pdf. [Último acceso: 05 04 2023].
- [12] J. Jiajia, W. Xianquan, D. Fajie, F. Xiao, L. Chunyue y S. Zhongbo, «A Basic Bio-Inspired Camouflage Communication Frame Design and Applications for Secure Underwater Communication Among Military Underwater Platforms,» IEEE

- Access, vol. 8, pp. 24927-24940, 2020.
- [13] P. Zhu, X. Xu, X. Tu, Y. Chen y Y. Tao, «Anti-Multipath Orthogonal Chirp Division Multiplexing for Underwater Acoustic Communication,» *IEEE Access*, vol. 8, pp. 13305-13314, 2020.
- [14] J. YIN, W. GE, X. HAN, B. Liu y L. Guo, «Partial FFT Demodulation With IRC in MIMO-SC-FDE Communication Over Doppler Distorted Underwater Acoustic Channels,» *IEEE Communications Letters*, vol. 23, n° 11, pp. 2086-2090, 2019.
- [15] Y. Zhou, F. Tong, A. Song y R. Diamant, «Exploiting Spatial-Temporal Joint Sparsity for Underwater Acoustic Multiple-Input-Multiple-Output Communications,» *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 46, n° 1, pp. 352-369, 2021.
- [16] M. Jouhari, K. Ibrahim, H. Tembine y J. Ben-Othman, «Underwater Wireless Sensor Networks: A Survey on Enabling Technologies, Localization Protocols, and Internet of Underwater Things,» *IEEE Access*, vol. 7, pp. 96879-96899, 2019.
- [17] Á. CARBAJAL AZCONA y M. GONZÁLEZ FERNÁNDEZ, «UCM,» 2012. [En línea]. Available: <https://www.ucm.es/data/cont/docs/458-2013-07-24-Carbajal-Gonzalez-2012-ISBN-978-84-00-09572-7.pdf>. [Último acceso: 10 05 2023].
- [18] Y. Weng, J. Pajarinen, R. Akrouf, T. Matsuda, J. Peters y T. Maki, «Reinforcement Learning Based Underwater Wireless Optical Communication Alignment for Autonomous Underwater Vehicles,» *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 47, n° 4, pp. 1231-1245, 2022.
- [19] H. Medwin, «Sounds in the Sea: From Ocean Acoustics to Acoustical Oceanography,» vol. 121, n° ISBN: 978-0-521-82950-2, p. 643, 2005.
- [20] D. Wei, L. Yan, C. Huang, J. Wang, J. Chen, M. Pan y Y. Fang, «Dynamic Magnetic Induction Wireless Communications for Autonomous-Underwater-Vehicle-Assisted Underwater IoT,» *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, n° 10, pp. 9834-9845, 2020.
- [21] H. Zhang, Y. Dong y L. Hui, «On Capacity of Downlink Underwater Wireless Optical MIMO Systems With Random Sea Surface,» *IEEE Communications Letters*, vol. 19, n° 12, pp. 2166-2169, 2015.
- [22] C. Lin, G. Han, J. Jiang, C. Lin, S. B. H. Shah y Q. Liu, «Underwater Pollution Tracking Based on Software-Defined Multi-Tier Edge Computing in 6G-Based Underwater Wireless Networks,» *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 41, n° 2, pp. 491-503, 2023.
- [23] D. Wei, C. Huang, X. Li, B. Lin, M. Shu, J. Wang y M. Pan, «Power-Efficient Data Collection Scheme for AUV-Assisted Magnetic Induction and Acoustic Hybrid Internet of Underwater Things,» *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, n° 14, pp. 11675-11684, 2022.
- [24] G. Qiao, X. Liu, L. Ma, S. Mazhar y Y. Zhao, «Residual Doppler Effect Analysis of the FBMC/OQAM Communication System in Underwater Acoustic Channel,» *IEEE Communications Letters*, vol. 25, n° 9, pp. 3090-3093, 2021.
- [25] M. Daimon y A. Masumura, «PubMed,» National Library of Medicine, 05 06 2007. [En línea]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17538678/>. [Último acceso: 16 05 2023].
- [26] X. TU, X. XU, Z. ZOU, L. YANG y J. WU, «Fractional Fourier domain hopped communication method based on chirp modulation for underwater acoustic channels,» *Journal of Systems Engineering and Electronics*, vol. 28, n° 3, pp. 449-456, 2017.
- [27] W. Yu, Y. Chen, L. Wan, X. Zhang, P. Zhu y X. Xu, «An Energy Optimization Clustering Scheme for Multi-Hop Underwater Acoustic Cooperative Sensor Networks,» *IEEE Access*, vol. 8, pp. 89171-89184, 2020.
- [28] W. Su, J. Tao, Y. Pei, L. Xiao y E. Cheng, «Reinforcement Learning Based Efficient Underwater Image Communication,» *IEEE Communications Letters*, vol. 25, n° 3, pp. 883-886, 2021.
- [29] FIMMWAVE, FDM SOLVER (REAL), vol. 1, info@photond.com, 2022, pp. 63-228.

3D INDOOR PROPAGATION SIMULATOR USING RAY TRACING FOR 10-20 GHz FREQUENCY BAND ON GPU WITH NVIDIA-OPTIX UNDER UNITY GRAPHIC ENGINE

Simulador de propagación 3D para Interiores Utilizando Trazado de Rayos para la Banda de Frecuencia de 10-20 GHz sobre GPU con NVIDIA-Optix bajo el motor gráfico Unity

Jefferson Ribadeneira ¹	jefferson.ribadeneira@esPOCH.edu.ec
Kevin Israel Freire Lema ²	kevinfreire1997@hotmail.com
Mario Alejandro PaguayAlvarado ³	alejandro.paguay@esPOCH.edu.ec
Ana Logroño ⁴	allncpa@gmail.com

¹ Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador,

² Investigador Independiente, Riobamba, Ecuador,

³ Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador,

⁴ Investigadora Independiente, Riobamba, Ecuador,

ABSTRACT

In this research work, a novel Ray Tracing 3D indoor propagation simulator at frequencies of 10-20 GHz using GPU is presented. To carry out the simulation, software tools as Nvidia CUDA 10.0, CMake 3.19.4, Nvidia OPTIX 6.5, Microsoft Visual Studio Community 2017 and Unity 2018.4.21f1 were used. Two indoor line-of-sight (LOS) scenarios were defined in Facultad de Informática y Electrónica at Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH). The first one inside the Microwave Laboratory with minimum and maximum distances between Transmitter and Receiver of 0.34m (far field) and 7m, respectively; and the second one inside the ground floor hall with minimum and maximum distances of 6 and 12m, respectively. In both scenarios, real and simulated measurements were developed with frequency hops of 1GHz. A ray tracing propagation technique under GPU with NVIDIA-Optix was used for the simulation and by comparing simulated and measurement power, it was observed a difference of 10 dB approximately..

Palabras Clave: Indoor Propagation Simulator, Ray Tracing, GPU, Nvidia OPTIX, Unity.

► I. Introduction

With the introduction of International Mobile Telecommunications (IMT-2020) also known as 5G NR (New Radio), new transmission bands have been proposed for their development; these bands are defined as FR1 (410 MHz – 7125 MHz), FR2 (24250 MHz – 52600 MHz) [1], Industrial, Scientific, and Medical (ISM) band for 5G NR working in Non-Licensed Spectrum, and even C (3.5 GHz) [2] and millimetric Bands used for satellite communications [3] have been proposed to work in coexistence with 5G. Other satellite bands as Ku (12 GHz – 18 GHz) and K (18 GHz – 36 GHz) bands could be feasible spectrum for 5G deployments. These facts make it necessary to study the propagation conditions and channel models for these bands in different stages. The use of simulation tools for the propagation analysis in communications systems is not new; historically the simulators use CPUs for mathematical calculations. Nowadays, the calculation power of GPUs is exploited to reduce the computing time in complex stages. This is especially useful for outdoor and indoor 3D propagation environments, in which the number of reflections that arrive to the receiver can be very large. In this sense, there

are some software e.g. OMNET++ and Veneris [4] that use the advantage of GPU computing and realistic physics for propagation simulations. However, these tools are focused on vehicular outdoor communications. Similarly, it is worth to mention the existence of licensed indoor propagation simulators, such as iBwave for indoor wireless network design. However, the price of these licensed software could be restrictive.

Thus, the present work aims the study of: NVIDIA Optix [5] and Unity [6],[7] virtualization technologies and the implementation of Ray Tracing 3D indoor propagation simulator using GPU for the Ku and part of the K satellite band (10 GHz – 20 GHz); Also, the simulated results were compared with real measurements at different distances and frequencies. The simulation and measurements were deployed for indoor stage with Line Of Sight (LOS).

The rest of the paper is distributed as follows. Section II presents the methodology used for simulations and measurements, Section III presents the results and finally, Section IV concludes the paper.

» II. Methodology

In this section, first an introduction of Ray tracing Propagations model is pointed out. Then, the methodology used for the simulator and measurements are detailed.

A. Ray Tracing Model

The ray tracing model is an image-based model, which assumes that all the objects in the propagation environments are potential reflectors. In implementations, the ray tracing model uses the images of the transmitter relative to all reflectors, that is, all objects in the propagation environments to determine the directions of the reflected rays. Ray tracing considers only the paths that exist between the transmitter and the receiver [8].

In this model, the strength of the reflected rays and the refracted rays are calculated according to geometrical optics. The diffracted rays are calculated according to, for example, uniform theory of diffraction (UTD) [9]. The complexity of the propagation environments in Ray Tracing model has a strong impact on their computational load, as more obstacles exist, it leads to more reflections and diffractions. According to this method, each pixel (Rx) receiving power is

individually computed. The images of the transmitter are established to determine the reflected rays, that is, the relative image of the Tx to the reflecting plane (Tx' or Tx'') as shown in Fig. 1. Since each one of the pixels is calculated independently, the computation time is high, but the results obtained with this method are very accurate, because all the relevant objects in the propagation are considered. In the basic ray tracing models, the prediction is based on “free space” propagation model for free ray and the reflections on the different walls. Therefore, in this paper the free space model equation (Friis equation) was used for the propagation losses.

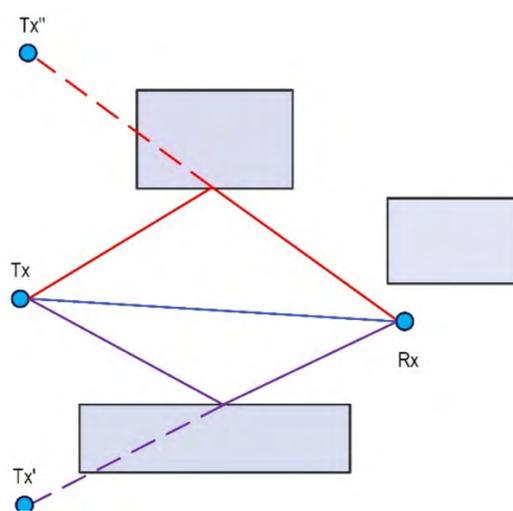


Fig. 1. Ray Tracing Propagation Model

B. Simulation

For the development of the simulator, it was necessary to use the following tools.

- NvidiaCUDA 10.0: allows the development of applications with graphics engine.
- Microsoft visual studio community 2017: programming software under which the code was written.
- Nvidia OPTIX 6.5: ray tracing API, allows integration of software with 3D dimensioning.
- CMake 3.19.4: allows the compilation of Optix with Visual Studio 2017 programming software.
- Unity 2018.4.21f1: video game development platform on which the stage (Digital Twin) was mounted.

Is important to highlight that Unity has full integration with Nvidia OPTIX, which allow directly calculate the ray tracing reflection and diffraction within the proposed stages.

1. Simulator parameters

As any simulator, input and output parameters were defined, these are.

Input Parameters:

- **Transmission Power.** - The transmission power at the real and simulated stages was set to 18 dBm.
- **Cable and connector losses.** - These values can vary between 1 to 3 dB, however, for the proposed study this value was set to 2 dB.
- **Distance.** - The distance varies according to the proposed stage (Section II.D), these are:
 - o Stage 1: From 0.34m to 7m
 - o Stage 2: From 6m to 12m
- **Tx – Rx Antenna Gain.** – The antenna Gain for the proposed study between 10 and 20 GHz.
- **Number of reflections.** - The number of reflections were defined by default at 5, however, this may be modified according to the needs of the study.
- **frequency.** - The frequency is defined between 10 to 20 GHz.

Output Parameters:

- **Propagation losses.** - Value that refers to the amount of power that has been lost during the signal path. For the models studied, it depends on both the distance and the operating frequency.
- **Reception Power.** - It is the power that reach the receptor.
- **Distance-Multipath.** - Travel distance values for each ray of the Multipath components to the receiving antenna.

In the simulator, all the parameters are shown within a "Canvas"; this Canvas is a container within the elements that are part of the results graphical interface are placed, as shown in Fig. 2.

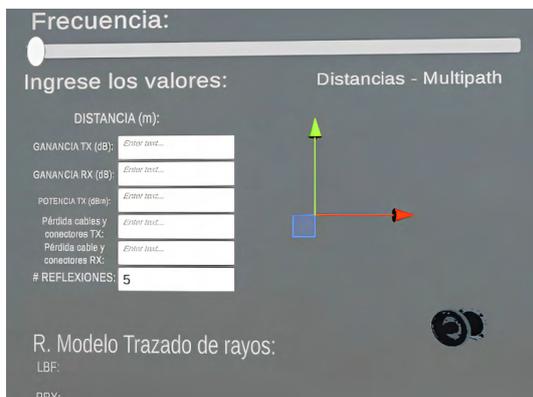


Fig. 2. Unity "Canvas" utility

2. Calculation of Rx Powers

First, the losses for each path are calculated using the Free Space Propagation Model [10], as is Shown in the Ec. 1:

$$L_{bf}(dB) = 32,45 + \log f(\text{Mhz}) + 20 \log d(\text{Km}) \quad (1)$$

Where, L_{bf} is the Propagation losses in free space, f is the transmitting frequency and d is the distance between Transmitter and receiver. Once the value of the transmission losses has been calculated, the received power of each ray was obtained using the Ec. 2.

$$P_{rx_i} = P_{tx} + G_{tx} - L_{cc-tx} - L_{bf_i} + G_{rx} - L_{cc-rx} - \sum_{j=1}^n L_{ref} \quad (2)$$

Where the P_{rx_i} is the receiver power in dBm of the i -th ray, G_{tx} and G_{rx} are the transmission and reception antenna gain in dBi, L_{bf_i} is the Free Space Losses for i -th ray obtain with the Ec.1 in dB, L_{cc-tx} and L_{cc-rx} are the transmission and reception feeder lost in dB, finally $-\sum_{j=1}^n L_{ref}$ are the losses in dB due to the n reflections of the ray in the obstacles, this value depends on the obstacle material, fin this case, it was used a 3 dB reflection loss in each obstacle. Finally with the Ec. 3 the total receiver power was calculated.

$$P_{rx} = 10 \log \left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{P_{rx_i}}{10}} \right) \quad (3)$$

Where P_{rx} is the total received power in dBm, P_{rx_i} is the received power in dBm of the i -th ray calculate with the Ec.2, and n is number of rays that reach the receiver.

In other hand, to compare the simulate and measured values, the Root Mean squared error (RMSE) was calculated using the Ec. 4.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{rx_{i_s}} - P_{rx_{i_m}})^2} \quad (4)$$

Where n is the number of values, $P_{rx_{i_s}}$ and $P_{rx_{i_m}}$ are the simulated and measured received power, respectively.

C. Stages

A Digital Twin of FIE's building was used for the stages. The FIE Digital Twin was mounted in UNITY as is Shown in Fig.3. Then, two stages within the Digital Twin with line of sight (LOS) were chosen.

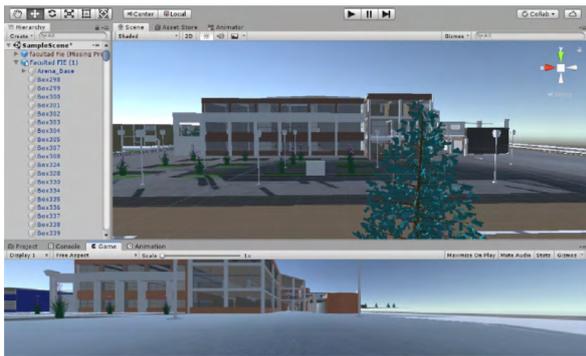


Fig. 3. Digital Twin of Faculty of Informatics and Electronics in Unity

Stage 1: For the first stage, it is proposed an analysis of the propagation with LOS, but at short distance. This scenario is performed inside the microwave laboratory, which is located on the third floor of the building, as shown in Fig. 4. The maximum and minimum possible distance between Tx y Rx is 7 m and 0,34 m (Far Field for 20 GHz), respectively.

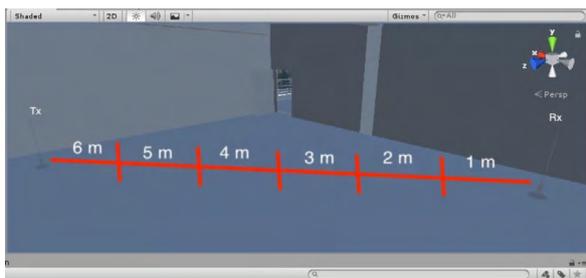


Fig. 4. Simulation 1, LOS in the Microwave Laboratory

Stage 2: In this case, other LOS stage was proposed, but with a greater distance. Therefore, a stage in the hallway of the ground floor of the FIE building was chosen. In this case, the maximum and minimum distance are 12 m and 6m, respectively. As is shown in Fig. 5.

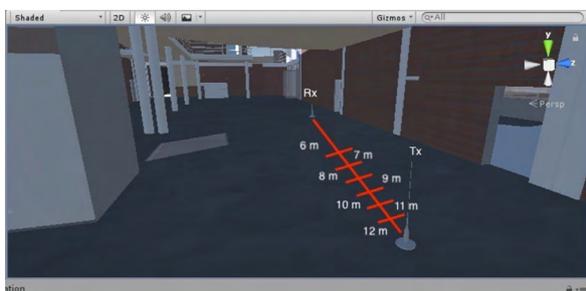


Fig. 5. Simulation 2, LOS propagation in first floor hall.

D. Measurements

The real measurements were performed in the real stages (Fig. 6 and Fig. 7). The measurement setup is shown in Fig. 6. A Signal Generator

Anritsu MG3692C was used for the transmitter. The receiver power was measured with an Anritsu MS2724C Spectrum analyzer, and for both, Transmitter and Receiver a Horn antenna with same characteristics was used. The measurements were taken with steps of 1 GHz in frequency and 1m in distance.



Fig. 6. Real Stage 1, Microwave laboratory



Fig. 7. Real Stage 2, FIE ground floor

The gain of the horn antennas for the studied frequencies is shown in the Fig.8.

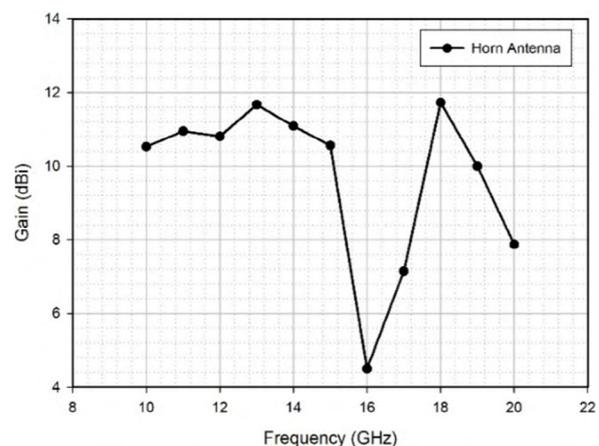


Fig. 8. Horn Antenna Gain

III. Results and discussion

In this section the results of simulations and real measurements are presented and compared.

A. Stage 1: Microwave Laboratory

The simulations were carried on over the FIE Digital Twin for the frequencies and distances defined in the Section II and considering all the reflected rays that reach the receiver as shown in Fig. 9.

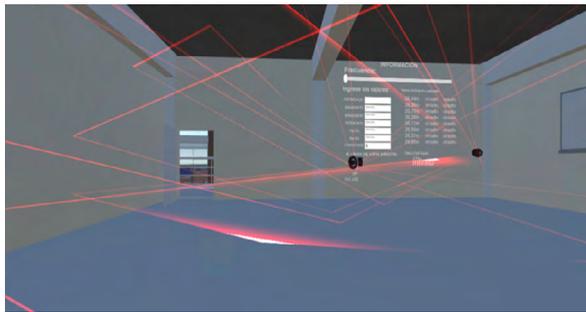


Fig. 9. Ray Tracing simulated view (Stage 1).

The simulated reception power for the different frequencies and distances are shown in the Fig. 10. It should be noted that as expected, the receiver power decreases with the distance and the frequency with a difference of 14 dB approximately for 1m compared to 7 m, and 11 dB for 10 GHz, compared with 20 GHz.

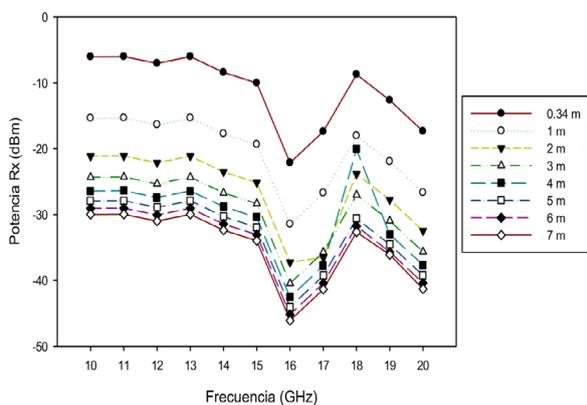


Fig. 10. Simulated received power using Ray Tracing Model (Stage 1)

In the other hand, the Fig. 11 shows the measured received power in the same stage. As it is shown in Fig. 11, the measured values have a similar behavior such as the simulated ones. In this case the RMSE is 5.57, this difference is considered acceptable, one of its causes is due to simulation doesn't consider the office furniture present in the real stage.

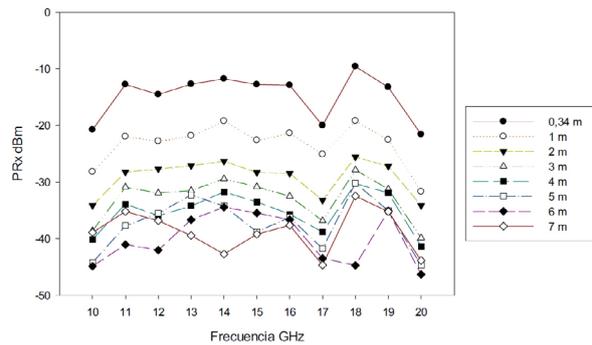


Fig. 11. Measurement received power (Stage 1)

Finally, In the Fig. 12 a comparison between simulated receiving power and real measurements for the shortest (0.34 m) and longest distance (7 m) is presented. The RMSE for 0.34 m. distance is 6,72, and for 7 m distance is 6,44.

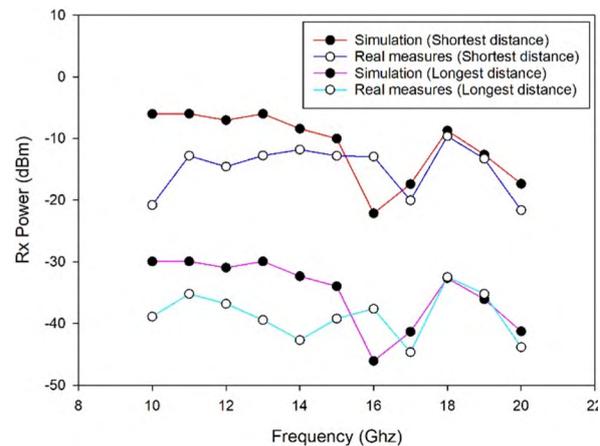


Fig. 12. Simulate and measurement receive power: Shortest (0.34 m) and Longest distance (7 m) (Stage 1).

B. Stage 2: FIE Ground floor

As in the previous stage, simulations were carried out on the FIE's Digital Twin considering all the reflected rays that reach the receiver as it is shown in Fig. 13.

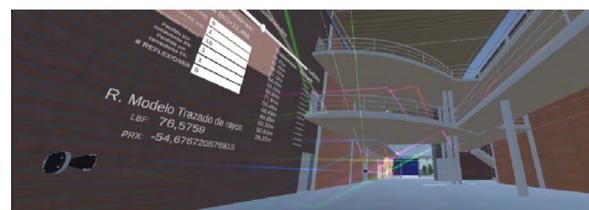


Fig. 13. SSimulator running (Scenario 2)

Fig. 14 shows the simulated receiving power using the Ray Tracing model. Also in this case as expected, the receiver power decreases with

distance and frequency. The difference between 6m and 12m is 5dB for the same frequency, and 12 dB between 10 GHz to 20 GHz for the same distance.

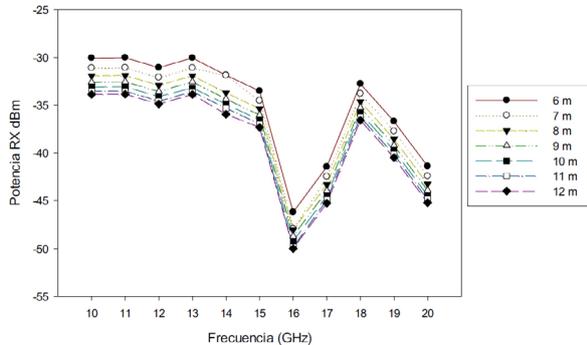


Fig. 14. Simulated received power using Ray Tracing Model (Stage 2)

In the other hand, the measurements for this stage are shown in the Fig. 15. In this case the RMSE between real measurements and simulated reception power is 7.

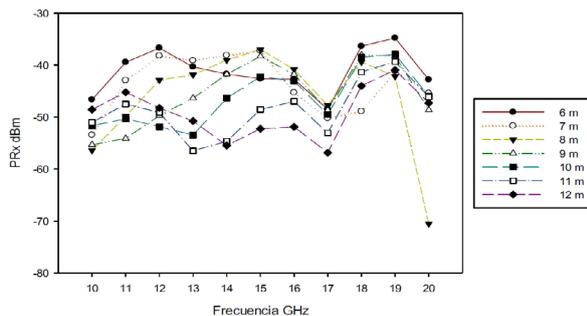


Fig. 15. Measurement received power (Stage 2)

As it could be observed in the Fig. 16, the variations in the results are approximated to those obtained in the Microwave Laboratory (Stage 1); the simulated values have a difference of around 10 dB with the real ones. Also it can be noted that the difference tends to decrease when frequency increases.

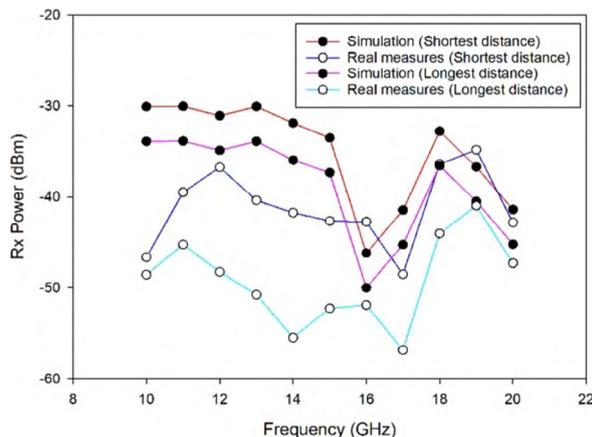


Fig. 16. Simulate and measurement receive power: Shortest (6 m) and longest distance (12 m) (Stage 2).

Since it is a more open scenario, a greater power variation is obtained compared with the stage 1, i.e. The RMSE for 6 m. distance is 8.32, and for 12 m distance is 12.10, compared to a RMSE of 6.44 for 7 m distance in stage 1. Also, it can be noted that the difference between the lower frequency (10 GHz) and higher studied frequency (20 GHz.) are 12 dB and 3 dB, approximately. The same behavior can be seen in stage 1, it means that at higher frequencies the simulated values are more accurate; this is because at higher frequencies the Fresnel zone is smaller, i.e. and could be approximated to a ray.

IV. Conclusions

- The difference between simulated and measured values for the first stage in terms of RMSE are 6.72 for the shortest path (0.34 m) and 6.44 for the longest (6 m). In other hand, for the second stage the RMSE are 8.32 and 12.1 for the shortest distance (6 m) and longest Distance (12 m), respectively. These differences are due in the Digital Twin the office furniture was not considered.
- The difference between the lower frequency (10 GHz) and Higher studied frequency (20 GHz) for the same distance are 12 dB and 3 dB, approximately. It could be noted that since the frequency increases, the simulate values are more accurate. This is due that at higher frequencies, the Fresnel zone are smaller, and the wave propagation could be approximated to a ray.
- The use of tool that in a beginning was development for light reflection in high quality graphics, this is the case of Nvidia OPTIX. Could be used to accelerate propagation studies at higher frequencies and complex stages, for example for indoor propagation environments like those presented in this paper.

V. Referencias

[1] ETSI 2021, p. 29 (3GPP TS 38.104 version 15.13.0 release 15)

[2] S. Budiyanto, L. M. Silalahi, F. A. Silaban, N. P. Atmadja and I. M. Fajar Rahayu, "Coexistence Analysis of 5G and Satellite Networks at 3.5 GHz Frequency," 2020 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (Comnetsat), Batam,

- Indonesia, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/Comnetsat50391.2020.9328989.
- [3] Y. Cho, H. -K. Kim, M. Nekovee and H. -S. Jo, "Coexistence of 5G With Satellite Services in the Millimeter-Wave Band," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 163618-163636, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3022044.
- [4] E. Egea-Lopez, F. Losilla, J. Pascual-Garcia and J. M. Molina-Garcia-Pardo, "Vehicular Networks Simulation With Realistic Physics," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 44021-44036, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2908651.
- [5] S. Parker et al. "GPU Ray Tracing". *Communications of the ACM*. pp. 93-101. 2013. [Online] Available: https://www.classes.cs.uchicago.edu/archive/2016/winter/320011/paper_s/p93-parker.pdf
- [6] P. Nelimarkka. "Teaching unity3D in game programming module". pp. 1-104. 2014. [Online] Available: URL: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/75534/bachelors_thesis_paavo_nelimarkka.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [7] A. Penzentcev. "Architecture and implementation of the system for serious games in Unity 3D". Czech Republic. pp. 1- 68. 2015. [Online] Available: <https://is.muni.cz/th/whosc/Thesis.pdf>
- [8] L. Meiling. "Indoor radio propagation modeling for system performance prediction". L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Villeurbanne- Francia. pp. 1-126. 2013. [Online] Available: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00937481/document>



REVISTA PERSPECTIVAS

REVISTA TÉCNICA CIENTÍFICA DE LA FIE

- ELECTROMAGNETISMO Y ÓPTICA APLICADA.
 - AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL.
 - SOFTWARE Y APLICACIONES.
- REDES Y COMUNICACIÓN DE DATOS.
 - SISTEMAS ELECTRÓNICOS.
 - INFORMÁTICA EDUCATIVA.
 - SISTEMAS DIGITALES.
 - TELECOMUNICACIONES.
 - DISEÑO GRÁFICO.
 - TIC`S.



Facultad de
Informática y
Electrónica

<http://perspectivas.esoch.edu.ec/>