Handbook T-I

Aplicaciones láser en la Ingeniería

FIGUEROA-RAMÍREZ, Sandra Jazmín *Coordinadora*

ECORFAN®

ECORFAN®

Coordinadores
FIGUEROA-RAMÍREZ, Sandra Jazmín. PhD

Editor en Jefe
VARGAS-DELGADO, Oscar. PhD

Directora Ejecutiva
RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD

Director Editorial
PERALTA-CASTRO, Enrique. MsC

Diseñador Web
ESCAMILLA-BOUCHAN, Imelda. PhD

Diagramador Web
LUNA-SOTO, Vladimir. PhD

Asistente Editorial
SORIANO-VELASCO, Jesus. BsC

Traductor
DÍAZ-OCAMPO, Javier. BsC

Filóloga
RAMOS-ARANCIBIA, Alejandra. BsC

ISBN: 978-607-8695-71-3
Sello Editorial ECORFAN: 607-8695
Número de Control HALI: 2021-016
Clasificación HALI (2021): 311221-1016

©ECORFAN-México, S.C.

Ninguna parte de este escrito amparado por la Ley Federal de Derechos de Autor, podrá ser reproducida, transmitida o utilizada en cualquier forma o medio, ya sea gráfico, electrónico o mecánico, incluyendo, pero sin limitarse a lo siguiente: Citas en artículos y comentarios bibliográficos de compilación de datos periodísticos radiofónicos o electrónicos. Para los efectos de los artículos 13, 162,163 fracción I, 164 fracción I, 168, 169,209 fracción III y demás relativos de la Ley Federal de Derechos de Autor. Violaciones: Ser obligado al procesamiento bajo ley de copyright mexicana. El uso de nombres descriptivos generales, de nombres registrados, de marcas registradas, en esta publicación no implican, uniformemente en ausencia de una declaración específica, que tales nombres son exentos del protector relevante en leyes y regulaciones de México y por lo tanto libre para el uso general de la comunidad científica internacional. HALI es parte de los medios de ECORFAN (www.ecorfan.org)

Handbooks

Definición de Handbooks

Objetivos Científicos

Apoyar a la Comunidad Científica Internacional en su producción escrita de Ciencia, Tecnología en Innovación en las Áreas de investigación CONACYT y PRODEP.

ECORFAN-Mexico S.C es una Empresa Científica y Tecnológica en aporte a la formación del Recurso Humano enfocado a la continuidad en el análisis crítico de Investigación Internacional y está adscrita al RENIECYT de CONACYT con número 1702902, su compromiso es difundir las investigaciones y aportaciones de la Comunidad Científica Internacional, de instituciones académicas, organismos y entidades de los sectores público y privado y contribuir a la vinculación de los investigadores que realizan actividades científicas, desarrollos tecnológicos y de formación de recursos humanos especializados con los gobiernos, empresas y organizaciones sociales.

Alentar la interlocución de la Comunidad Científica Internacional con otros centros de estudio de México y del exterior y promover una amplia incorporación de académicos, especialistas e investigadores a la publicación Seriada en Nichos de Ciencia de Universidades Autónomas - Universidades Públicas Estatales - IES Federales - Universidades Politécnicas - Universidades Tecnológicas - Institutos Tecnológicos Federales - Escuelas Normales - Institutos Tecnológicos Descentralizados - Universidades Interculturales - Consejos de CyT - Centros de Investigación CONACYT.

Alcances, Cobertura y Audiencia

Handbooks es un Producto editado por ECORFAN-Mexico S.C en su Holding con repositorio en México, es una publicación científica arbitrada e indizada. Admite una amplia gama de contenidos que son evaluados por pares académicos por el método de Doble-Ciego, en torno a temas relacionados con la teoría y práctica de las Área de investigación CONACYT y PRODEP respectivamente con enfoques y perspectivas diversos, que contribuyan a la difusión del desarrollo de la Ciencia la Tecnología e Innovación que permitan las argumentaciones relacionadas con la toma de decisiones e incidir en la formulación de las políticas internacionales en el Campo de las Ciencias. El horizonte editorial de ECORFAN-Mexico® se extiende más allá de la academia e integra otros segmentos de investigación y análisis ajenos a ese ámbito, siempre y cuando cumplan con los requisitos de rigor argumentativo y científico, además de abordar temas de interés general y actual de la Sociedad Científica Internacional.

Consejo Editorial

ROCHA - RANGEL, Enrique. PhD
Oak Ridge National Laboratory

CARBAJAL - DE LA TORRE, Georgina. PhD
Université des Sciencies et Technologies de Lille

GUZMÁN - ARENAS, Adolfo. PhD
Institute of Technology

CASTILLO - TÉLLEZ, Beatriz. PhD
University of La Rochelle

FERNANDEZ - ZAYAS, José Luis. PhD
University of Bristol

DECTOR - ESPINOZA, Andrés. PhD
Centro de Microelectrónica de Barcelona

TELOXA - REYES, Julio. PhD
Advanced Technology Center

HERNÁNDEZ - PRIETO, María de Lourdes. PhD
Universidad Gestalt

CENDEJAS - VALDEZ, José Luis. PhD
Universidad Politécnica de Madrid

HERNANDEZ - ESCOBEDO, Quetzalcoatl Cruz. PhD
Universidad Central del Ecuador

Comité Arbitral

URBINA - NAJERA, Argelia Berenice. PhD
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

PEREZ - ORNELAS, Felicitas. PhD
Universidad Autónoma de Baja California

CASTRO - ENCISO, Salvador Fernando. PhD
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

CASTAÑÓN - PUGA, Manuel. PhD
Universidad Autónoma de Baja California

BAUTISTA - SANTOS, Horacio. PhD
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

GONZÁLEZ - REYNA, Sheila Esmeralda. PhD
Instituto Tecnológico Superior de Irapuato

RUELAS - SANTOYO, Edgar Augusto. PhD
Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas

HERNÁNDEZ - GÓMEZ, Víctor Hugo. PhD
Universidad Nacional Autónoma de México

OLVERA - MEJÍA, Yair Félix. PhD
Instituto Politécnico Nacional

CUAYA - SIMBRO, German. PhD
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica

Cesión de Derechos

El envío de una Obra Científica a ECORFAN Handbooks emana el compromiso del autor de no someterlo de manera simultánea a la consideración de otras publicaciones científicas para ello deberá complementar el Formato de Originalidad para su Obra Científica.

Los autores firman el Formato de Autorización para que su Obra Científica se difunda por los medios que ECORFAN-México, S.C. en su Holding México considere pertinentes para divulgación y difusión de su Obra Científica cediendo sus Derechos de Obra Científica.

Declaración de Autoría

Indicar el Nombre de 1 Autor y 3 Coautores como máximo en la participación de la Obra Científica y señalar en extenso la Afiliación Institucional indicando la Dependencia.

Identificar el Nombre de 1 Autor y 3 Coautores como máximo con el Número de CVU Becario-PNPC o SNI-CONACYT- Indicando el Nivel de Investigador y su Perfil de Google Scholar para verificar su nivel de Citación e índice H.

Identificar el Nombre de 1 Autor y 3 Coautores como máximo en los Perfiles de Ciencia y Tecnología ampliamente aceptados por la Comunidad Científica Internacional ORC ID - Researcher ID Thomson - arXiv Author ID - PubMed Author ID - Open ID respectivamente

Indicar el contacto para correspondencia al Autor (Correo y Teléfono) e indicar al Investigador que contribuye como primer Autor de la Obra Científica.

Detección de Plagio

Todas las Obras Científicas serán testeadas por el software de plagio PLAGSCAN si se detecta un nivel de plagio Positivo no se mandará a arbitraje y se rescindirá de la recepción de la Obra Científica notificando a los Autores responsables, reivindicando que el plagio académico está tipificado como delito en el Código Penal.

Proceso de Arbitraje

Todas las Obras Científicas se evaluarán por pares académicos por el método de Doble Ciego, el arbitraje Aprobatorio es un requisito para que el Consejo Editorial tome una decisión final que será inapelable en todos los casos. MARVID® es una Marca de derivada de ECORFAN® especializada en proveer a los expertos evaluadores todos ellos con grado de Doctorado y distinción de Investigadores Internacionales en los respectivos Consejos de Ciencia y Tecnología el homologo de CONACYT para los capítulos de America-Europa-Asia-Africa y Oceania. La identificación de la autoría deberá aparecer únicamente en una primera página eliminable, con el objeto de asegurar que el proceso de Arbitraje sea anónimo y cubra las siguientes etapas: Identificación del ECORFAN Handbooks con su tasa de ocupamiento autoral - Identificación del Autores y Coautores- Detección de Plagio PLAGSCAN - Revisión de Formatos de Autorización y Originalidad-Asignación al Consejo Editorial- Asignación del par de Árbitros Expertos-Notificación de Dictamen-Declaratoria de Observaciones al Autor-Cotejo de la Obra Científica Modificado para Edición-Publicación.

ECORFAN Aplicaciones láser en la Ingeniería

Volumen I

El Handbook ofrecerá los volúmenes de contribuciones seleccionadas de investigadores que contribuyan a la actividad de difusión científica de la Universidad Autónoma del Carmen en sus áreas de investigación en Ingeniería. Además de tener una evaluación total, en las manos de los directores de la Universidad Autónoma del Carmen se colabora con calidad y puntualidad en sus capítulos, cada contribución individual fue arbitrada a estándares internacionales (RESEARCH GATE, MENDELEY, GOOGLE SCHOLAR y REDIB), el Handbook propone así a la comunidad académica, los informes recientes sobre los nuevos progresos en las áreas más interesantes y prometedoras de investigación en Ingeniería.

Para futuros volúmenes:
http://www.ecorfan.org/handbooks/

FIGUEROA-RAMÍREZ, Sandra Jazmín

Coordinadora

Aplicaciones láser en la Ingeniería T-I
Handbooks

Universidad Autónoma del Carmen – México. Diciembre, 2021

DOI: 10.35429/H.2021.16.1.116

© 2021 All Rights Reserved ECORFAN® México • Bolivia • Spain • Ecuador • Cameroon • Colombia • Taiwán • Salvador • Guatemala • Nicaragua • Paraguay • Democratic Republic of Congo • Perú

Prefacio

El Handbook “Aplicaciones Láser en la Ingeniería” es un producto de las investigaciones de los profesores asociados a la Red Temática del Sureste de Sistemas Láser Aplicados a la Ingeniería y Comunicaciones, adscritos a las Universidades del Sureste del país: la Universidad de Quintana Roo, la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, la Universidad Autónoma de Yucatán, la Universidad Autónoma del Carmen, y la Universidad Veracruzana, además de la Universidad de San Nicolas de Hidalgo. Con líneas de investigación: Métodos Láser para la caracterización de materiales, Sensores por Sistemas Ópticos, y por Sistemas Electrónicos, y Modelación de Fenómenos Físicos, Presentes en los Sistemas Láser.

Como tal los láseres son fuentes de radiación electromagnética que, al incidir en un medio material, ya sea orgánico o inorgánico, se producen una serie de efectos físicos, como la transmisión, reflexión, dispersión, y dependiendo de su intensidad, afectan las condiciones de estabilidad de intercambio de energía de átomos y moléculas que conforman la materia. Estos efectos a nivel atómico o molecular desencadenan una serie de aplicaciones multidisciplinarias a nivel macroscópico, en el campo de la ingeniería ambiental; en la en la fabricación de nuevos materiales, para la generación de energía, en la inclusión de sensores ópticos, electrónicos, o bien foto sensores, para la medición de velocidad, de temperatura, de presión, incluso para la detección temprana de la diversidad de tipos de cáncer, etc.

FIGUEROA-RAMÍREZ, Sandra Jazmín
Coordinadora

Resumen

Cerecedo & *Padilla* explican La generación de energía a través de fuentes renovables es de suma importancia para la humanidad, *Flores, Bandala, Benavides* y *Flores* presentan resultados de obtención de espectros Raman de una muestra sedimentaria, por medio de un diseño óptico de microscopía Raman, *Martínez, Patiño* y *Flores* realizan una revisión de los estudios más relevantes sobre el análisis espectroscópico Raman de nanopartículas de ferritas de cobalto, en específico, $CoFe_2O_4$, O, *Benavides*, *De la Cruz* y *Flores* estudian el efecto que tiene la longitud de onda láser sobre la reflectividad de las muestras de niobio, *García, Nájera, Martínez* y *Vázquez* trataron muestras de agua contaminadas con diferentes microorganismos el resultado fue evaluado para diferentes condiciones de iluminación y presencia de colorante, *Calvillo, Pérez, Ponce De León* e *Ibarra* presentan un video animado de la creación de hologramas de Fourier realizado con el programa de animación 3D Blender, *Sánchez, Ceballos, Rodríguez, Toral* y *Alvarez* analizan la sensibilidad de un láser de fibra óptica dopada con tierras raras bajo el efecto de la variación de la temperatura y del perfil de adelgazamiento de la fibra óptica, esto con la finalidad de poder mostrar la viabilidad de uso de la fibra óptica adelgazada como un sensor de temperatura, *Toral, Chan, Vázquez* y *May* proponen una descripción de la pérdida de paquetes de VoIP basada en comportamientos microscópicos y macroscópicos, *Youness, Álvarez*, y *Vázquez* llevaron a cabo el análisis de sensibilidad, y mostró, además, que todas las variables de entrada (amortiguación, densidad, presión, temperatura, flujo másico, entalpía, frecuencia y magnitudes de vibración) tienen un fuerte efecto en las turbinas de vapor.

FIGUEROA-RAMÍREZ, Sandra Jazmín
Coordinadora

Contenido

		Página
1	**Optoenergía** CERECEDO-NÚÑEZ, Héctor Hugo & PADILLA-SOSA, Patricia	1-7
2	**Implementación de un Sistema Láser para Microscopía Raman** FLORES-GIL, Aarón, BANDALA-GARCÉS, Magdalena, BENAVIDES, Olena y FLORES-TRUJILLO, Juan Gabriel	8-18
3	**Espectroscopia Raman de Nanopartículas de Ferritas de Cobalto** MARTÍNEZ-VARGAS, Sergio, PATIÑO-CARACHURE, Cristóbal y FLORES-GIL, Aarón	19-26
4	**Un estudio comparativo experimental sobre el efecto de longitud de onda láser en la reflectividad del niobio en el régimen de ablación** BENAVIDES, Olena, DE LA CRUZ-MAY, Lelio, y FLORES-GIL, Aarón	27-38
5	**Fotosensibilización como herramienta para la remoción de coliformes totales en agua** GARCÍA-LARA, Carlos Manuel, NÁJERA-AGUILAR Hugo Alejandro, MARTÍNEZ-SALINAS, Rebeca Isabel y VÁZQUEZ-SÁNCHEZ, Rubén Alejandro	39-47
6	**Desarrollo de software educativo para óptica** CALVILLO-VAZQUEZ, Ángel E, PÉREZ-CORTÉS, Mario, PONCE DE LEÓN, Yenisey e IBARRA-TORRES, Juan Carlos	48-57
7	**Dopado y Adelgazamiento de la Fibra Óptica para el Sensado de Temperatura** SANCHEZ-LARA, Rafael, RODRIGUEZ-BLANCO, Marco A., TORAL-CRUZ, Homero y ALVAREZ-CHÁVEZ, José A.	58-70
8	**Estudio y Caracterización de la Pérdida de Paquetes en Sistemas de Voz sobre IP** TORAL-CRUZ, Homero, CHAN-PUC, Freddy Ignacio, VÁZQUEZ-ÁVILA, José Luis y MAY-ALARCÓN, Manuel	71-80
9	**Estimación de la Vida Útil de la Turbina de Vapor de 110MW Utilizando Redes Neuronales Artificiales** YOUNESS, El Hamzaoui, ÁLVAREZ-ARELLANO, Juan A y VÁZQUEZ-ÁVILA, José L.	81-96

Chapter 1 Optoenergía

Capítulo 1 Optoenergy

CERECEDO-NÚÑEZ, Héctor Hugo*† & PADILLA-SOSA, Patricia

Laboratorio de Óptica Aplicada, Facultad de Física, Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México.

ID 1st Author: *Héctor Hugo, Cerecedo-Núñez* / **ORC ID**: 0000-0001-8132-7272, **CVU CONACYT ID**: 19246

ID 1st Coauthor: *Patricia, Padilla-Sosa* / **ORC ID**: 0000-0001-6558-5562, **CVU CONACYT ID**: 34944

DOI: 10.35429/H.2021.16.1.7

* hcerecedo@uv.mx

S. Figueroa (AA.). Aplicaciones Láser en la Ingeniería. Handbooks-TI-©ECORFAN-Mexico, 2021.

Abstract

The generation of energy through renewable sources is of paramount importance for humanity since we are looking for developing clean and sustainable systems. In that enterprise, two branches of Physics, Optics and Photonics, has been dedicated to developing significant studies related to this topic. Optics and Photonics are related with study of generation, propagation and detection of electromagnetic radiation. As we know light, a type of energy, is electromagnetic radiation. In this paper we mention a term called Optoenergy. In this document, we will explain that this concept is beyond just considering photovoltaic cells.

Energy Conservation, Light Management, Photoenergy, Photonics

Resumen

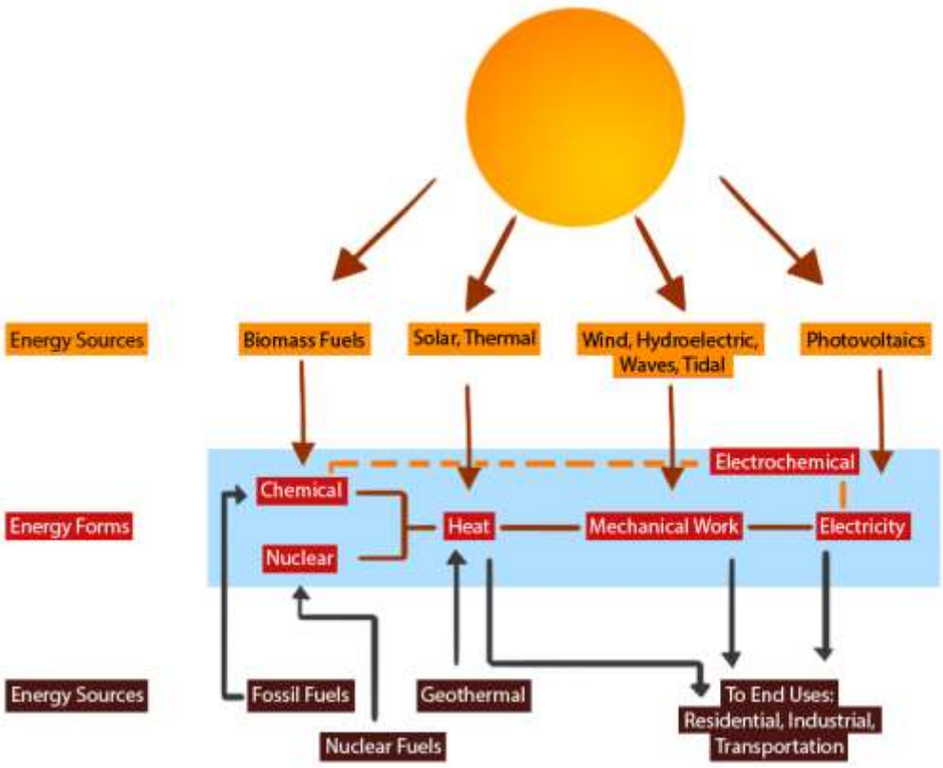
La generación de energía a través de fuentes renovables es de suma importancia para la humanidad ya que buscamos desarrollar sistemas limpios y sostenibles. En este contexto, dos ramas de la Física, la Óptica y la Fotónica, se han dedicado a desarrollar importantes estudios relacionados con este tema. La Óptica y la Fotónica están relacionadas con el estudio de la generación, propagación y detección de radiación electromagnética. Como sabemos, un tipo de energía es justamente la radiación electromagnética. En este artículo nos avocamos en un término denominado Optoenergía. En este documento explicaremos que este concepto va más allá de considerar las células fotovoltaicas.

Conservación de Energía, aprovechamiento de la luz, Fotoenergía, Fotónica.

1. Introduction

At present we relate energy in terms of fuel for transport, heat, electricity, among others; however, that does not define energy; that merely tells us that these fuels give us. Despite the concept of energy is of paramount importance in the subjects of engineering and science, it cannot be easily defined. The notion of energy is more inclusive (Serway & Jewett, 2004). According to (Chang & Goldsby, 2016), "The energy is usually defined as the capacity to do work; all forms of energy are capable of doing work." There are many types of energy (SolarSchools, 2018); the majorities of these are represented in Figure 1:

Figure 1 Types of energy

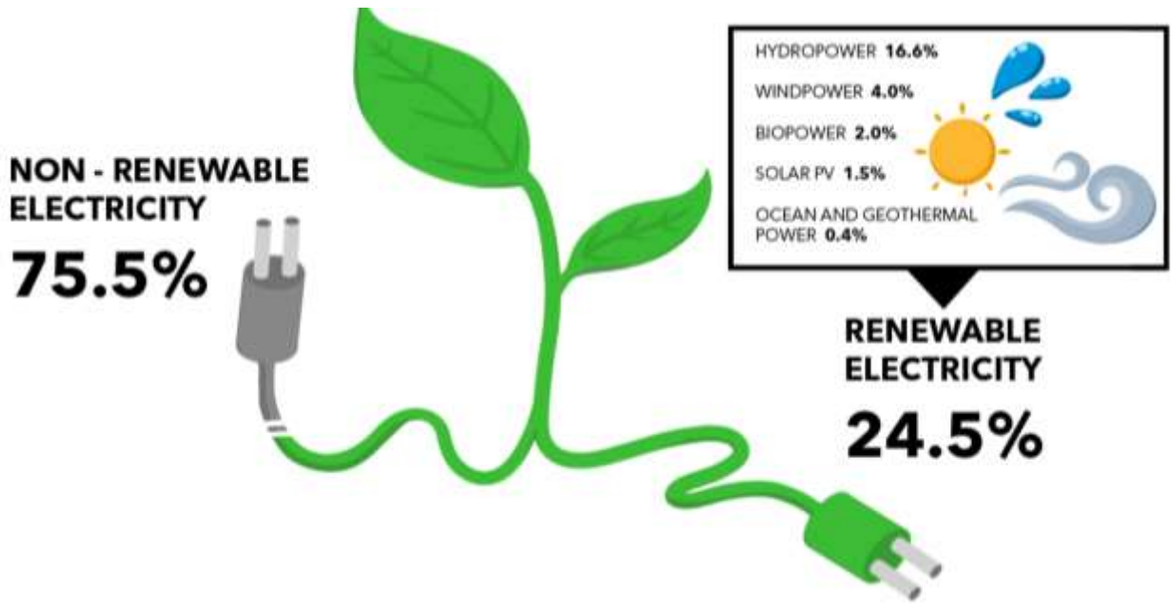


Source: Own Elaboration

Some types of energy are related each other, as one can transform into another type of energy. Of those, is highlighted the energy sources that have been of great interest in production mainly of electrical energy.

On the other hand, at the present, the energy sector is in a phase of change and reflection because conventional energy sources are polluting and limited. That is why there is extensive socioeconomic and environmental interest in the development of clean renewable energies; for this reason, it becomes necessary for the development of clean and sustainable systems. Agreeing to reference (REN21, 2018), Figure 2 shows a scheme of the renewable energy used in the generation of electric energy in comparison with conventional energy sources.

Figure 2 Estimated Renewable Energy Share of Global Electricity Production (REN21, 2018)



Source: Own Elaboration

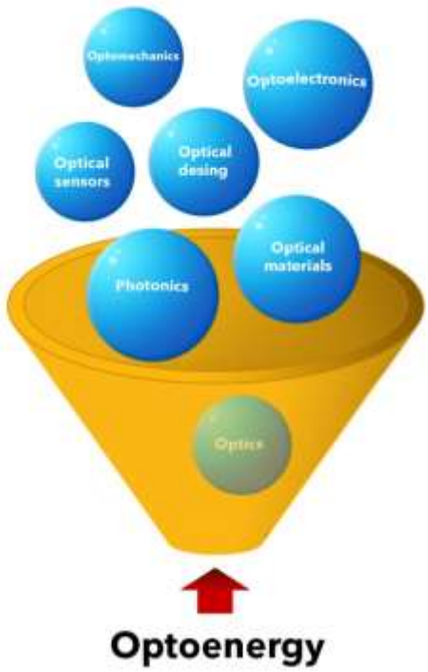
2. The concept of *Optoenergy*

Optics study the behavior and properties of light at visible, infrared and ultraviolet wavelengths. Light is a way of energy. While the term photonics emphasizes the replacement of the electron by the photon in typical operations of the electronics (B.E.A. & M.C., 2017). Photonics has been established as an autonomous discipline and is present in technologies for everyday use as optical sensors and telecommunications (SPIE, 2018), (OSA, 2018), (IEEE, 2018) (Barbosa García & et-al, 2016).

Optics and photonics develop an increasingly relevant role throughout the world (light, 2018); as they are keys in industrial processes that allow telecommunications, energy generation (Kafafi, 2015), detection and diagnosis of diseases (Prasad, 2003), among others (McDonald, 2007).

Since the scientific and technological point of view, we have conceived the ***optoenergy*** as an area of research and development, broad and multidisciplinary; in which we must consider not only the generation of energy from light radiation, as fundamental concept (here typically involves optics and photonics concepts); but also include the design and development of instruments; i.e. optical design, optical engineering, and optoelectronic instrumentation necessary to carry out this generation, see Figure 3; likewise, the optoenergy also would include the development and employment of sensors, of type optical, for the various forms of monitoring energy generation.

Figure 3 Optoenergy involves optics and photonics

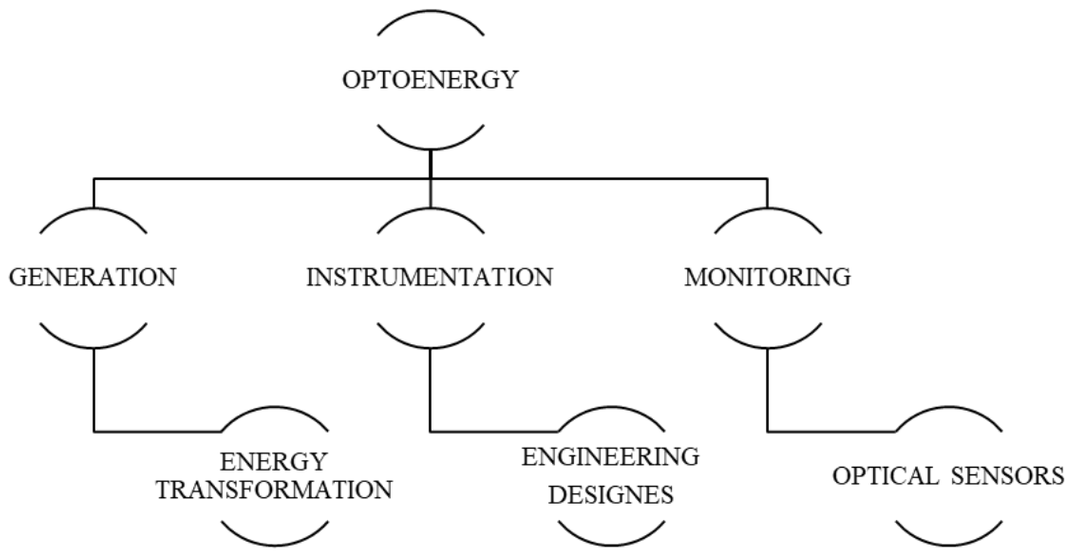


Source: Own Elaboration

Another way to mention the concept of ***optoenergy***, is represented in Figure 4; the optoenergy go on an area of multidisciplinary research which involves:

- The Generation would refer to the understanding of fundamentals and physical description of the phenomena involved in the instant that optical energy is transformed into another type of energy. For example, the photoelectric effect.
- The Instrumentation (mechanic, electronics, etc.) necessary for a suitable manipulation, concentration and optimum in the generation of luminous energy. For example, photocells, solar reflectors, etc.
- The development of methods or techniques for the monitoring of physical parameters; during the generation process of energy (but not only in the photovoltaic generation).

Figure 4. Diagram of the branches of optoenergy



Source: Own Elaboration

3. Discussions

Since years ago and unconscious, the optoenergy concept had been present in literature. Based in the branches of optoenergy we mention some examples of their presence.

Solar energy generation is related with fundamentals, the theoretical study of light interaction with mater, for exmple the photovoltaic effect. There is a lot to say at respect.

Respect to the branch of instrumentation, this is related to the optical design of several types of surfaces and optical devices to collect light. That is also related with the study of materials and their configuration, optical filters to different types of photovoltaic cells, among others.

Monitoring in principle is related to the implementation of optical sensors, but not only in solar energy. This could be implemented to monitor may others ways of energy production. Some specific examples should be: optical sensors to track solar energy to improve the energy collection; the use of optical sensors, to monitor several parameters in energy production (angular speed, vibration, dilatation, hydrostatic flux, temperature, etc.)

We can mention some other words related to a multidisciplinary relationship: In recent years, optical design topics are rapidly expanded into the infrared energy band; offering new approaches to reduce thermal emission losses and to do non-contact radioactive cooling of cells: as well as optical and electronic circuitry (Boriskina, 2016).

It is now possible and economically practical, cover an energy demand increasingly wide; with the production of solar energy in almost all over the world; including in the boreal zones and the Polar Regions. While the solar radiation in these regions is of intensity comparatively low, and the production of energy will be reduced to a large extent during the winter; photovoltaic cells provide a viable source of energy. For that reason, they are looking at the optical properties of the snow would get better efficiency in the cells or panels (Andenæs, 2018).

The world's largest solar plant will be the rambling park; it is expected to produce 2,000 megawatts of electricity, enough to feed 700,000 households, and the latest milestone in India's transition to generating more green energy. Prime Minister of India Narendra Modi has to 100 of capacity in 2022- almost 30 more than it three ago and to the total output of Spain (Bengali, 2018).

For its part, investments in this sector also show a tendency to rise. In 2015, it was invested about 285,000 million dollars to support the growth in electricity generation capacity from renewable energy sources. Mexico offers much potential for the generation of renewable energy; particularly solar energy, since the country occupies a privileged geographic location; within one of most intense solar radiation areas at the global level. While the global manufacturing network for photovoltaic energy is firmly established, opportunities for innovation in manufacturing prevail in (Rodríguez Suárez, 2017).

An application of the optoenergy instrumentation branch can be in an optical filter that reflects wavelengths higher than 1,000 nm. The application of this proposed filter achieves gains between 6.8% and 1.1% in energy generated by crystalline silicon modules, depending on the reflectance of the filter; as well as a method to design an optical filter that reflects wavelengths that heat the module without significant energy generation. Therefore, reducing the temperature of the module, increasing the total amount of energy generated (Heideier, 2018).

Another example of generation as a branch of optoenergy is the direct conversion of nuclear energy; it is a promising proposition in optical energy generation, including its perfect form of coherent light. A study of the optical emission of the gaseous medium, excited by the products of nuclear reactions; is of the interest to develop the method of the power output of the nuclear reactor, as well as to supervise the adjustment of its parameters. (Gordienko, 2017).

Conclusions

It is significant to continue and search for better options in the development of technologies for the generation of renewable energy through solar energy. Such as Optoelectronics, Optomechanics, Optoacustic, among others, we define ***Optoenergy***. In performing this, we must take into account the concept of optoenergy, which primarily involves three branches; energy conversion (includes photonics and fundamental optics); instrumentation (includes optical design) and monitoring (consider optical sensors for monitoring). As a result, this document describes the relationship and integration of several branches of optics; and the distinct branches of energy generation, trough the optoenergy concept. The field of optoenergy should be considered important as part of solar energy collection, and important related to other fields of energy production.

Acknowledgments

Authors grateful acknowledge to M. Hernández de la Merced and R. M. Rodríguez-Méndez, from Universidad Veracruzana, by they help in the preparation of this manuscript; and to I. A. Cerecedo-Padilla by the artistic figures.

References

Andenæs, E. e. (2018). The influence of snow and ice coverage on the energy generation from photovoltaic solar cells. Solar Energy(159), 318-328.

B.E.A., S., & M.C., T. (2017). Fundamentals of Photonics. Wiley Intersciences, USA (2017).

Barbosa García, O. C., & et-al. (2016). Towards a brighter Mexico: Optics and Photonics roadmap. México: ProMéxico.

Bengali, S. (2018, march 19). The biggest solar parks in the world are now being built in India. Los Angeles Times.

Boriskina, S. V. (2016). Roadmap on optical energy conversion. Journal of Optics(18), 1-48.

Chang, R., & Goldsby, K. A. (2016). Chemistry (12e ed.). Mc GRAW-HILL Education (2016).

Gordienko, Y. N. (2017). Study of processes of nuclear reaction energy conversion into energy of optical radiation. Materials Today: Proceedings, (pp. 4589-4598).

Heideier, R. B. (2018). Optical filter design applied to photovoltaic modules to maximize energy production. Solar Energy(159), 908-913.

IEEE. (2018, june 28). https://www.ieee.org/.

Kafafi, Z. H. (2015). The role of photonics in energy. Journal of Photonics for Energy(5), 1-44.

light, I. Y. (2018, june 28). Retrieved from http://www.light2015.org/Home.html

McDonald, P. N. (2007). IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. Advanced Optical Sensors for Power and Energy Systems Applications, 18-28.

OSA. (2018, june 28). https://www.osa.org/en-us/home/.

Prasad, P. (2003). Introduction to Biophotonics. Wiley Interscience.

REN21. (2018, june 28). Renewables 2017 Global Status Report. Paris (2017). Retrieved from http://www.ren21.net/gsr-2017/chapters/chapter_01/chapter_01/

Rodríguez Suárez, J. S. (2017). La industria solar fotovoltaica y fototérmica en México. ProMéxico.

Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2004). Physics for Scientists and Engineers. Thomson Brooks/Cole.
SPIE. (2018, june 28). Retrieved from https://spie.org/

SolarSchools. (2018, june 28). Retrieved from https://www.solarschools.net/knowledge-bank/energy/types

Capítulo 2 Implementación de un Sistema Láser para Microscopía Raman

Chapter 2 Laser System implementation for Raman Microscopy

FLORES-GIL, Aarón†*, BANDALA-GARCÉS, Magdalena, BENAVIDES, Olena y FLORES-TRUJILLO, Juan Gabriel

Universidad Autónoma del Carmen, Campus III, Facultad de Ingeniería, Avenida Central S/N, Esq. Con Fracc. Mundo Maya, C.P. 24115, Ciudad del Carmen, Camp., Mex.

ID 1er Autor: *Aarón, Flores-Gil* / **ORC ID:** 0000-0002-2302-2056, **CVU CONACYT ID:** 121166

ID 1er Coautor*: Magdalena, Bandala-Garcés* / **ORC ID:** 0000-0002-3102-3630

ID 2do Coautor: *Olena, Benavides* / **ORC ID:** 0000-0002-8124-0326**, CVU CONACYT ID:** 339830

ID 3er Coautor: *Juan Gabriel, Flores-Trujillo* / **ORC ID:** 0000-0002-6221-216X**, CVU CONACYT ID:** 36684

DOI: 10.35429/H.2021.16.8.18

*aflores@pampano.unacar.mx

S. Figueroa (AA.). Aplicaciones Láser en la Ingeniería. Handbooks-TI-©ECORFAN-Mexico, 2021.

Resumen

En este capítulo se presentan resultados de obtención de espectros Raman de una muestra sedimentaria, por medio de un diseño óptico de microscopía Raman. En este caso, se acopla la sonda de un equipo Raman, al campo de visión del objetivo de microscopio petrográfico, con el propósito de obtener imagen óptica y espectro Raman de manera simultánea. En este diseño se utiliza un láser de 785 nm y un objetivo de microscopio de amplio campo de visión, y como objeto de estudio se utilizó una muestra sedimentaria de la región de Tupilco del Estado de Tabasco. Este sistema micro-Raman nos permiten distinguir la forma del espectro de las componentes del sedimento, permitiendo hacer una clasificación de espectro debido a material orgánico, y de material inorgánico, que en su caso resultan de feldespato, cuarzo, arenisca, magnetita, material carbonatado, y asfaltenos.

Espectroscopía Raman, Microscopio Petrográfico, muestra sedimentaria.

Abstract

In this chapter are presented results of Raman spectra of one sedimentary sample, through an optical design micro-Raman like. The design consists of two instrumental coupled modules. That is, a Raman probe and a petrographic microscope, in order of get out simultaneously optical image and Raman spectrum. The optical system includes a 785 nm laser, and a microscope objective of high aperture vision. The sedimentary sample is from Tabasco State, Mexico. The experimental system allows to get out a distinction of the spectral characteristics of the inhomogeneous sedimentary components, but also allow to make a spectral classification of organic and inorganic detected components, that results of feldespate, quartz, sand, magnetite, carbonaceous material, and asphaltene.

Raman Spectroscopy, Petrographic microscope, sedimentary sample.

Introducción

La espectroscopía Raman es una técnica fotónica de alta resolución que proporciona información química y estructural de casi cualquier material. Hoy en día la Tecnología por espectroscopía Raman se aplica para una diversidad de situaciones de la ciencia, la ingeniería y el área médica. Esta Tecnología requiere de radiación láser incidiendo sobre la superficie de muestras en cualquier estado de la materia; solida, liquida o gaseosa. Pueden ser orgánica e inorgánica; o bien, una combinación de ellas. La radiación láser induce rotaciones y/o vibraciones de los estados moleculares, por medio del efecto de dispersión inelástica. Estas rotaciones y vibraciones dan lugar a una energía extra denominada emisión Raman que, si bien resulta ser hasta un millón de veces menor a la energía del láser, pueden registrarse bandas espectrales denominadas bandas Raman.

La espectroscopía Raman es un método no destructivo que, inclusive no requiere de preparación previa de las muestras, ni tampoco se requiere de la inclusión de reactivos extras para el registro de las bandas Raman, que puede proveer información sobre especies químicas, y simetría molecular. Sus aplicaciones son diversas, como: la identificación de piedras preciosas, de drogas ilicitas, de explosivos, de minerales carbonatados (N.K. Lünsdorf, J.O. Lünsdorf, 2016). Incluso, se aplica como método para la identificación de diferentes tipos de cáncer (D'Acunto, M., Gaeta, R., Capanna, R. et al. 2020).

Para muestras con una composición heterogéneas; como es el caso de los sedimentos, la espectroscopía Raman puede ser útil para caracterizar la composición molecular de los granos, minerales, y areniscas presentes en este tipo de muestras. En el presente trabajo, se muestra el arreglo experimental para obtener imagen óptica por medio de un microscopio petrográfico de una muestra sedimentaria, y simultáneamente el registro de espectros Raman de algunos componentes del sedimento, y se presenta la clasificación de las componentes de una muestra sedimentaria de la playa Tupilco del Estado de Tabasco, México. Se encontró una diversidad de estructuras espectrales, de tal forma que se pudo reconocer espectros Raman característicos de materiales orgánicos e inorgánicos.

Los sedimentos se consideran como protagonistas importantes en ciclos biogeoquímicos del planeta, colaboran en filtrar, colectar, almacenar y conservar elementos minerales y orgánicos de gran relevancia para la vida. En la planeación del manejo de los recursos naturales es de importancia considerar los problemas globales y tener en cuenta las actividades a nivel parcela (Bautista, 2005; 2021).

El estudio de su composición y de la estructura del perfil del suelo son de gran relevancia en conocer los procesos y ciclos biogeoquímicos involucrados, además, de apoyar a conocer la clasificación en su contexto de uso sustentable (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007).

Diseño del sistema láser de microscopia Raman

En la Facultad de Ingeniería de la Unacar, se cuenta con un equipo de espectroscopía Raman QE65000, equipo que se utiliza para investigación en el laboratorio de óptica y visión. Incluye un láser en el infrarrojo cercano, a 785 nm de potencia variable, y con un espectrógrafo con una ventana espectral efectiva de 0 a 2000 cm^{-1}, y resolución espectral de 4 cm^{-1}.

En la Figura 1. Se muestra una fotografía del equipo QE 65000 de la marca Ocean Optics, cuyas componentes se pueden apreciar. El módulo láser a 785 nm, la sonda RPB 785 de fibras ópticas, el porta muestras, y el espectrógrafo QE 65000.

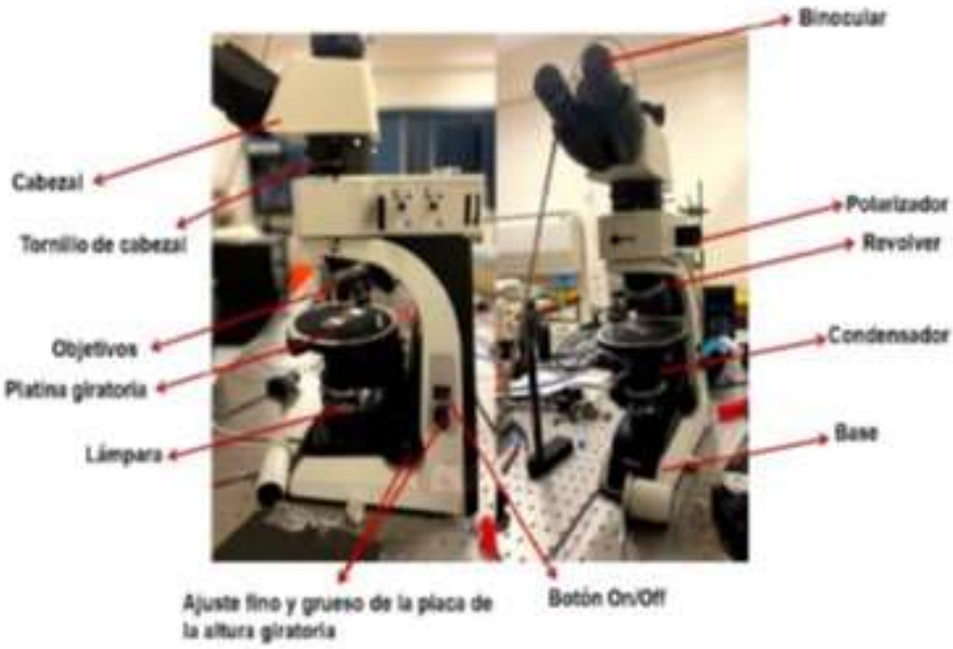
Figura 1 Equipo de espectroscopía Raman QE 65000

Fuente. Elaboración Propia

La sonda RPB 785 es un arreglo óptico de espejos, desdoblador de haz, y filtro rechaza banda que, permite actuar de forma simultánea como fuente de excitación láser, y además de receptor por reflexión de radiación Raman y Raleigh. Contiene en su externo una punta con una lente con una distancia focal de 7 mm, y según las especificaciones técnicas, la distancia entre la punta y la muestra debe estar en una distancia nominal entre 7 y 10 mm.

En la misma Facultad de Ingeniería, se cuenta con un equipo de microscopio petrográfico trinocular BS-5070TTR, de la marca Best Scope. Equipo que se utiliza para investigación y docencia de la carrera de Geofísica. Este equipo es especial para visualizar muestras sedimentarias, para hacer una clasificación de los granos y minerales, en base a su color y tamaño, pero todo conforme a la imagen óptica del microscopio. En la Figura 2. Se muestra una fotografía del microscopio petrográfico, en la indican cada una de las componentes, destacando la platina circular, el revolver con sus correspondientes lentes objetivos infinitos, unos binoculares, y un ocular independiente, polarizadores, etc.

Figura 2 Equipo de microscopía petrográfica BS-5070TTR



Fuente. Elaboración Propia

Por lo que se planteó la hipótesis de que si al conjugar ambos equipos, a través de un arreglo o sistema óptico, se pudiera obtener de manera simultánea tanto imagen óptica, como espectro Raman, resaltando el reto importante de la distancia nominal de la sonda-muestra que debe estar entre 7 y 10 mm. Por tanto, se plantearon diversos diseños con el objetivo de acoplar los equipos y obtener espectros de buena calidad en su relación señal a ruido.

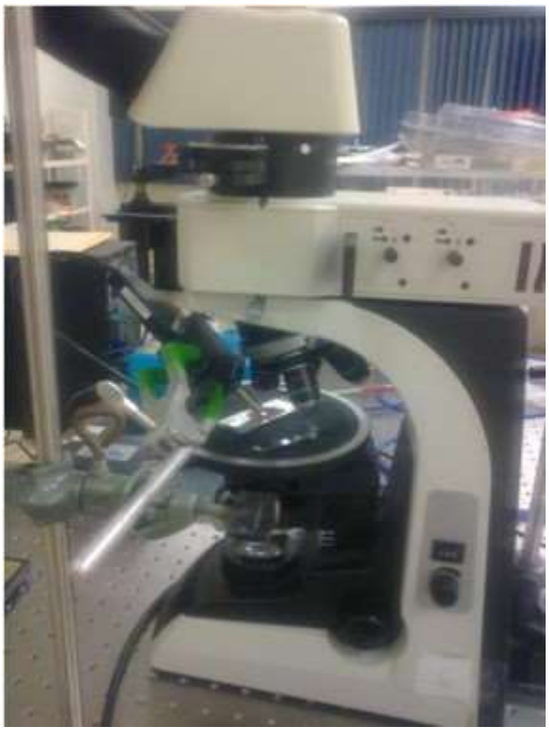
Vale la pena comentar que existen equipos en el mercado denominados micro-Raman, con los cuales se proyectan en una pantalla de computadora, la imagen óptica de la muestra a analizar, para luego a través de un sistema de control seleccionar la ubicación del “punto” del láser para obtener el espectro Raman de algún granulo en particular. Pero estos equipos suelen ser costosos, por su manufactura y mantenimiento especial.

En consecuencia, al lograr el acoplamiento entre los equipos que se tienen en la Facultad de Ingeniería, también representa un ahorro en compra de equipo, de mantenimiento y, sobre todo, se pueden plantear proyectos alternativos con diferente tipo de muestras. Además de que, permita acoplar/desacoplar los equipos, de manera ágil para situaciones en las que no sea indispensable el equipo micro-Raman.

De los diseños que se realizaron para acoplar ambos equipos, para lograr el objetivo a alcanzar, el que mejor resultados proporcionó es como sigue:

En la Figura 3, se muestra el diseño óptico que, muestra el acoplamiento de la sonda RPB-785, en un ángulo oblicuo de 35 grados con respecto al eje del microscopio petrográfico BS-5070TTR. La facilidad de este diseño reside en la flexibilidad de las fibras ópticas del equipo Raman. Además, para evitar ver directamente con el ojo, se adaptó una cámara web a la salida de una lente ocular. La cámara web, permite visualizar la región de interés, y la imagen puntual del láser.

Figura 3 Fotografía del diseño experimental del acoplamiento del equipo Raman QE6500, y el microscopio petrográfico trinocular BS-5070TTR



Fuente. Elaboración Propia

En la Figura 4, se muestra una fotografía tomada con la cámara web adaptada en uno de los oculares del microscopio, en el cual se puede apreciar la imagen puntual del láser incidiendo sobre el sedimento que se encuentra en el porta-muestras de microscopio. La punta de la sonda RPB se encuentra ubicado a la distancia nominal, a un ángulo de 35 grados con respecto al eje del tubo del objetivo de microscopio. Se utilizó el objetivo de microscopio rojo, plan plano 4/0.1, con el propósito de visualizar un campo amplio de la muestra sedimentaria.

Figura 4 Fotografía tomada por la cámara web colocada en uno de los oculares, en la cual se puede apreciar la imagen puntual del láser (en rojo), incidiendo en una sección del sedimento muestra

Fuente. Elaboración Propia

Con este objetivo de microscopio se logra un aumento de 40, y con una cámara web con zoom óptico de 10X, se obtiene un aumento de 400. Por supuesto que el aumento de la muestra será más alto dependiendo del zoom óptico de la cámara web. En la Figura 4, se puede apreciar que la imagen de puntal del láser incide sobre al menos 7 gránulos de diferente morfología y color, mientras que en el fondo se pueden también gránulos amorfos, de diferente color y tamaño.

Escaneo en dirección longitudinal del portamuestras

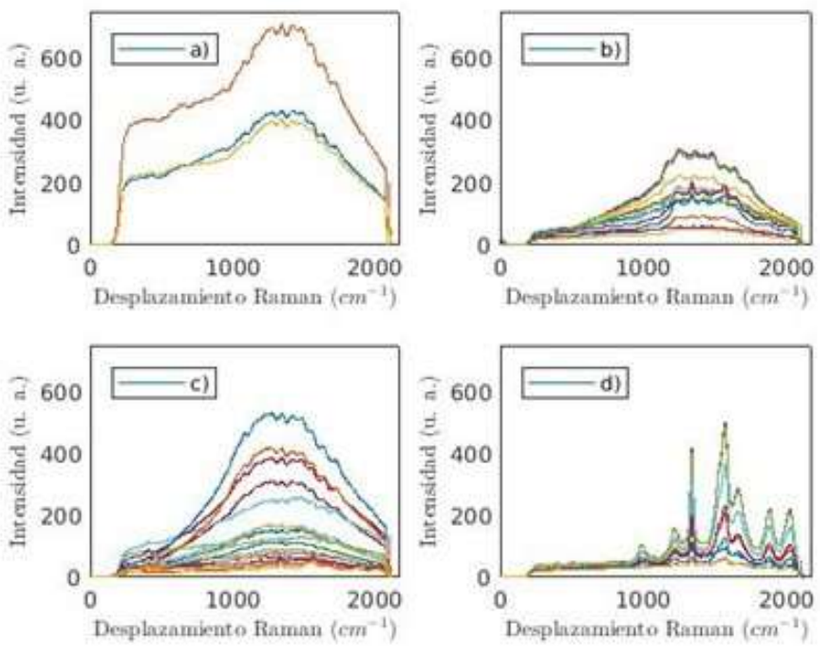
Una vez logrado el objetivo de la captura de la imagen óptica, tanto de las componentes sedimentarias, como del punto del láser. El microscopio petrográfico tiene una platina giratoria que, finalmente al realizar el giro prácticamente se tendrá la misma imagen a cualquier ángulo de giro.

El interés es obtener el espectro de la mayor cantidad de gránulos que se encuentran en la muestra sedimentaria, por lo que, el objetivo del presente trabajo es hacer un recorrido a lo largo de una dirección preferencial; en particular, en dirección longitudinal del porta muestras de microscopio. Por lo que se tuvo que realizar una adaptación de una platina cuadrada XY, en lugar de la platina giratoria en el microscopio petrográfico.

A lo largo de un recorrido de 22, se obtuvieron un total de 44 espectros, con pasos de 0.5 mm. En la Figura 5, se pueden apreciar la diversidad de espectros con diferentes características de intensidad y estructura espectral, indicativo de espectros dominados por fluorescencia, y espectros que son característicos de material orgánico.

Durante el proceso de adquisición de datos, se hicieron tomas de 5 secuencias de espectros de 5 segundos de tiempo de exposición, y de los 44 espectros que se presentan en este capítulo, corresponden al promedio de las 5 secuencias. La potencia seleccionada fue de 30 mW.

Figura 5 Tipo de espectros detectados durante el recorrido de la sonda láser en la dirección longitudinal del portamuestras. En los paneles a) y c) se tienen espectros con contribución de fluorescencia, característicos de material orgánico. En el panel b) con moderada contribución de fluorescencia, pero con bandas Raman definidas. En el panel c) se tienen espectros con baja contribución de fluorescencia, y bandas Raman bien definidas



Fuente. Elaboración Propia

Resultados

Clasificación de espectros Raman registrados en la muestra sedimentaria

Se pudieron detectar al menos tres tipos de espectros Raman. Los cuales, se clasificaron en las siguientes categorías: 1. Espectros can alta intensidad por arriba de las 500 unidades, con respecto a su base, pero con bandas Raman poco pronunciadas o de baja intensidad, 2. Espectros con moderada intensidad de 100 a 350 unidades con respecto a su base, y bandas Raman de moderada intensidad, y 3. Espectros con baja intensidad con respecto a su base, menor a 50 unidades con respecto a su base, pero con bandas Raman pronunciadas, con intensidad y anchura bastante apreciables a la vista.

En la Figura 5, se muestran secuencias de espectros que ejemplifican que en los paneles a) y c) se tienen espectros que corresponden a la categoría 1, los espectros b) corresponden a la categoría 2, mientras que los espectros d) corresponden a la categoría 3.

Por otro lado, los espectros de la categoría 1, con alta intensidad con respecto a su base, se generan típicamente por alto contenido de material fluorescente, característico de material orgánico. Se considera que puedan corresponder a material carbonatado. Los espectros de material orgánico se caracterizan por una contribución importante de la fluorescencia, su base (denominada baseline), alcanza niveles muy altos de intensidad que, en ocasiones enmascaran la emisión Raman, y dificulta la localización de las bandas Raman, o bien estas bandas son de baja intensidad (Xiaoqin Zhu et al. 2014), (Delanano et al. 2019).

Bandas Raman registradas en sedimento de Tupilco, Tabasco.

En la presente sección se describe las bandas Raman principales detectadas en la muestra sedimentaria. Se puede consultar base de datos para la identificación de las bandas Raman de minerales, como la Search RRUFT, y de (Bouchard, M., & Smith, D. C. 2003), y de (Bowden et al., 2010), fueron de utilidad para asociarlas con las bandas Raman registradas en nuestros espectros.

Las bandas Raman de 1085 cm^{-1}; 1274 cm^{-1}; 1345 cm^{-1}, corresponden a las areniscas Rull. F, (2006).

Las bandas Raman de 1215 cm^{-1}; 1333 cm^{-1}; 1562 cm^{-1}, corresponden al material carbonatado Hope et al., (2002), (Lünsdorf, N.K. Lünsdorf J.O, 2016), Dufresne, W. J. B., Rufledt, C. J., & Marshall, C. P. (2018).

Las bandas Raman de 1354 cm^{-1}; 1426 cm^{-1}; 1551 cm^{-1}, corresponden al Oxido de Hierro, o bien a la Magnetita (Galeas et al., 2017).

Las bandas Raman de 464 cm^{-1}; 795 cm^{-1}; 807 cm^{-1}, corresponden al cuarzo (Ostrooumov et al., 2002).

Las bandas Raman de 1332 cm^{-1}; 1570 cm^{-1}; 1657 cm^{-1}; y 1872 cm^{-1}, corresponden a los asfaltenos, que resultan ser derivados de hidrocarburos (Andrews et al., 2015, Theo Kloprogge, J. 2017).

En la Tabla 1, se listan estas bandas Raman detectadas. En la columna 1, muestra secuencialmente el número de muestra; la columna 2, el mineral correspondiente, la columna 3, la banda Raman centradas en la frecuencia correspondiente, y en la columna 4 el tipo de material ya sea del tipo orgánico, o bien inorgánico.

Es de destacar que las bandas correspondientes al asfáltenos, en principio se pudieran confundir con microplásticos debido a la contaminación de las playas, ya que en principio ambos tienen enlaces de Carbono-Hidrogeno (Dahl et al. 2019), pero difieren en sus señales o bandas características, sobre todo en regiones entre 1600 cm^{-1} y 2000 cm^{-1} (Andrews et al. 2015). Sin embargo, se requiere de un estudio con mayor profundidad sobre el tema.

Tabla 1 Bandas Raman registradas de los gránulos encontrados en la muestra sedimentaria de Tupilco Tabasco

No.	Mineral o Compuesto	Bandas Raman centrada en: (cm^{-1})	Tipo de Material
1	Arcillas	1333.46; 1562.03; 1873.75	Inorgánico
2	Arenisca (Feldespato)	1085.15; 1274.55; 1345.22	Inorgánico
3	Carbonato	1215.18; 1333.46; 1562.03	Inorgánico
4	Óxido de Hierro (Magnetita)	1354.92; 1426.09; 1551.08	Inorgánico
5	Apatita Carbonatada	1228.05; 1335.42; 1412.75	Orgánico
6	Cuarzo	464; 795; 807	Inorgánico
7	Asfalteno	1332; 1570; 1657; 1872	Orgánico

Fuente. Elaboración Propia

Imagen Raman

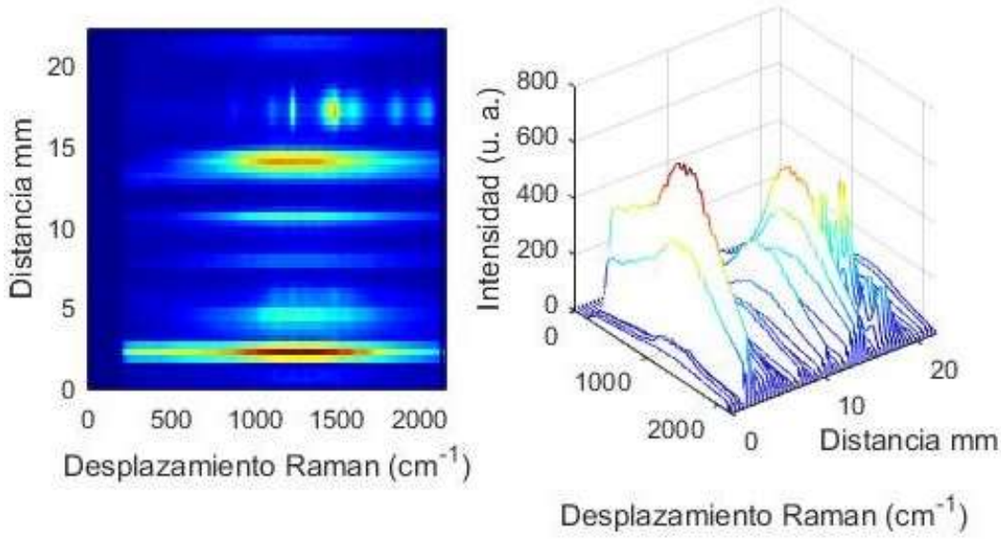
El avance tecnológico de la última década ha permitido el desarrollo de cámaras de Dispositivos de Carga Acoplada (CCD, por sus siglas en inglés), que permiten la obtención de espectros Raman en escalas de tiempo del orden de segundo, y para algunos casos de milisegundos, esto a su vez permite el desarrollo de nuevas aplicaciones, en particular el de mapeo Raman con tiempos de integración relativamente cortos. Esta técnica consiste en el escaneo de una muestra con el láser, y de manera simultánea se adquiere el espectro por lo que se tendrá información espacial de la muestra, además de la información estructural de la misma.

El diseño de microscopio Raman que se presenta en este capítulo, permite también la construcción de imágenes Raman 2D. Aunque vale la pena comentar que para la construcción de estas imágenes se requiere de un sistema de control automatizado, de la platina XY, de tal forma que el láser se requiere una plataforma móvil para que la sonda RBP realice escaneos en un plano XY, y la muestra se mantenga fija. O bien, caso contrario la sonda Raman se mantiene fija, mientras que la muestra se coloca en una platina móvil, con un sistema motorizado que permita desplazamientos de la platina en el plano XY. (Foucher, et al., 2015), describe detalladamente los procedimientos y equipos comerciales especializados en construcción de imágenes 2D, y 3D para la generación de imágenes volumétricas.

En nuestro caso, como ya se mencionó en la sección anterior, el láser se mantiene fijo, y el escaneo de la muestra sedimentaria se realiza a través del desplazamiento de la platina a lo largo de una dirección, con pasos de 0.5 mm, y con una longitud de 20 cm, y el procedimiento fue manual, pero se muestra como antecedente que el diseño que se presenta en este capítulo sirve de base para la generación de imágenes 2D. En la Figura 6, en el panel izquierdo se tiene la imagen 2D que se genera por el escaneo de la muestra a lo largo de los 22 mm.

Claramente se pueden apreciar la diferencia entre grupos de espectros (tal y como se discutió en la sección anterior. Pero también se puede apreciar el paso del láser a través de una sección de granulo o mineral. Por ejemplo, del intervalo de 18 a 22 mm, el láser paso por una sección del asfalteno. En la Figura 6, en el panel derecho se tiene un grafico 3D que muestra la diferencia de intensidad de los espectros descritos del panel izquierdo.

Figura 6 Panel izquierdo, imagen Raman 2D generado por el paso del láser por la muestra sedimentaria a lo largo de un intervalo de 22 mm. En el panel derecho, se tiene una grafica 3D de los 22 espectros registrados, en donde se puede apreciar la diferencia en intensidad de los espectros.



Fuente. Elaboración Propia

Conclusiones

La implementación de un equipo micro-Raman construido por el acoplamiento de equipo Raman, y microscopio Petrográfico, permite visualizar imagen óptica, de una muestra sedimentaria compuesta por diversidad de componentes de distintos tamaños, textura y color. De igual forma, permite visualizar la imagen puntual de incidencia láser. Por tanto, se puede realizar un barrido espacial, seleccionando las componentes granulares que aparecen en la imagen. Además, permite obtener simultáneamente espectro Raman de dichas componentes, permitiendo caracterizar las bandas Raman según su composición molecular.

El sistema de microscopía Raman permitió identificar de igual forma, la heterogeneidad de las bandas Raman, con la contribución de fluorescencia de parte de algunas componentes, característico de material orgánico, y de baja contribución de fluorescencia y bandas Raman intensas, característico de material inorgánico.

Con este sistema de microscopía Raman se logró el objetivo de obtener imagen óptica y espectro Raman de forma simultánea. Sin embargo, este diseño óptico, puede servir como base para plantear proyectos para la construcción de las denominadas imágenes volumétricas Raman (Kallepitis, C. et al. 2017), realizando escaneos a lo largo de una columna, o bien toda el área que cubra el material sedimentario.

La imagen Raman construida por el escaneo a lo largo de una columna del sedimento, permite definir la separación entre los gránulos, pero además de definir las dimensiones de la sección del granulo por donde pasa el punto del láser. Por lo cual se pudiera utilizar como una alternativa para definir el tamaño de los gránulos.

Se determinó que la región de la playa Tupilco del Estado de Tabasco, está compuesta por cuarzo, arenisca, arcilla, magnetita, material carbonatado, y asfáltenos.

En este capítulo se presentó un primer diseño de acoplamiento del microscopio Petrográfico al equipo de espectroscopia Raman, logrando la caracterización de las componentes pétreas de una muestra sedimentaria, pero se está trabajando en otro diseño alterno con los mismos equipos, para realizar proyectos utilizando ahora los polarizadores del microscopio petrográfico.

Agradecimientos

Agradecemos a la UNACAR por el apoyo brindado para la realización de este trabajo, a través del proyecto 069/DGIP/2019. Los autores declaramos que no hay conflicto de interés acerca de la publicación de este artículo.

Referencias

Andrews, A. B., Wang, D., Marzec, K. M., Mullins, O. C., & Crozier, K. B. (2015). Surface enhanced Raman spectroscopy of polycyclic aromatic hydrocarbons and molecular asphaltenes. Chemical Physics Letters, 620, 139–143.

Bautista, F. 2021. Los territorios kársticos de la península de Yucatán: caracterización, manejo y riesgos. Asociación Mexicana de Estudios sobre el Karst. Ciudad de México. 196 pp.

Bautista, F., 2005. Información edafológica para el manejo de recursos naturales, p. 1- 8. En: F. Bautista y G. Palacio (Eds.) Caracterización y Manejo de los Suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones Agropecuarias, Foresta les y Ambienta les. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán. 282 p.

Bouchard, M., & Smith, D. C. (2003). Catalogue of 45 reference Raman spectra of minerals concerning research in art history or archaeology, especially on corroded metals and coloured glass. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 59(10), 2247–2266.

Bowden, S. A., Wilson, R., Cooper, J. M., & Parnell, J. (2010). The Use of Surface-Enhanced Raman Scattering for Detecting Molecular Evidence of Life in Rocks, Sediments, and Sedimentary Deposits. Astrobiology, 10(6), 629–641.

D'Acunto, M., Gaeta, R., Capanna, R. et al. Contribution of Raman Spectroscopy to Diagnosis and Grading of Chondrogenic Tumors. Sci Rep 10, 2155 (2020). https://doi.org/10.1038/s41598-020-58848-0

Dahl, E. M. H., Stien, A. O. R., Sorensen, A. J., & Davies, E. J. (2019). Identification of Marine Plastics using Raman Spectroscopy. OCEANS 2019 MTS/IEEE SEATTLE. doi:10.23919/oceans40490.2019.8962613

Delano G. Henry, Ian Jarvis, Gavin Gillmore, Michael Stephenson, Raman spectroscopy as a tool to determine the thermal maturity of organic matter: Application to sedimentary, metamorphic and structural geology, Earth-Science Reviews, Volume 198, 2019,

Dufresne, W. J. B., Rufledt, C. J., & Marshall, C. P. (2018). Raman spectroscopy of the eight natural carbonate minerals of calcite structure. Journal of Raman Spectroscopy.

Foucher. Frédéric, Guimbretière. Guillaume, Bost. Nicolas, and Westall Frances (2017). Petrographical and Mineralogical Applications of Raman Mapping, Raman Spectroscopy and Applications, Khan Maaz, IntechOpen, DOI: 10.5772/65112.

Hope, G. A., Woods, R., & Munce, C. G. (2001). Raman microprobe mineral identification. Minerals Engineering, 14(12), 1565–1577.

Kallepitis, C. et al. Quantitative volumetric Raman imaging of three-dimensional cell cultures. Nat. Commun. 8, 14843 doi: 10.1038/ncomms14843 (2017).

IUSS Grupo de Trabajo WRB. 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.

Lünsdorf, N.K. Lünsdorf J.O, Evaluating Raman spectra of carbonaceous matter by automated, iterative curve-fitting, International Journal of Coal Geology, Volumes 160–161, 2016,

Ostroumov, M., Faulques, E., & Lounejeva, E. (2002). Raman spectroscopy of natural silica in Chicxulub impactite, Mexico. Comptes Rendus Geoscience, 334(1), 21–26. doi:10.1016/s1631-0713(02)01700-5.

Rull F., Venegas Del Valle G., Martinez Frias J., Medina García J., Sanz Arranz A. (2006). Caracterización Mineralógica de la Alteración Supergénetica de El Jaroso Mediante Espectroscopía Raman, Valladolid, España, 223-225.

Search RRUFF Sample Data: https://rruff.info/

Theo Kloprogge, J. (2017). Infrared and Raman Spectroscopy of Minerals and Inorganic Materials. Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry, 267–281.

Xiaoqin Zhu, Tao Xu, Qingyu Lin & Yixiang Duan (2014) Technical Development of Raman Spectroscopy: From Instrumental to Advanced Combined Technologies, Applied Spectroscopy Reviews, 49:1, 64-82

Capítulo 3 Espectroscopia Raman de Nanopartículas de Ferritas de Cobalto

Chapter 3 Cobalt Ferrite Nanoparticles Raman Spectroscopy

MARTÍNEZ-VARGAS, Sergio†*, PATIÑO-CARACHURE, Cristóbal y FLORES-GIL, Aarón

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Carmen, Campus III, Avenida Central S/N, Esq. con Fracc. Mundo Maya, C.P. 24115, Ciudad del Carmen, Campeche, México.

ID 1er Autor: *Sergio, Martínez-Vargas* / **ORC ID:** 0000-0003-4605-0557, **CVU CONACYT ID**: 100782

ID 1er Coautor: *Cristóbal, Patiño-Carachure* / **ORC ID:** 000-0002-1436-1259, **CVU CONACYT ID**: 226327

ID 2do Coautor: *Aaron, Flores-Gil* / **ORC ID:** 0000-0002-2302-2056, **CVU CONACYT ID**: 121166

DOI: 10.35429/H.2021.16.19.26

*smartinez@pampano.unacar.mx

S. Figueroa (AA.). Aplicaciones Láser en la Ingeniería. Handbooks-TI-©ECORFAN-Mexico, 2021.

Resumen

En el presente trabajo se realiza una revisión de los estudios más relevantes sobre el análisis espectroscópico Raman de nanopartículas de ferritas de cobalto, en específico, $CoFe_2O_4$. Los estudios reportados en la literatura científica revelan la importancia de su estructura y de sus propiedades magnéticas. Durante las últimas décadas se ha estudiado intensamente su caracterización por espectroscopia Raman para conocer más acerca de sus propiedades, debido a la extensa variedad de sus aplicaciones posibles (en la remoción de contaminantes, en agentes de contraste para resonancia magnética, en sistemas de administración de fármacos, en dispositivos magneto-ópticos, en magnetohipertermia, en espintrónica, entre otras). Se ha encontrado que la variación de su tamaño nano-metrico, así como su dispersión de tamaño, su morfología, su grado de cristalinidad y su integración en la formación de derivados híbridos es capaz de influir sensiblemente en sus propiedades físicas y químicas. Todas estas variaciones son logradas utilizando diferentes métodos de síntesis. Se ha visto que los estudios espectroscopicos Raman forman una parte fundamental e imprescindible en la caracterización estructural de estás nano-ferritas; los cuales siguen siendo de gran interés para los científicos, que continúan realizando estos análisis, ya que siguen encontrando nuevas señales en esta región espectral Raman, que revelan la simetría de los modos vibracionales que no se habían reportado en el pasado.

Espectroscopía Raman, Nanopartículas de $CoFe_2O_4$, Estructura Cristalina, Simetría de los Modos Vibracionales

Abstract

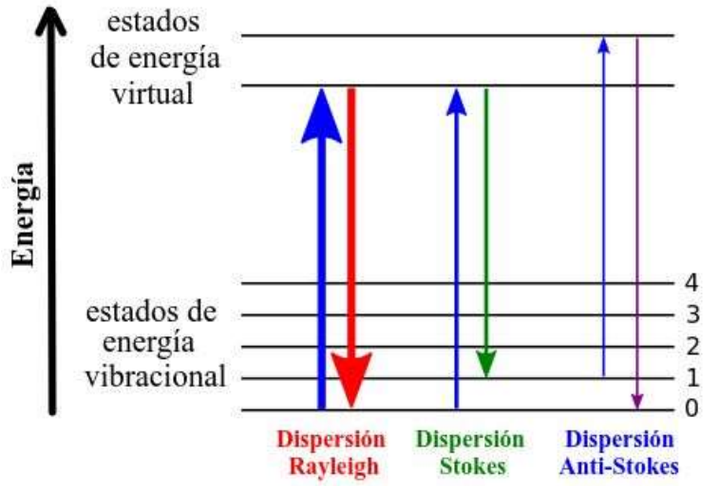
In the present work, a review of the most relevant studies on the Raman spectroscopic analysis of cobalt ferrite nanoparticles, specifically, $CoFe_2O_4$, is carried out. The studies reported in the scientific literature reveal the importance of its structure and its magnetic properties. During the last decades its characterization by Raman spectroscopy has been intensively studied to learn more about its properties, due to the wide variety of possible applications (in the removal of contaminants, in contrast agents for magnetic resonance, in administration systems of drugs, in magneto-optical devices, in magnetohyperthermia, in spintronics, among others). It has been found that the variation of its nano-metric size, as well as its size dispersion, its morphology, its degree of crystallinity and its integration in the formation of hybrid derivatives is capable of significantly influencing its physical and chemical properties. All these variations are achieved using different synthesis methods. It has been seen that Raman spectroscopic studies form a fundamental and essential part in the structural characterization of these nano-ferrites; which continue to be of great interest to scientists, who continue to carry out these analyzes, as they continue to find new signals in this Raman spectral region, which reveal the symmetry of the vibrational modes that had not been reported in the past.

Raman spectroscopy, $CoFe_2O_4$ Nanoparticles, Crystal structure, Symmetry of Vibrational Modes.

1. Introducción

La espectroscopía Raman es una técnica de análisis químico no destructivo que se basa en un proceso de dispersión de la luz provocado al interaccionar con los enlaces químicos dentro de un material. Es usada para detectar estados vibratorios, rotacionales y de otro tipo en un sistema molecular, que proporciona información detallada sobre la estructura química, fase y polimorfia, cristalinidad e interacciones moleculares, capaz de sondear la composición química de los materiales. Existen tres tipos de dispersión Raman (Fig. 1), el primero es el de Rayleigh, un proceso de dispersión elástica en el que un fotón rebota en una molécula y emerge con la misma energía con la que entró, el cual se conoce como. Aproximadamente, de un millón de fotones Rayleigh dispersos por una molécula, solo un fotón se dispersa en la región del espectro Raman. El segundo tipo es la dispersión de Stokes, dispersión inelástica de los fotones incidentes que promueven al sistema desde un estado energético basal a un "estado virtual" y transfieren algo de energía finita al sistema, a medida que el sistema desciende a un estado vibratorio de mayor energía que la del estado fundamental. El tercer tipo es la dispersión anti-Stokes, el sistema pierde energía al salir de un estado vibratorio excitado antes de regresar a un estado vibratorio de menor energía que el estado fundamental (Testa-Anta, M., Ramos-Docampo, M. A., Comesaña-Hermo, M., Rivas-Murias, B., & Salgueiriño, V., 2019).

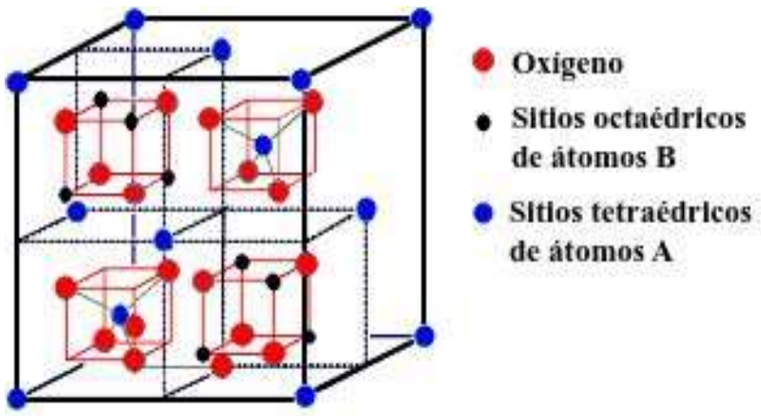
Figura 1 Diagrama de los niveles de energía de los estados involucrados en los espectros Raman



La espectroscopia Raman es una técnica utilizada ampliamente para la identificación de materiales y su aplicación a las ferritas con estructuras de espinelas es extremadamente prometedora. Puede permitir distinguir la especie de espinela de los patrones espectrales característicos ("huella dactilar"), sin ninguna información preliminar sobre la composición y el origen estructural de las características individuales. Por tales razones, la espectroscopia Raman se ha utilizado para la investigación de especies de espinela en ciencia de materiales, patrimonio cultural, mineralogía, geología y gemología y juega un papel importante también en astromineralogía para la caracterización de materiales mineralógicos y orgánicos durante la futura exploración de Marte (D'Ippolito, V., Andreozzi, G. B., Bersani, D., & Lottici, P. P., 2015).

La estructura cubica de la espinela normal posee iones divalentes A^{2+} posicionados en 8 sitios tetraédricos y iones trivalentes B^{3+} posicionados en 16 sitios octaédricos. En tanto que la espinela inversa posee 8 iones A^{2+} en sitios octédricos y los iones B^{3+} en 8 sitios tetraédricos y 8 sitios octaédricos (Fig. 2).

Figura 2 Estructura cristalina de la espinela AB_2O_4



Las ferritas poseen una estructura cristalina tipo espinela de óxido compleja con un núcleo cúbico centrado en las caras y una fórmula unitaria de MFe_2O_4. Esta se puede formar a partir de la combinación de un catión trivalente (Fe^{3+}) y otro catión metálico divalente, como un catión metálico de transición o de transición inerna (M = Mn, Mg, Co, Ni, Zn). Con diferencias tanto en la naturaleza química como en el estado de oxidación, así como en la energía de estabilización, estos cationes pueden organizarse de acuerdo a dos sitios cristalográficos diferentes (sitios tetraédricos y sitios octaédricos) situados entre los cationes y los iones de oxígeno circundantes. Más específicamente, una unidad de MFe_2O_4 consta de 32 átomos de oxígeno estrechamente empaquetados con 64 sitios tetraédricos divalentes y 32 sitios octaédricos trivalentes; en particular, para mantener un estado electronicamente equilibrado entre los aniones de la estructura, M^{2+} y Fe^{3+} suelen ocupar 8 sitios tetraédricos y 16 octaédricos, respectivamente.

Además, según las posiciones de estos cationes, se puede clasificar una estructura de ferrita en 3 grupos: normal, inversa y mixta. De hecho, la ocupación del sitio depende principalmente de la contribución electrostática a la energía de la red cristalina, los radios catiónicos, las cargas catiónicas y los efectos del campo cristalino. En una estructura típica de ferrita, los cationes M^{2+} se encuentran en sitios tetraédricos, mientras que los cationes Fe^{3+} se encuentran en sitios octaédricos, por ejemplo en $ZnFe_2O4$, que es similar a algunas otras estructuras cristalinas de espinela como $CoAl_2O_4$, $MgAl_2O_4$ y Mn_3O_4. Para la estructura de espinela inversa, los cationes Fe^{3+} se distribuyen equitativamente entre los sitios tetraédricos y octaédricos, mientras que los cationes M^{2+} solo ocupan sitios octaédricos, por ejemplo en $NiFe_2O_4$, $CoFe_2O_4$, Fe_3O_4, entre otras. En una estructura de espinela mixta, los cationes M^{2+} y Fe^{3+} ocupan aleatoriamente ambos sitios, como en $MgFe_2O_4$ y $MnFe_2O_4$ (Pham, T. N., Huy, T. Q., & Le, A. T., 2020).

La estructura de la espinela pertenece al grupo espacial cúbico Fd3m (nº 227), el cual se encuentra representada por una simetría O_h^7, que se compone de un conjunto de diferentes especies y operaciones de simetría que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 Caracteres del grupo de puntos O_h a diferentes especies de simetría y operaciones de simetría para la estructura de espinela (Atkins, P. W., Child, M. S., & Phillips, C. S. G., 1970)

O_h ($m3m$)	E	$8C_3$	$6C_2$	$6C_4$	$3C_2$	i	$6S_4$	$8S_6$	$3\sigma_h$	$6\sigma_d$	(h = 48)
A_{1g}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	$x^2 + y^2 + z^2$
A_{2g}	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1	
E_g	2	-1	0	0	2	2	0	-1	2	0	$2z^2 - x^2 - y^2$, $x^2 - y^2$
T_{1g}	3	0	-1	1	-1	3	1	0	-1	-1	R_x, R_y, R_z
T_{2g}	3	0	1	-1	-1	3	-1	0	-1	1	xy, xz, yz
A_{1u}	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	
A_{2u}	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	
E_u	2	-1	0	0	2	-2	0	1	-2	0	
T_{1u}	3	0	-1	1	-1	-3	-1	0	1	1	x, y, z
T_{2u}	3	0	1	-1	-1	-3	1	0	1	-1	

Fuente. Elaboración Propia

La ferrita de cobalto ($CoFe_2O_4$) tiene propiedades físicas y mecánicas especiales que conducen a amplias aplicaciones como por ejemplo, en nanomedicina. Es un material magnético duro con una temperatura de Curie alta T_C (520 ° C), la alta coercitividad de aproximadamente 4.3 kOe a temperatura ambiente para el dominio único de tamaño de 40 nm, la magnetización de saturación moderada de aproximadamente 80 emu / g a temperatura ambiente, alta constante de anisotropía ($2.65 \times 10^6 – 5.1 \times 10^6$ ergio cm^{-3}) y alta magnetoestrictiva (-225×10^{-6}). Además, muestra una excelente estabilidad química, dureza mecánica, resistencia al desgaste, facilidad de síntesis y aislamiento eléctrico. Las propiedades mencionadas anteriormente hacen que el cobalto ferrita uno de los candidatos más prometedores para aplicaciones médicas, incluida la administración magnética de fármacos, hipertermia por radiofrecuencia, imágenes por resonancia magnética (IRM) y diagnósticos médicos (Amiri, S., & Shokrollahi, H., 2013).

El $CoFe_2O_4$ pertenece a una familia de ferritas de tipo espinela AB_2O_4 donde A representa al metal divalente (Co), los sitios A están ocupados por iones Fe^{3+} y los sitios B están ocupados por iones Co^{2+} y Fe^{3+}. Esta estructura de espinela se denomina tipo inverso, representada como (Co_xFe_{1-x}) $[Co_{1-x}Fe_{1+x}]$ O_4, donde x depende del tratamiento térmico y las condiciones de preparación. Dado que la interacción de super-intercambio $Fe_A^{3+} – Fe_B^{3+}$ es normalmente diferente de la interacción $Co_A^{2+} – Fe_B^{3+}$, la variación de la distribución de cationes en los sitios A y B en la espinela depende de la longitud del enlace y conduce a las diferentes propiedades magnéticas de estos óxidos, incluso aunque la composición química del compuesto siga siendo la misma. La variación de la longitud de enlace afecta las propiedades magnéticas como la magnetización de saturación y el punto de Curie. La magnetización de saturación es el resultado de la suma de los espines no apareados de cationes. La interacción negativa o la fuerza de intercambio entre los momentos de dos iones metálicos en diferentes sitios depende de la distancia entre estos iones y el ión de oxígeno que los une. La interacción es mayor cuando el ángulo es de 180° y las distancias interatómicas son las más cortas (Amiri, S., & Shokrollahi, H., 2013).

El $CoFe_2O_4$ es uno de los materiales más importantes pertenecientes al grupo de la espinela inversa que se ha estudiado ampliamente, debido a sus interesantes propiedades magnéticas con alta coercitividad y magnetización moderada. Junto con estas propiedades, su estabilidad física y química hacen que las nanopartículas de $CoFe_2O_4$ sean apropiadas para aplicarse en medios de grabación magnéticos, en cintas de audio y video y discos de grabación digital de alta densidad. Debido a sus fascinantes propiedades físicas e importancia tecnológica, se han llevado a cabo una serie de estudios sobre nanomateriales de $CoFe_2O_4$ preparados mediante diferentes métodos de síntesis. Sin embargo, el método sol-gel proporciona nanopartículas de $CoFe_2O_4$ homogéneas con una descomposición controlada de precursores, y es una forma simple y rápida de sintetizar nanopartículas que apunta a productos de alta calidad a bajo costo (Amaliya, A. P., Anand, S., & Pauline, S., 2016)

La caracterización de nanopartículas magnéticas como las ferritas es importante, por ello se ha demostrado que la espectroscopia Raman es una extraordinaria herramienta para la ordenación de sitios de corto alcance de los cationes en ferritas de tipo espinela para obtener información a nivel molecular. Donde la espectroscopia Raman, es un método que no requiere una preparación sofisticada para analizar muestras. Además, es una herramienta potente y sensible para el análisis de películas delgadas y polvos. Esta técnica es útil para comprender la microestructura en nanomateriales, la transición de la estructura, la distorsión de la red, la carga y la retícula de los acoplamientos de celosía, la distribución del catión local y la disposición magnética.

La distribución de cationes en las espinelas y su efecto sobre los espectros Raman han sido bien documentados en la literatura. Debido al intercambio de cationes entre los sitios tetraédricos y octaédricos, los espectros Raman de ciertas espinelas se complican. Para comprender completamente el sistema de ferrita, es necesario tener información sobre el historial de tratamiento de la muestra. Los estudios sobre aluminatos de níquel y magnesio han señalado el uso de la espectroscopia Raman y han demostrado la sensibilidad de esta técnica para comprender la naturaleza del trastorno catiónico debido al tratamiento térmico de las muestras.

2. Espectroscopia Raman de Nanopartículas de Ferritas de Cobalto

Los espectros Raman de ferritas de cobalto han revelado un mayor número de bandas de fonones de lo esperado para la estructura de espinela cúbica. Su dependencia de la polarización puede explicarse por un ordenamiento de corto alcance de los cationes divalentes en los sitios octaédricos que inducen una disminución de la simetría (Ivanov, V. G., Abrashev, M. V., Iliev, M. N., Gospodinov, M. M., Meen, J., & Aroyo, M. I., 2010). Las investigaciones Raman realizadas en las matrices ordenadas de submicrones han mostrado la preservación de la distribución de cationes en los sitios tetragonales y octaédricos, así como en las películas epitaxiales correspondientes. La función dieléctrica de películas de ferrita se ha determinado en el intervalo de energía de 0.73 a 5 eV. Se ha utilizado un modelo de banda prohibida (GAP) para analizar los bordes de absorción y se han determinado las energías de la primera transición óptica directa e indirecta para ferritas de cobalto y níquel. Se encontró que ambos materiales tienen una banda prohibida indirecta, con valores de 1,65 eV y 1,42 eV para ferrita de níquel y ferrita de cobalto, respectivamente (Himcinschi, et al, 2013).

La distribución de cationes en la espinela también se ha analizado usando espectroscopía Raman. Ha sido posible determinar la redistribución de cationes que ocurre en la fase de alta temperatura usando espectroscopía Raman. Se ha observado que intensidad relativa entre los dos modos vibracionales a 695 y 624 cm^{-1} disminuyó con la reducción del parámetro de inversión de $CoFe_2O_4$. Al aumentar la potencia del láser para la adquisición de espectros Raman se presentó un cambio en la distribución catiónica de la ferrita. En un estudio donde los espectros Raman de $CoFe_2O_4$ fueron obtenidos bajo diferentes potencias del láser de 0.5 a 25 mW, donde se varió la potencia del láser para ver el efecto de la temperatura de la superficie en los espectros Raman.

Observándose el desplazamiento a la zona del infrarojo en el modo fonón y el cambio en la intensidad relativa entre los dos modos de vibración $A_{1g}(1)$ y $A_{1g}(2)$. Con el aumento de la potencia del láser o de la temperatura de la superficie, la distribución de cationes se logró estabilizar más hacia una configuración normal. Se ha comparado la variación del cambio de la región del Raman con el tamaño de la partícula y se ha analizado la ecuación del modelo de polarización de enlace con $A = 104\ cm^{-1}$ y $\gamma = 0.8$ como constantes.

El modo vibratorio de $A_{1g}(1)$ y $A_{1g}(2)$ en los espectros Raman con diferentes tamaños de partículas ha mostrado claramente que la redistribución de cationes cambia con el tamaño de partícula. Demostrando así, la presencia de la distribución de cationes en las espinelas y su dependencia del tamaño y la temperatura (Chandramohan, P., Srinivasan, M. P., Velmurugan, S., & Narasimhan, S. V., 2011). Al comparar los análisis Raman realizados en magnetita ($FeFe_2O_4$, Fe_3O_4 o $FeO{\cdot}Fe_2O_3$), llevando a cabo un análisis de simetría y una asignación de los modos de fonones de la magnetita, basados en la estructura de la espinela inversa, en condiciones ambientales, el espectro no polarizado de la magnetita ha mostrado cuatro de las cinco bandas de fonones pronosticadas teóricamente a 668, 538, 306 y 193 cm^{-1}. Los experimentos polarizados en un monocristal orientado han proporcionado una nueva interpretación del espectro Raman con la siguiente asignación para las simetrías de los modos vibracionales observados: A_{1g} para 668 cm^{-1}, E_g para 306 cm^{-1} y T_{2g} para 538, 193 y 450–490 cm^{-1} (Shebanova, O. N., & Lazor, P., 2003).

El análisis de la teoría de grupos también han predicho la distribución de los modos de los fonones ópticos en el espectro Raman de las nanopartículas de $CoFe_2O_4$: $5T_{1u} + A_{1g} + E_g + 3T_{2g}$; en el cual, los modos $5T_{1u}$ son activos en la región del espectro infrarrojo y cinco modos ($A_{1g} + E_g + 3T_{2g}$) son activos en la región del espectro Raman, debidos al movimiento de los iones oxígeno O^{2-} y de los sitios A y B en la estructura de la espinela. El modo A_{1g} ha descrito el estiramiento simétrico del anión oxígeno, el modo E_g se ha asignado al doblamiento simétrico del anión oxígeno y el modo T_{2g} al estiramiento asimétrico del anión oxígeno con respecto a los cationes tetraédricos y octaédricos en las señales han sido observadas en ~198, ~297, ~461, ~558, ~604 y 680 cm^{-1}. Se ha encontrado un pequeño cambio en los modos de la región Raman al aumentar la temperatura de recocido durante su preparación de $CoFe_2O_4$, debido al aumento del tamaño de partícula y la redistribución de los cationes en muestras recocidas de la ferrita de tipo espinela. La redistribución de los cationes se atribuyó a las intensidades relativas de los modos $A_{1g}(1)$ y $A_{1g}(2)$, (Yadav, R. S., et al, 2017). Las asignaciones Raman de los modos de vibración fonética a temperatura ambiente de las nanopartículas de $CoFe_2O_4$ obtenidas, usando Bromuro de cetil trimetil amonio (CTAB), hexametilentetramina (HMT) y polietilenglicol (PEG) como tensoactivos, han revelado estructuras cúbicas de tipo espinela, en los que se han observado tres modos activos en la región del espectro Raman como E_g, $T_{1g}(1)$ y $A_{1g}(1)$ a ~280, ~535 y ~673 cm^{-1} respectivamente. Y Cuatro modos activos Raman como Eg, $T_{1g}(1)$, $T_{1g}(2)$ y $A_{1g}(1)$; y en ~285, ~465, ~570 y ~675 cm^{-1} respectivamente. Estas bandas han sido equiparables con los modos de vibración de los fonones reportados para las nanopartículas de $CoFe_2O_4$, que poseen una estructura de espinela inversa con un típico comportamiento ferrimagnético a temperatura ambiente; que ha permitido comprobar que posee el mismo modo de vibración de intensidad $A_{1g}(1)$. Estos resultados observados han revelado que los tensioactivos (CTAB, HMT y PEG) utilizados en la técnica de procesamiento no modificó la estructura inversa del sistema de la ferrita (Rani, B. J., Ravina, M., Saravanakumar, B., Ravi, G., Ganesh, V., Ravichandran, S., & Yuvakkumar, R., 2018).

En otro estudio, el modo activo Raman de las nanopartículas de $CoFe_2O_4$ ha revelado la presencia de cuatro picos en 472, 568, 615 y 682 cm^{-1}, los cuales fueron asignados a los modos vibracionales $T_{1g}(2)$, $T_{1g}(1)$, $A_{1g}(2)$) y $A_{1g}(1)$ respectivamente. Dado que los métodos de preparación influyen en la estequiometría de los iones oxígeno, fueron observados cambios en el enlace con el ion oxígeno. Las intensidades de todos los modos de A_{1g} observados aumentaron y el ensanchamiento disminuyó al aumentar el tamaño de partícula, debido a la temperatura de recocido. La asignación del modo de vibración Raman a la frecuencia más alta (por encima de 600 cm^{-1}) ocasionado por el movimiento de los iones oxígeno en los sitios tetraédricos, a vibraciones de frecuencia más bajas (472 cm^{-1}), las cuales se debieron al movimiento de los iones oxígeno en los sitios octaédricos. La banda más intensa en 682 cm^{-1} fue asignada a la simetría A_{1g} en los sitios tetraédricos, y la banda en 472 cm^{-1} ha resultado ser característica de la simetría $T_{1g}(2)$ (sitios octaédricos) (Kumar, Y., & Shirage, P. M., 2017).

Por otra parte, es bien sabido que la estructura cúbica de la espinela inversa de nanopartículas de $CoFe_2O_4$, que pertenece al grupo espacial O_h^7 (Fd3m), puede generar hasta 39 modos normales: $\Gamma = A_{1g} + E_g + F_{1g} + 3F_{2g} + A_{2u} + 2E_u + 4F_{1u} + 2F_{2u}$, donde 5 modos ópticos son activos en la región del Raman $A_{1g} + E_g + 3F_{2g}$ y 4 son activos en la región del espectro de infrarrojo, cuya simetría es $4F_{1u}$. En un estudio donde se analizó el efecto de la sustitución de iones Fe^{3+} por tres elementos del grupo lantánido (Dy, La y Gd) se observaron cuatro picos (299, 465, 615 y 684 cm^{-1}), cuyos modos de baja frecuencia a 465 cm^{-1} fue posible asignarlas a las vibraciones de la sub-red octaédrica y al modo del fonón de alta energía a 684 cm^{-1} formado a partir de vibraciones de la sub-red tetraédrica (Dascalu, G., Pompilian, G., Chazallon, B., Nica, V., Caltun, O. F., Gurlui, S., & Focsa, C., 2013).

En otro estudio las bandas en 1325 y 1135 cm^{-1} se fueron asignadas a los modos A_{1g} y T_{2g} de segundo orden. Las bandas en 692 y 615 cm^{-1} se debieron al estiramiento simétrico A_{1g} (modo de vibración tetraédrica) de los átomos de oxígeno con respecto a los iones Fe y Co. Los modos T_{2g} (estiramiento asimétrico y flexión) se asignaron a bandas en 553 y 473 cm^{-1}, y el modo T_{2g} en 183 cm^{-1} fue asignado a un movimiento de traslación de todo el tetraedro. La banda a 297 cm^{-1} fue asignada a la flexión simétrica E_g de Fe(Co)-O (Bartůněk, V., Sedmidubský, D., Huber, Š., Švecová, M., Ulbrich, P., & Jankovský, O., 2018).

Finalmente, en un estudio propio, también fueron reportados los cambios en la intensidad y el desplazamiento del centro del pico espectral en los modos $A_{1g}(2)$ y $A_{1g}(1)$ que demostraron la presencia de las vibraciones de estiramiento de los enlaces Fe-O y Co-O en los sitios tetraédricos, que permitieron ser asociados a los cambios en el tamaño de las nanopartículas de $CoFe_2O_4$ (Flores-Gil, A., Benavides, O., Martinez-Vargas, S., May De La Cruz, L., & Patiño-Carachure, C., 2020).

Conclusiones

En este trabajo se realizó una breve revisión de los estudios espectroscópicos Raman más relevantes reportados en las últimas décadas de las nanopartículas de ferritas de cobalto, en especial $CoFe_2O_4$. El cual reveló que aun con el paso de los años, sigue siendo de gran interés por los científicos el análisis espectral en la región Raman para tratar de comprender más el comportamiento vibracional, simétrico y estructural de este fascinante nanomaterial en distintas condiciones experimentales; en virtud de que las propiedades físicas y químicas de las nanopartículas de $CoFe_2O_4$ (que son prometedoras para ser usadas en diversas aplicaciones) dependen principalmente de su tamaño de partícula, su dispersión de su tamaño, así como de su morfología, entre otras características, que son controladas al usar distintos métodos de preparación. Por lo que es de esperarse que en el futuro continúen reportándose más estudios de estos interesantes análisis de espectroscopia Raman de diversas nanopartículas de ferritas de cobalto, que permitirán a los científicos comprender más a fondo su comportamiento estructural (en cuanto a sus modos de vibración y su simetría) que están estrechamente relacionadas con sus propiedades físicas y químicas.

Referencias

Amaliya, A. P., Anand, S., & Pauline, S. (2016). CTAB assisted synthesis of cobalt ferrite nanoparticles and its characterizations. Journal of Nanoscience and Technology, 186-188.

Amiri, S., & Shokrollahi, H. (2013). The role of cobalt ferrite magnetic nanoparticles in medical science. Materials Science and Engineering: C, 33(1), 1-8.

Atkins, P. W., Child, M. S., & Phillips, C. S. G. (1970). Tables for group theory (Vol. 6, No. 2). Oxford: Oxford University Press.

Bartůněk, V., Sedmidubský, D., Huber, Š., Švecová, M., Ulbrich, P., & Jankovský, O. (2018). Synthesis and properties of nanosized stoichiometric cobalt ferrite spinel. Materials, 11(7), 1241.

Chandramohan, P., Srinivasan, M. P., Velmurugan, S., & Narasimhan, S. V. (2011). Cation distribution and particle size effect on Raman spectrum of CoFe2O4. Journal of Solid State Chemistry, 184(1), 89-96.

D'Ippolito, V., Andreozzi, G. B., Bersani, D., & Lottici, P. P. (2015). Raman fingerprint of chromate, aluminate and ferrite spinels. Journal of Raman Spectroscopy, 46(12), 1255-1264.

Dascalu, G., Pompilian, G., Chazallon, B., Nica, V., Caltun, O. F., Gurlui, S., & Focsa, C. (2013). Rare earth doped cobalt ferrite thin films deposited by PLD. Applied Physics A, 110(4), 915-922.

Flores-Gil, A., Benavides, O., Martinez-Vargas, S., May De La Cruz, L., & Patiño-Carachure, C.. (2020). Synthesis and Characterization of Cobalt Ferrite CoxFe3-xO4 Nanoparticles by Raman Spectroscopy and X-ray Diffraction. Int. J. Metall. Met. Phys, 5, 47.

Himcinschi, C., Vrejoiu, I., Salvan, G., Fronk, M., Talkenberger, A., Zahn, D. R., ... & Kortus, J. (2013). Optical and magneto-optical study of nickel and cobalt ferrite epitaxial thin films and submicron structures. Journal of Applied Physics, 113(8), 084101.

Ivanov, V. G., Abrashev, M. V., Iliev, M. N., Gospodinov, M. M., Meen, J., & Aroyo, M. I. (2010). Short-range B-site ordering in the inverse spinel ferrite $NiFe_2O_4$. Physical Review B, 82(2), 024104.

Kumar, Y., & Shirage, P. M. (2017). Highest coercivity and considerable saturation magnetization of $CoFe_2O_4$ nanoparticles with tunable band gap prepared by thermal decomposition approach. Journal of Materials Science, 52(9), 4840-4851.

Pham, T. N., Huy, T. Q., & Le, A. T. (2020). Spinel ferrite (AFe_2O_4)-based heterostructured designs for lithium-ion battery, environmental monitoring, and biomedical applications. RSC Advances, 10(52), 31622-31661.

Rani, B. J., Ravina, M., Saravanakumar, B., Ravi, G., Ganesh, V., Ravichandran, S., & Yuvakkumar, R. (2018). Ferrimagnetism in cobalt ferrite ($CoFe_2O_4$) nanoparticles. Nano-Structures & Nano-Objects, 14, 84-91.

Shebanova, O. N., & Lazor, P. (2003). Raman spectroscopic study of magnetite ($FeFe_2O_4$): a new assignment for the vibrational spectrum. Journal of Solid State Chemistry, 174(2), 424-430.

Testa-Anta, M., Ramos-Docampo, M. A., Comesaña-Hermo, M., Rivas-Murias, B., & Salgueiriño, V. (2019). Raman spectroscopy to unravel the magnetic properties of iron oxide nanocrystals for bio-related applications. Nanoscale Advances, 1(6), 2086-2103.

Yadav, R. S., Kuřitka, I., Vilcakova, J., Havlica, J., Masilko, J., Kalina, L., ... & Hajdúchová, M. (2017). Impact of grain size and structural changes on magnetic, dielectric, electrical, impedance and modulus spectroscopic characteristics of $CoFe_2O_4$ nanoparticles synthesized by honey mediated sol-gel combustion method. Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology, 8(4), 045002.

Capítulo 4 Un estudio comparativo experimental sobre el efecto de longitud de onda láser en la reflectividad del niobio en el régimen de ablación

Chapter 4 A comparative experimental study on the wavelength effect on the reflectivity of niobium in the ablation regime

BENAVIDES, Olena†*, DE LA CRUZ-MAY, Lelio, y FLORES-GIL, Aarón

Universidad Autónoma del Carmen, Campus III, Facultad de Ingeniería, Avenida Central S/N, Esq. con Fracc. Mundo Maya, C.P. 24115, Ciudad del Carmen, Camp., Mex.

ID 1er Autor: *Olena, Benavides* / **ORC ID:** 0000-0002-8124-0326**, CVU CONACYT ID:** 339830

ID 1er Coautor: *Lelio, De la Cruz-May* / **ORC ID:** 0000-0003-3918-0582, **CVU CONACYT ID:** 75160

ID 2do Coautor: *Aarón, Flores-Gil* / **ORC ID:** 0000-0002-2302-2056, **CVU CONACYT ID:** 121166

DOI: 10.35429/H.2021.16.27.38

O. Benavides, L. De la Cruz y A. Flores

*obenavides@pampano.unacar.mx

S. Figueroa (AA.). Aplicaciones Láser en la Ingeniería. Handbooks-TI-©ECORFAN-Mexico, 2021.

Resumen

La información disponible sobre el efecto de la longitud de onda láser sobre la reflectividad del niobio es escasa. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es estudiar el efecto que tiene la longitud de onda láser sobre la reflectividad de las muestras de niobio. Para estudiar el efecto, se realizan mediciones en aire a presión atmosférica de la reflectividad total de una muestra de niobio pulida mecánicamente, irradiada por un láser de nanosegundos de alta intensidad ND: YAG. La fluencia láser varía de 0.1 a 100 J/cm2. Los resultados de las mediciones indican que, para longitudes de láser más largas, los valores de reflectividad son mayores que en el caso de las longitudes de láser más cortas. El efecto de la longitud de onda láser sobre la reflectividad de la muestra es más notable a fluencias de láser bajas. A medida que la fluencia aumenta, los valores de reflectividad caen a un cierto valor y se mantienen constantes con el incremento de la fluencia láser, este efecto se le atribuye a la formación de plasma. El plasma en formación empieza a absorber la luz láser, lo cual ocasiona un cambio drástico en los valores de reflectividad y absorción de la muestra. El cálculo computacional de la temperatura superficial del material en el umbral de fluencia de formación de plasma revela que su valor está significativamente por debajo del punto de fusión de la muestra; esto sugiere que los defectos nanoestructúrales juegan un papel muy importante en las etapas tempranas de formación de plasma en las muestras reales. Esto es debido a que los defectos micro/nano estructurales reciben una mayor cantidad de calentamiento causado tanto por la absorción plasmónica como por el enfoque nano-estructural plasmónico.

Ablación láser, Reflectividad, Efecto de la longitud de onda láser, Muestra de niobio

Abstract

Our knowledge of the effect of laser wavelength on the reflectivity of niobium is largely based on very limited data. Thus, the aim of this research is to study the effect of laser wavelength on the reflectivity of the niobium samples. Total reflectivity of a mechanically polished niobium sample irradiated by high-intensity nanosecond Nd:YAG laser pulses was experimentally measured in air at atmospheric pressure. Laser fluence varies from 0.1 to 100 J/cm2. Experimentation suggests that for longer laser wavelengths reflectivity values are higher than for shorter wavelengths. The effect of laser wavelength on the reflectivity of the sample is more noticeable at low laser fluences. As the fluence increases, the values of reflectivity drop to a certain value and remain unchanged with further increase in laser fluence, this is attributed to plasma formation. The reflection and absorption of the laser light by the sample dramatically changes due to the absorption of the laser light by the forming plasma. Computation of the surface temperature at the plasma formation threshold fluence reveals that its values are significantly below the melting point of the sample; this suggests that nanostructural defects play an important role in early plasma formation on the real sample due to their enhanced heating caused by both plasmonic absorption and plasmonic nanofocusing.

Láser Ablation, Reflectivity, Láser wavelength effect, Niobio sample

1. Introducción

La ablación láser de nanosegundos de los solidos se utiliza en diferentes aplicaciones como materiales auto plegables (Lazarus, N. 2019), deposición de películas delgadas (Ashfold, M., 1994, Chrisey D.B , 1994), procesamiento de materiales con láser de nano/micro pulsos (György, E ., 2004, Bulgakova, N. M., 2009, Pedraza, A. J ., 2003, Wang, Z. B., 2004, Hendow, S. T., 2010), parametrización de propiedades ópticas [Zorba, V., 2008, Tang, G., 2012], fraccionamiento (Russo, R. E., 2000), espectroscopia de plasma inducido por láser (Gottfried JL,2009), diseño de materiales hidrofóbicos (Ta, DV, 2015, Ocaña, J. L., 2016), micro fluidos (Cheng, J.-Y., , 2005) y otros. A pesar de que existen varios estudios con respecto a la ablación láser por pulsos de nanosegundos de alta intensidad, el efecto de la longitud de onda del láser sobre la reflectividad de los metales es aún un tema de investigación en el área. El primero en estudiar la reflectividad de los metales irradiados por pulsos láser de alta intensidad fue Bonch-Bruevich et al. (A. M. Bonch-Bruevich, 1968). En su investigación Bonch registró una caída significativa de los valores de reflectividad total de los metales. Basov et al. (Basov N.G, 1969) estudió la reflectividad total de los metales Cu, Sn y Al irradiados por un láser Nd de pulsos de 15 ns, variando la fluencia láser de 3×10^7 a 3×10^10 W/cm^2, en condiciones de vacío. Los resultados muestran una rápida caída de los valores de reflectividad en el régimen de ablación.

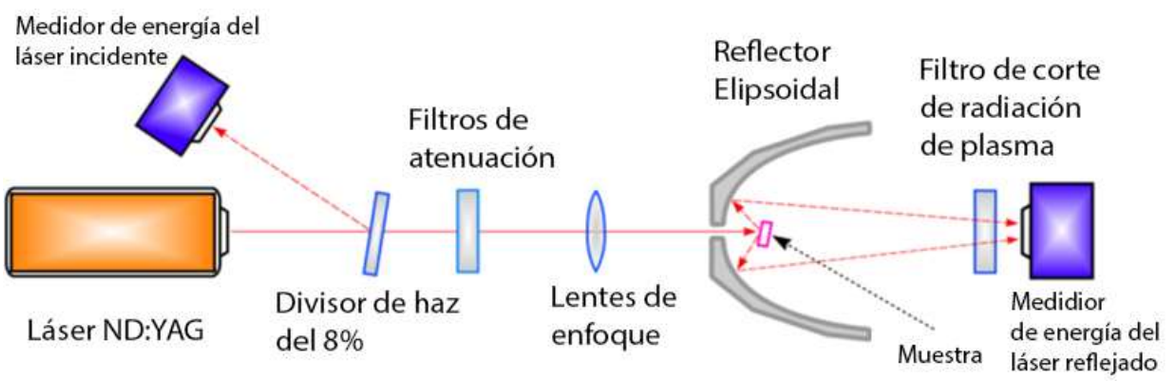
Experimentos previos (Benavides O., 2013, 2015, 2016), se concentran en el estudio de la reflectividad de los metales irradiados por pulsos láser en el régimen de ablación. El mismo efecto en relación con la caída de los valores de reflectividad asociados con la formación de plasma en la superficie de las muestras se puede observar. Nuestra investigación se lleva a cabo con el niobio, un metal de gran interés en la industria tecnológica (Nikishina, E. E., 2013). El niobio se utiliza para reforzar aleaciones, especialmente a bajas temperaturas (Grill, R., 2006). Las aleaciones que contienen niobio se utilizan en motores de jet y cohetes espaciales, vigas de construcción y plataformas petroleras, tuberías de crudo y gas natural y cables superconductores que utilizan los magnetos superconductores (Laverick, C., 1988). Los trabajos anteriores únicamente se han concentrado en el efecto de la fluencia láser sobre la reflectividad del material, sin considerar el efecto que tiene la longitud de onda sobre la misma. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es estudiar el efecto que tiene la longitud de onda del láser sobre la reflectividad hemisférica total del niobio en régimen de ablación utilizando un láser de pulsos de nanosegundos Nd:YAG en aire en condición atmosférica. Se proponen dos longitudes de onda λ_1=1.06 y λ_2=0.69 μm. La reflectividad hemisférica total se estudia en función de la fluencia láser en el rango de 0.1 – 100 J/cm2. Todas las muestras fueron mecánicamente pulidas con polvo de óxido de aluminio con granos de 0.3- μm. No fue posible caracterizar experimentalmente las muestras (pureza), sin embargo, como es en el caso de muchas prácticas de procesamiento de materiales, las muestras a granel muestran defectos, impuridades, óxidos y adsorbatos. Las condiciones iniciales para cada experimento se mantienen constantes.

2. Materiales y Metodología

Un diagrama de flujo de la configuración experimental que se usó para estudiar la reflectividad de la luz en régimen de ablación se muestra en la Figura 1. Se utilizaron a) un láser Nd:YAG con longitud de onda $\lambda_1 = 1.06\,\mu m$ y b) un láser de rubí con una longitud de onda $\lambda_2 = 0.69\,\mu m$. La duración del pulso láser para ambas configuraciones es de aproximadamente 50 ns a la anchura a media altura (FWHM por sus siglas en inglés). Para controlar la fluencia láser incidente sobre la muestra se utiliza un atenuador calibrado de variable.

El haz láser se concentra en la muestra utilizando un lente con una longitud focal de 250 mm. Para estudiar la reflectividad, se utilizó un reflector de luz hemiellipsoidal, cuyo propósito es recolectar los componentes especulares y difusos de la luz reflejada. La muestra se coloca en el punto focal interno del reflector hemiellipsoidal, la muestra en cuestión tiene una inclinación de 19° con respecto al eje del haz láser incidente. La luz del láser que se refleja de la muestra se recolecta en el punto focal externo del reflector, y su energía E_{refl}, se mide con un medidor de *Joules.* Un filtro de corte se implementó para prevenir que se filtre la radiación de la plasma en el medidor de *Joules*. Para medir la energía del pulso láser incidente en la muestra E_{inc}, utilizamos un parte haz que redireccion una fracción del haz láser hacia un segundo medidor de Joules, como se muestra en la Figura 1. Una vez medidos E_{refl} y E_{inc}, se calcula la reflectividad hemisférica total R (es una suma de los componentes especulares y difusos de la luz reflejada), de tal manera que $R = E_{refl}/\,E_{inc}$. La fluencia láser incidente F, se determina al dividir la energía del pulso láser incidente, E_{inc} entre el área de incidencia del láser en la muestra. La reflectividad total se estudia en un rango de fluencia láser de 0.06 – 100 J/cm^2.

Figura 1 Diagrama de la configuración experimental que se utilizó para estudiar la reflectividad del niobio en el régimen de ablación



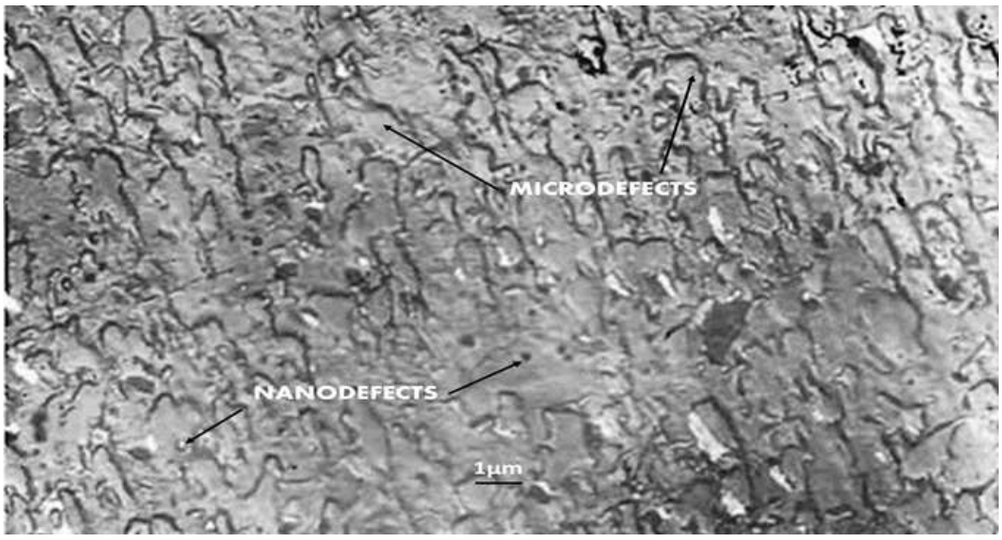
Fuente. Elaboración Propia

Todos los experimentos se llevaron a cabo a presión atmosférica. Después de cada pulso láser, la muestra se traslada con la ayuda de un controlador X-Y asistido por computadora para irradiar en una nueva parte de la superficie de la muestra con el siguiente disparo láser. Adicionalmente, se estimaron los umbrales de daño superficial y formación de plasma. El umbral de daño superficial de una muestra se determina como la fluencia mínima del pulso en la cual se puede notar con ayuda de un microscopio óptico que la superficie ha sido dañada.

El umbral de formación de plasma se determina a través de una técnica propuesta por (Vorobyev, A. Y., 2006), consiste en la detección de un brilloso destello violeta muy particular que emana del punto irradiado. Para detectar el destello violeta, se utiliza un fotomultímetro (PMT, por sus siglas en inglés), con un filtro de corte de longitudes de onda mayores a 0.45 μm.

La muestra de niobio se moldea en forma de placa con un grosor de 1 – 1.5 mm, se pulió mecánicamente para obtener una superficie simple plana. Es preferible tener muestras con superficies ópticamente planas (a nivel milimétrico). Sin embargo, esto requiere un proceso específico que usualmente es muy costoso. Un microscopio electrónico de barrido (SEM por sus siglas en inglés) se utilizó para caracterizar los defectos en la estructura superficial de las muestras mecánicamente pulidas (Figura 2). Posterior al proceso de pulido, se utiliza un espectrofotómetro Lambda 900 marca Perkin-Elmer con una esfera integradora, para medir la reflectividad de la muestra de niobio a temperatura ambiente considerando las longitudes de onda propuestas.

Figura 2 Barrido del microscopio electrónico de la superficie de la muestra de niobio pulido, previo a radiación láser, donde se pueden observar tanto micro como nano defectos



Fuente. Elaboración Propia

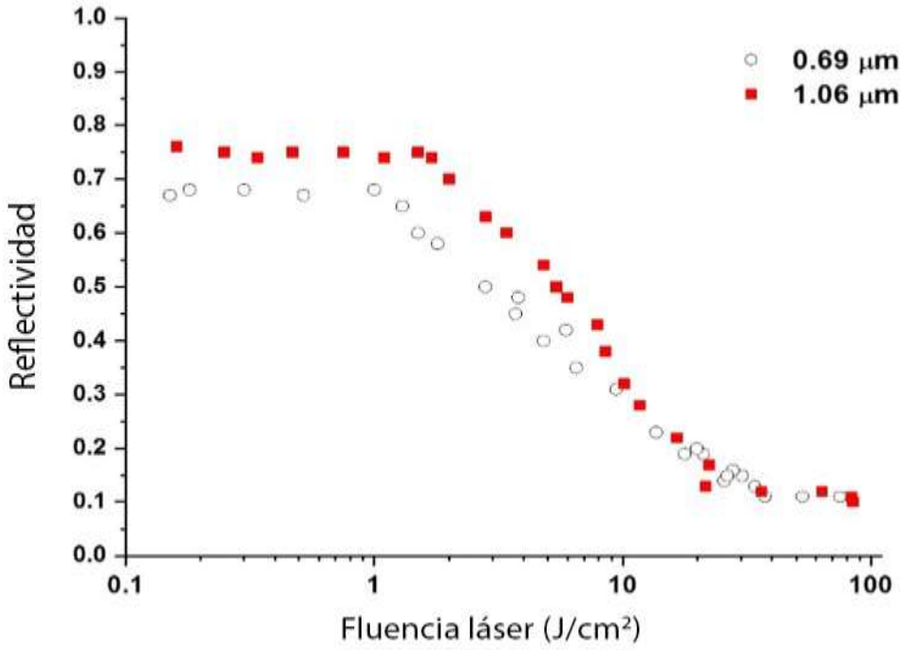
Resultados

La reflectividad total en función de la fluencia láser en el régimen de ablación del niobio para ambas longitudes de onda se muestran en la Figura 3. Observe que los valores de reflectividad de λ_1=1.06μm son más altos que los de λ_2=0.69μm. A fluencias láser bajas, la superficie irradiada no sufre ningún daño superficial y los valores de reflectividad son en promedio 0.75 y 0.68, respectivamente, y se mantienen constantes desde que cruzan el umbral de formación de plasma.

Se determinó que los umbrales de formación de plasma promediados en diez mediciones eran 2 y 1.3 J/cm2, respectivamente. Se encontró que los valores del umbral de daño eran solo ligeramente más bajos que los valores de fluencia de formación de plasma; 1.7 y 1.2 J/cm2 para longitudes de onda de 1.06 y 0.69 μm, respectivamente. El efecto de la longitud de onda sobre la reflectividad del material se muestra en la Figura 3. Observe que los valores de reflectividad son muy diferentes para cada longitud de onda del láser, a medida que la fluencia del láser aumenta aún más, la reflectividad cae a aproximadamente 0.1 para ambas longitudes de onda y el efecto de la longitud de onda del láser se vuelve insignificante ya que los valores de reflectividad permanecen sin cambios a pesar de que se produzca un aumento de la fluencia del láser; esto se atribuye a la absorción plasmónica.

La absorción de luz láser en el plasma aumenta, mientras que la absorción en la capa superficial disminuye al aumentar la fluencia láser. Creemos que este hecho juega un papel importante en la reducción del efecto de la longitud de onda en la reflexión total a F>10 J/cm2.

Figura 3 Valores experimentales de reflectividad para el niobio a granel cuando se irradia con longitudes de onda láser 1.06 y 0.69 µm a presión atmosférica



Fuente. Elaboración Propia

Discusión

Observe que para la longitud de onda más larga (0.69 µm) los valores de reflectividad caen antes que para 1.06 µm. Esto podría deberse a que las longitudes de onda más cortas son absorbidas más eficientemente por los metales que las más largas (Winter, K. M., 2015). Esto concuerda con el hecho de que la formación de plasma se produce con una fluencia láser más baja para λ_2que para λ_1.

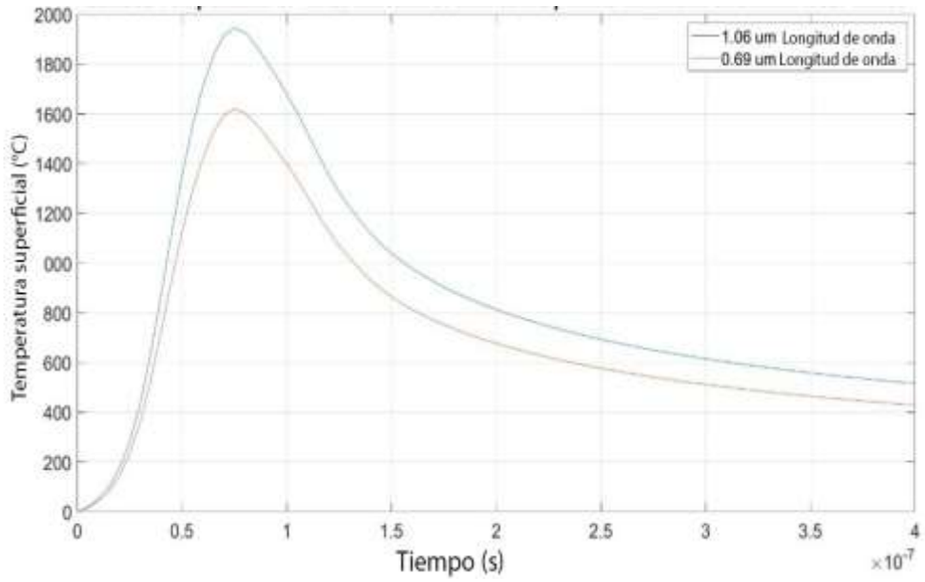
Se ha discutido previamente que la reducción de la reflectividad puede ser causada por la dependencia de la temperatura de las constantes ópticas (Libenson M N., 1969, Ujihara, K. 1972) y la absorción de la luz láser por el plasma inducido por láser (Basov N.G, 1969 Benavides O., 2013). Para explicar el papel de la dependencia de la temperatura de las constantes ópticas en la reflectividad, la temperatura de la superficie de las muestras en las fluencias del umbral de formación de plasma se ha calculado utilizando la ecuación de Drude derivada por Ready (Ready J.R, 1971).

$$T_{surf}(t) = \frac{(1-R)\sqrt{a}}{k\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{I(t-\tau)}{\sqrt{\tau}} d\tau + T_0 \quad (1)$$

Donde α es la difusividad térmica, k es la conductividad térmica, I es la intensidad de radiación del haz láser incidente, t es el tiempo en segundos, T_0 es la temperatura inicial y τ es la variable de integración. La ecuación de temperatura de la superficie se calcula para cada longitud de onda utilizando los siguientes parámetros: Para λ_1= 1.06 µm, k = 53.7 W/(m· K), $\alpha = 2.321 \times 10^{-5}\ m^2/s$, T_0 = 20 °C, R = 0.75 y para λ_2= 0.69 µm, R = 0.68.

Las temperaturas calculadas se muestran en la figura 4. Observe que las temperaturas superficiales máximas son 1945 °C y 1618 °C para las longitudes de onda λ_1 y λ_2, respectivamente.

Figura 4 Temperatura de la superficie calculada de las muestras de Nb en función del tiempo en el umbral de formación de plasma de la fluencia del láser



Fuente. Elaboración Propia

Las temperaturas máximas de la superficie calculadas en las fluencias del umbral de formación de plasma son significativamente menores que el punto de fusión del metal estudiado (2477 °C). Los datos de temperatura de la superficie muestran que los valores de reflectividad de las muestras estudiadas no cambian al menos hasta el umbral de formación de plasma. La teoría clásica de los electrones libres de Drude predice una disminución de la reflectividad con un aumento de la temperatura (Sergei I. Anisimov., 1995). Para las ondas cercanas al infrarrojo, la dependencia de la temperatura de la reflectividad Drude de los metales viene dada por la siguiente aproximación (Libenson M N., 1969):

$$R(T) \approx 1 - \frac{\omega_p}{2\pi\sigma_0(T)} \tag{2}$$

donde T es la temperatura, σ_0 es la conductividad eléctrica, $\omega_p = \left(\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}\right)^{\frac{1}{2}}$ es la frecuencia del plasma en el metal, n_e es la densidad de electrones libres en el metal, e es la carga del electrón, m_e es la masa efectiva del electrón. La teoría de Drude solo se aplica a las superficies metálicas que son idealmente lisas y limpias. Las superficies cercanas a las ideales solo se pueden producir mediante la deposición de películas delgadas en condiciones de vacío extremas. Se ha dicho anteriormente que las superficies metálicas reales comúnmente están oxidadas, contaminadas, cubiertas con adsorbatos y tienen defectos estructurales que pueden mejorar la capacidad de absorción $A = (1 - R)$. La absortividad para una superficie lisa real viene dada por (Prokhorov A.M., 1990):

$$A = (1 - R) = A_{IN} + A_{IM} + A_{OX} + A_{AD} + A_{SD} \tag{3}$$

Donde A_{IN}, es la absortancia intrínseca de la superficie ideal dada por la teoría de Drude, A_{IM}, A_{OX}, A_{AD} y A_{SD} son contribuciones de las impurezas de la superficie, óxidos, adsorbatos y defectos estructurales de la superficie, respectivamente. Estas contribuciones pueden ser dependientes de la temperatura, haciendo que la dependencia de la temperatura resultante de A o R difiera de la predicha por la teoría de Drude. Dado que los datos obtenidos muestran que la reflectividad no cambia desde la temperatura ambiente hasta el umbral de formación de plasma, donde la reflectividad comienza a disminuir, asumimos que la fuerte caída en los valores de reflectividad es causada por un efecto de protección del plasma.

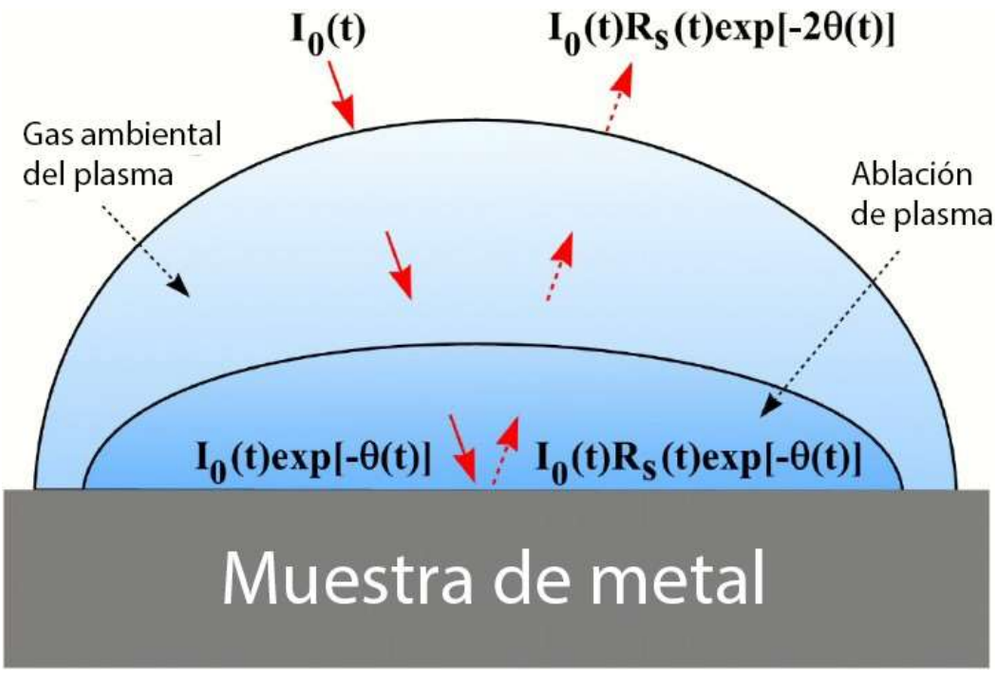
Por lo tanto, las caídas de reflectividad que ocurren en nuestro experimento a 1945 °C y 1618 °C, no pueden explicarse por la dependencia de la temperatura de las propiedades ópticas. Esto sugiere que los micro y nano defectos en la superficie de la muestra juegan un papel importante en la descomposición óptica temprana de la muestra. El calentamiento de la superficie por radiación láser de varios defectos microestructurales mediante pulsos de láser de nanosegundos y sus efectos sobre la formación de plasma en el aluminio a granel en el aire se han estudiado previamente (Walters, C. T., 1978).

Los autores encontraron que la laminación y los defectos de tipo hoyo son los sitios de iniciación potenciales más comunes en superficies metálicas prácticas. Además, demostraron que estos defectos se calientan más rápidamente a una temperatura significativamente más alta que la superficie de aluminio a granel. En otro estudio experimental (Vorobyev, A. Y., 1980), se midió la absortividad de micro cráteres de metal a granel irradiados por pulsos de láser de rubí gigantes. Los metales estudiados fueron Cu, Al, Mg, Cd y Sn. El autor encontró que la absorción de la radiación láser durante la etapa inicial de la evaporación avanzada ocurre principalmente en defectos de tipo pozo (micro cráteres). La profundidad de los cráteres en los objetivos metálicos investigados fue de alrededor de 5-10 μm. Los cambios abruptos en la absortividad de los metales se atribuyeron a la ruptura óptica en la superficie del objetivo.

Por lo tanto, la discrepancia entre los resultados experimentales y las predicciones teóricas puede explicarse por el hecho de que el cálculo teórico solo es válido para superficies metálicas pulidas y limpias idealmente. Para superficies prácticas, que comúnmente están contaminadas, oxidadas, cubiertas con adsorbentes y tienen defectos nano/microestructurales, el teorema de Drude puede no ser aplicable como se explica en (Vorobyev, A. Y., 2011).

Atribuimos la fuerte disminución en los valores de reflectividad al efecto de absorción de plasma, ya que el inicio de la disminución ocurre en la fluencia de un láser solo ligeramente por encima del umbral de daño y se correlaciona con el umbral de ignición del plasma. El reflejo de la luz láser en condiciones de generación de plasma ya se ha discutido ampliamente en (Benavides O., 2013) y más adelante en (Tokarev, V. N.,1995). La figura 5 muestra el proceso de reflexión en este caso. Se han definido dos tipos de plasmas inducidos por la-ser para ablación en aire, plasma de ablación de material y plasma de gas ambiental. Además, el plasma de gas ambiental puede tomar la forma de una onda de combustión o una onda de detonación apoyada por láser, dependiendo de la intensidad de la fluencia del láser (Wen, S.-B., 2007, Radziemski, L. J., 1989).

Figura 5 Esquemas de plasmas inducidos por láser y reflexión del pulso láser del sistema muestra-plasma. Donde $I_0(t)$ es la potencia del pulso del láser incidente, $I_0(t)\exp[-\theta(t)]$ es la potencia del pulso del láser que llega a la superficie de la muestra, θ(t) es el espesor óptico total del plasma, $I_0(t)R_s(t)exp[-\theta(t)]$ es la potencia del pulso láser reflejada desde la superficie de la muestra, $R_s(t)$ es la reflectividad de la superficie de la muestra, $I_0(t)R_s(t)\exp[-2\theta(t)]$ es la potencia del pulso láser que escapa del sistema de muestra-plasma



Fuente. Elaboración Propia

Considerando la absorción del haz láser en el plasma, la reflectancia integrada en el tiempo viene dada por (Benavides O., 2013).

$$R = \frac{\left(\int_0^{\tau_L} I_0(t) R_s(t) \exp[-2\theta(t)] dt\right)}{\int_0^{\tau_L} I_0(t) dt} \quad (4)$$

Donde $I_0(t)$ es la potencia del pulso del láser incidente, t es el tiempo en segundos, $R_s(t)$ es la reflectividad de la superficie de la muestra, θ(t) es el espesor óptico total del plasma y τ_L es la duración del pulso láser. La ecuación (4) muestra que R depende tanto del espesor óptico total del plasma θ como de la reflectividad de la superficie R_s.

En general, el efecto de la longitud de onda total sobre la reflexión de la luz en la ablación depende tanto de la absorción de la luz láser en la capa superficial de la muestra como en el plasma. La dependencia de la longitud de onda de la reflectividad con respecto a la capa superficial se describe mediante las fórmulas de Fresnel y Drude (Ujihara, K., 1972). Para una superficie lisa, plana y limpia, la reflectividad viene dada por:

$$R = \left|\frac{\frac{1}{\varepsilon^2}-1}{\frac{1}{\varepsilon^2}+1}\right|^2 = \frac{(n-1)^2+k^2}{(n+1)^2+k^2} \quad (5)$$

Donde ε es la función dieléctrica compleja, n es el índice de refracción y k es el coeficiente de extinción. Para los metales, ε viene dada por la relación (Born M., 1980, Kirkwood, S. E., 2009).

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - i v_{eff})} \quad (6)$$

Donde ω es la frecuencia angular de la luz láser, $v_{eff} = v_{e-ph} + v_{e-e}$ es la frecuencia de colisión efectiva, v_{e-ph} y v_{e-e} son las contribuciones de las colisiones entre electrón-fonón y electrón-electrón, respectivamente. A diferencia de los pulsos de láser de femtosegundos [Kirkwood, S. E., 2009], la contribución de v_{e-e} es pequeña en el caso de los pulsos de láser de nanosegundos. Las relaciones (5) y (6) predicen el aumento de la reflectividad con el aumento de la longitud de onda de la luz. En este caso, la energía por fotón es 1.17 y 1.8 eV para 1.06 μm y 0.69 μm respectivamente.

Utilizando los valores de la tabla de n y k para el niobio (A. I. Golovashkin , 1968), la ecuación (5) da R_1 = 0.82 y R_2 = 0.60 para λ_1 y λ_2, respectivamente. Estos valores de reflectancia calculados difieren de los medidos en este estudio (R_1 = 0.75 y R_2 = 0.68). Sin embargo, concuerdan bien con los valores de reflectancia mostrados en (Weaver, J. H., 1973).

Las discrepancias entre nuestros valores de reflectividad y los calculados mostrados se explican por el hecho de que los valores de las tablas *n* y *k* se obtuvieron para una película delgada, limpia y lisa de alta calidad óptica y pureza (99,9% de niobio) (A. I. Golovashkin , 1968). Sin embargo, en la mayoría de las aplicaciones prácticas, la superficie de la muestra real no es ideal y tiene defectos nano/microestructurales, una capa de óxido y contaminantes, que dan como resultado diferentes valores de reflectancia, tal es nuestro caso.

Se sabe muy poco acerca de la reflectividad de una superficie que se somete a ablación y es tamizada por plasma (términos R_s (t) en la ecuación (4)). Se ha demostrado que la ablación es impulsada predominantemente por mecanismos de vaporización y explosión de fase, dependiendo de la fluencia del láser (Bulgakova, N. M., 2009, Kelly, R., 1996, Porneala, C., 2006). El umbral de explosión de fase para metales está en el rango de 3.9-15 J/cm^2 (Marla, D., 2014, Porneala, C., 2006, Guillemot, F., 2004). En fluencias más altas, como en nuestro caso, las superficies sólidas de la muestra se vuelven líquidas y pueden cambiarse a un estado de fluido supercrítico.

En la bibliografía (Smith, N. V., 1967, Hodgson, J. N., 1962, Abeles F., 1966) hay varios ejemplos de estudios realizados sobre las propiedades ópticas de los metales líquidos. Se ha demostrado que la reflexión de la luz por metales líquidos está bien descrita por las ecuaciones de Fresnel y Drude. Sin embargo, la principal limitación cuando se trata de modelar la reflectividad de las capas líquidas producidas en la ablación láser es tener en cuenta las fluctuaciones geométricas transitorias del perfil de la superficie causadas durante la ablación pulsada por láser. Por ejemplo, las ondas transitorias a nano escala en la superficie de la capa fundida pueden afectar la reflectancia a través de la dependencia angular de Fresnel.

Hasta donde sabemos, las propiedades ópticas de las nano / microondas transitorias inducidas en una superficie metálica por un pulso de láser de nanosegundos siguen sin estudiarse. El efecto del mecanismo de explosión de fase entra en juego cuando la temperatura de la superficie de la capa excede 0.9 Tc, donde Tc es la temperatura crítica. Kudryashov et al. (2011) informaron de una caída significativa de la reflectividad al estudiar la ablación del grafito por láser KrF de nanosegundos a fluencias láser intermedias y lo atribuyeron al efecto de explosión de fase. En un estudio realizado por Wu y Shin (2006), se ha calculado teóricamente el coeficiente de absorción del aluminio cerca del punto crítico a una longitud de onda de 532 nm y utilizando el modelo Drude. Se encontró que el valor del coeficiente de absorción era más pequeño en aproximadamente tres órdenes de magnitud en comparación con el valor de temperatura ambiente.

Adicionalmente, el efecto de la longitud de onda sobre el coeficiente de absorción del aluminio cerca del punto crítico se ha demostrado en (Cao, Y., 2013), donde se predice que el coeficiente de absorción disminuirá al aumentar la longitud de onda. Esto sugiere que la absorción de luz láser en el plasma aumenta, mientras que la absorción en la capa superficial disminuye con el aumento de la longitud de onda del láser.

Conclusiones

Se sabe muy poco sobre el efecto que tiene la longitud de onda del láser sobre la reflectividad del niobio. En este trabajo se realizó un estudio experimental comparativo sobre el efecto de la longitud de onda del láser sobre la reflectividad del niobio irradiado por pulsos de láser de nanosegundos con dos longitudes de onda diferentes (1.06 μm y 0.69 μm). Nuestros experimentos son consistentes con resultados anteriores (O. Benavides, 2016) y muestran que, a bajas fluencias láser, el efecto de la longitud de onda del láser es más significativo, pero a medida que la fluencia del láser aumenta más allá del umbral de formación de plasma, el efecto de la longitud de onda del láser se vuelve insignificante y permanece constante con el incremento de fluencia láser. Un análisis adicional de la temperatura de la superficie en la fluencia de formación de plasma revela que la temperatura de la superficie calculada está significativamente por debajo del punto de fusión de la muestra de niobio, esto sugiere que los micro/nano defectos juegan un papel importante en la caída de la reflectividad debido a la absorción plasmónica.

Tomando en cuenta la absorción de la luz láser por el plasma revela que los valores de reflectividad para ambas longitudes de onda son un poco diferentes, pero estas discrepancias pueden pasarse por alto, ya que la muestra utilizada por los autores en la literatura [39] tiene una pureza del 99,9%, lo que en aplicaciones prácticas es muy raro de encontrar. Los nano / micro defectos, películas de óxido y contaminantes dan como resultado un efecto de longitud de onda más pronunciado sobre la reflectancia. Además, las ondas transitorias a nano escala en la superficie de la capa fundida pueden afectar la reflectancia a través de la dependencia angular de Fresnel. Creemos que la absorción de luz láser en plasma juega un papel importante en la reducción del efecto de la longitud de onda en la reflectividad total a F>10 J/cm^2 en nuestros datos experimentales. A medida que aumenta la longitud de onda del láser, aumenta la absorción de luz láser en el plasma, mientras que la absorción en la capa superficial disminuye.

Referencias

A. I. Golovashkin, I.E. Leksina, G. P. Motulevich, and A. A. Shubin. The Optical Properties of Niobium. P. N. Lebedev Physics Institute, Academy of Sciences, U.S.S.R. 1968.

A. M. Bonch-Bruevich, Y. A. Imas, G. S. Romanov, M. N. Libenson, and L. N. Mal'tsev, "Effect of a láser pulse on the reflecting power of a metal," Sov. Phys. Tech. Phys. 13(5), 640–643 (1968).

Abeles F (ed) 1966. Optical Properties and Electronic Structure of Metals and Alloys (Amsterdam: North-Holland).

Ashfold, M., Claeyssens, F., Fuge, G., & Henley, S. (2004). Pulser Láser Ablation and Deposition of Thin Films. Chemical Society Reviews, 33, 23-31. doi:10.1039/b207644f

Basov N.G, Boiko V.A, Krokhin O.N, Semenov O.G, Sklizkov G.V., Reduction of reflection coefficient for intense láser radiation of solid surfaces, Sov. Phys. – Tech. Phys. 13 (1969) 1581-1582.

Benavides O., L. de la Cruz May, Flores Gil A., A comparative study on reflection of nanosecond Nd-YAG láser pulses in ablation of metals in air and in vacuum. Opt.Express 21 (2013) 13068-13073.

Benavides O., L. de la Cruz May, Flores Gil A., Lugo J.A. Jimenez, Experimental study on reflection of high-intensity nanosecond Nd:YAG láser pulses in ablation of metals, Opt. Lásers Eng. 68 (2015) 83–86.

Born M., Wolf E., Principles of Optics. Pergamon Press, Oxford, 1980.

Bulgakova, N. M., Panchenko, A. N., Tel'minov, A. E., & Shulepov, M. A. (2009). Formation of microtower structures on nanosecond láser ablation of liquid metals. Applied Physics A, 98(2), 393. doi:10.1007/s00339-009-5395-8

Cao, Y., Zhao, X., & Shin, Y. C. (2013). Analysis of nanosecond láser ablation of aluminum with and without phase explosion in air and water. Journal of Láser Applications, 25(3), 032002. doi:10.2351/1.4794032

Cheng, J.-Y., Yen, M.-H., Wei, C.-W., Chuang, Y.-C., & Young, T.-H. (2005). Crack-free direct-writing on glass using a low-power UV láser in the manufacture of a microfluidic chip. Journal of Micromechanics and Microengineering, 15(6), 1147-1156. doi:10.1088/0960-1317/15/6/005

Chrisey D.B., Hubler G.K., editors, Pulsed Láser Deposition of Thin Films, John Wiley & Sons, New York, 1994.

Gottfried JL, De Lucia FC Jr, Munson CA, Miziolek AW. Láser-induced breakdown spectroscopy for detection of explosives residues: a review of recent advances, challenges, and future prospects. Anal Bioanal Chem. 2009 Sep;395(2):283-300. doi: 10.1007/s00216-009-2802-0. Epub 2009 May 6. PMID: 19418042.

Grill, R., & Gnadenberger, A. (2006). Niobium as mint metal: ProductioŽ properties processing. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 24, 275-282.

Guillemot, F., Prima, F., Tokarev, V. N., Belin, C., Porté-Durrieu, M. C., Gloriant, T., Lazare, S. (2004). Single-pulse KrF láser ablation and nanopatterning in vacuum of β-titanium alloys used in biomedical applications. Applied Physics A, 79(4), 811-813. doi:10.1007/s00339-004-2688-9

György, E., Pérez, A., Pérez Del Pino, A., Serra, P., & Morenza, J. (2004). Influence of the ambient gas in láser structuring of the titanium surface. Surface and Coatings Technology, 187, 245-249. doi:10.1016/j.surfcoat.2004.03.015

Hendow, S. T., & Shakir, S. A. (2010). Structuring materials with nanosecond láser pulses. Optics Express, 18(10), 10188-10199. doi:10.1364/OE.18.010188

Hodgson, J. N. (1962). The optical properties of liquid indium, cadmium, bismuth and antimony. The Philosophical Magazine: A Journal of Theoretical Experimental and Applied Physics, 7(74), 229-236. doi:10.1080/14786436208211857

Kelly, R., & Miotello, A. (1996). Comments on explosive mechanisms of láser sputtering. Applied Surface Science, 96-98, 205-215. doi:https://doi.org/10.1016/0169-4332(95)00481-5

Kirkwood, S. E., Tsui, Y. Y., Fedosejevs, R., Brantov, A. V., & Bychenkov, V. Y. (2009). Experimental and theoretical study of absorption of femtosecond láser pulses in interaction with solid copper targets. Physical Review B, 79(14), 144120. doi:10.1103/PhysRevB.79.144120

Kudryashov, S. I., Tikhov, A. A., & Zvorykin, V. D. (2011). Near-critical nanosecond láser-induced phase explosion on graphite surface. Applied Physics A, 102(2), 493-499. doi:10.1007/s00339-010-5954-z

Laverick, C. (1988). Niobium demand and superconductor applications: An overview. Journal of The Less Common Metals, 139, 107-122.

Lazarus, N., Smith, G. L., & Dickey, M. D. (2019). Self-Folding Metal Origami. Advanced Intelligent Systems, 1(7), 1900059. doi: https://doi.org/10.1002/aisy.201900059

Libenson M N, Romanov G. S. and Imas Y A 1969 Temperature dependence of the optical constants of a metal in heating by láser radiation Sov. Phys.—Tech. Phys. 13 925–7.

Marla, D., Bhandarkar, U. V., & Joshi, S. S. (2014). A model of láser ablation with temperature-dependent material properties, vaporization, phase explosion and plasma shielding. Applied Physics A, 116(1), 273-285. doi:10.1007/s00339-013-8118-0

Nikishina, E. E., Drobot, D. V., & Lebedeva, E. N. (2013). Niobium and tantalum: State of the world market, fields of application, and raw sources. Part I. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 54(6), 446-452. doi:10.3103/S1067821213060187

O Benavides, L de la Cruz May, E B Mejia, J A Ruz Hernandez and A Flores Gil, Láser wavelength effect on nanosecond láser light reflection in ablation of metals, Láser Physics, 26 (2016) 126101 (6pp) doi:10.1088/1054-660X/26/12/126101.

Ocaña, J. L., R, J., & García-Ballesteros, J. J. (2016). Direct generation of superhydrophobic microstructures in metals by UV láser sources in the nanosecond regime. Advanced Optical Technologies, 5. doi: 10.1515/aot-2016-0002

Pedraza, A. J., Fowlkes, J. D., & Guan, Y. F. (2003). Surface nanostructuring of silicon. Applied Physics A, 77(2), 277-284. doi: 10.1007/s00339-003-2113-9

Porneala, C., & Willis, D. (2006). Observation of nanosecond láser-induced phase explosion in aluminum. Applied Physics Letters, 89, 211121-211121. doi:10.1063/1.2393158

Prokhorov A.M., Konov V.I., Ursu I., & Mihailescu I.N., (1990). Láser heating of metals. Briston: Adam Hilger.

Radziemski, L. J., & Cremers, D. A. (1989). Láser-induced plasmas and applications. United States: Marcel Dekker Inc.

Ready J.R, Effects of High-Power Láser Radiation, Academic Press, New York, 1971.

Russo, R. E., Mao, X. L., Borisov, O. V., & Liu, H. (2000). Influence of wavelength on fractionation in láser ablation ICP-MS. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 15(9), 1115-1120. doi: 10.1039/B004243I

Sergei I. Anisimov & Viktor A. Khokhlov. (1995) Instabilities in Láser-Matter Interaction. L.D. Landau Institute for Theoretical Physics. Russian Academy for Science. ISBN: 0-8493-8660-8.

Smith, N. V. (1967). The optical properties of liquid metals. Advances in Physics, 16(64), 629-636. doi: 10.1080/00018736700101735

Ta, DV, Dunn, A, Wasley, TJ et al. (5 more authors) (2015) Nanosecond láser textured superhydrophobic metallic surfaces and their chemical sensing applications. Applied Surface Science, 357. pp. 248-254. ISSN 0169-4332

Tang, G., Hourd, A. C., & Abdolvand, A. (2012). Nanosecond pulsed láser blackening of copper. Applied Physics Letters, 101(23), 231902. doi:10.1063/1.4769215

Tokarev, V. N., Lunney, J. G., Marine, W., & Sentis, M. (1995). Analytical thermal model of ultraviolet láser ablation with single-photon absorption in the plume. Journal of Applied Physics, 78(2), 1241-1246. doi:10.1063/1.360365

Ujihara, K. (1972). Reflectivity of Metals at High Temperatures. Journal of Applied Physics, 43(5), 2376-2383. doi:10.1063/1.1661506

Vorobyev, A. Y., & Guo, C. (2011). Reflection of femtosecond láser light in multipulse ablation of metals. Journal of Applied Physics, 110(4), 043102. doi:10.1063/1.3620898

Vorobyev, A. Y., & Kuz'michev. (1980). Absorption of láser radiation in craters on metal targets. Soviet Journal Quantum Electronics, Vol. 7, 183-186.

Vorobyev, A. Y., Kuzmichev, V. M., Kokody, N. G., Kohns, P., Dai, J., & Guo, C. (2006). Residual thermal effects in Al following single ns- and fs-láser pulse ablation. Applied Physics A, 82(2), 357-362. doi:10.1007/s00339-005-3412-0

Walters, C. T., Barnes, R. H., & Beverly Iii, R. E. (1978). Initiation of láser-supported-detonation (LSD) waves. Journal of Applied Physics, 49(5), 2937-2949. doi:10.1063/1.325181

Wang, Z. B., Hong, M. H., Luk'yanchuk, B. S., Huang, S. M., Wang, Q. F., Shi, L. P., & Chong, T. C. (2004). Parallel nanostructuring of GeSbTe film with particle mask. Applied Physics A, 79(4), 1603-1606. doi:10.1007/s00339-004-2860-2

Weaver, J. H., Lynch, D. W., & Olson, C. G. (1973). Optical Properties of Niobium from 0.1 to 36.4 eV. Physical Review B, 7(10), 4311-4318. doi:10.1103/PhysRevB.7.4311

Wen, S.-B., Mao, X., Greif, R., & Russo, R. E. (2007). Láser ablation induced vapor plume expansion into a background gas. II. Experimental analysis. Journal of Applied Physics, 101(2), 023115. doi:10.1063/1.2431085

Winter, K. M., Kalucki, J., & Koshel, D. (2015). 3 - Process technologies for thermochemical surface engineering. In E. J. Mittemeijer & M. A. J. Somers (Eds.), Thermochemical Surface Engineering of Steels (pp. 141-206). Oxford: Woodhead Publishing.

Wu, B., & Shin, Y. C. (2006). Absorption coefficient of aluminum near the critical point and the consequences on high-power nanosecond láser ablation. Applied Physics Letters, 89(11), 111902. doi:10.1063/1.2352804

Zorba, V., Boukos, N., Zergioti, I., & Fotakis, C. (2008). Ultraviolet femtosecond, picosecond and nanosecond láser microstructuring of silicon: structural and optical properties. Applied Optics, 47(11), 1846-1850. doi:10.1364/AO.47.001846

Capítulo 5 Fotosensibilización como herramienta para la remoción de coliformes totales en agua

Chapter 5 Photosensitization as a tool for the removal of total coliform in water

GARCÍA-LARA, Carlos Manuel†*, NÁJERA-AGUILAR Hugo Alejandro, MARTÍNEZ-SALINAS, Rebeca Isabel y VÁZQUEZ-SÁNCHEZ, Rubén Alejandro

Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Ambiental. Libramiento Norte Poniente 1150, colonia Lajas Maciel, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México

ID 1er Autor: *Carlos Manuel, García-Lara* / **ORC ID:** 0000-0001-5860-266X, **CVU CONACYT ID:** 201783

ID 1er Coautor*: Hugo Alejandro, Nájera-Aguilar* / **ORC ID:** 0000-0002-9337-8242, **CVU CONACYT ID:** 83503

ID 2do Coautor: *Rebeca Isabel, Martínez-Salinas* / **ORC ID:** 0000-0002-2459-1090**, CVU CONACYT ID:** 162919

ID 3er Coautor: *Rubén Alejandro, Vázquez-Sánchez* / **CVU CONACYT ID:** 90602

DOI: 10.35429/H.2021.16.39.47

* carlos.garcia@unicach.mx

S. Figueroa (AA.). Aplicaciones Láser en la Ingeniería. Handbooks-TI-©ECORFAN-Mexico, 2021.

Resumen

En este capítulo se trataron muestras de agua contaminadas con diferentes microorganismos. Para el caso de agua contaminada con Escherichia coli *ATCC 25922*, se obtuvo la inhibición de esta al adicionarle azul de metileno, este resultado fue evaluado para diferentes condiciones de iluminación y presencia de colorante. Para una muestra de agua contaminada con $1x10^6$ UFC mL^{-1} de Escherichia coli enteropatógena (EPEC), evaluada con tres concentraciones diferentes de azul de metileno (0.85, 0.95 y 1.05 Mm) en presencia y ausencia de radiación solar, se determinó una remoción a la salida de $1x10^3$ UFC mL^{-1} en promedio, para la concentración de 1.05 Mm. Por último, se evaluó agua proveniente de una planta de bombeo con alto contenido de coliformes totales, 242 UFC mL^{-1}, mediante la adición de azul de metileno en una primera instancia y añil en otra, obteniéndose eficiencias de remoción de 93.05% y 85.41% respectivamente.

Foto sensibilización; Oxígeno Singulete, Azul de metileno

Abstract

In this chapter water samples contaminated with different microorganisms were treated. For the case of water contaminated with Escherichia coli ATCC 25922, the inhibition of this was obtained by the addition of methylene blue, this result was evaluated for different lighting conditions and presence of dye. For a sample of water contaminated with 1x106 CFU ml-1 of enteropathogenic Escherichia coli (EPEC), evaluated with three different concentrations of methylene blue (0.85, 0.95 and 1.05 Mm) in the presence and absence of solar radiation, an output removal of 1x103 CFU ml-1 on average was founded with 1.05 Mm concentration. Finally, water from a pumping plant with a high content of total coliforms, 242 ml-1 of UFC, was evaluated by adding methylene blue in one first instance and indigo in another, obtaining removal efficiencies of 93.05% and 85.41 % respectively.

Photosensitization, Singlet oxygen, Methylene blue

Introducción

El proceso de fotosensibilización se produce al generar, por absorción de la luz a una longitud de onda determinada, el estado excitado de las moléculas de un colorante llamado sensibilizador. La excitación electrónica del fotosensibilizador en presencia de oxígeno implica la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés) (De Paula et al., 2010). El fotosensibilizador se regenera de manera que actúa como una especie de catalizador, formando a partir de una sola molécula de éste muchas moléculas de oxígeno singulete, tantas veces como el oxígeno y la luz molecular están presentes (Sabbahi et al., 2010).

Entre los fotosensibilizadores más comúnmente utilizados para la generación de oxígeno singulete están la rosa de bengala, azul de metileno, porfirina, entre otros (García, 2010); los fotosensibilizadores pueden iniciar una reacción fotoquímica Tipo I o Tipo II o una combinación de ambos. Las reacciones de tipo I implican la transferencia de electrones o protones desde el estado triplete del fotosensibilizador, lo que lleva a la formación de especies citotóxicas como los radicales superóxido, hidroxilo e hidroperóxido (Hasegawa et al., 2015). En una reacción de Tipo II, se produce una transferencia de energía al estado fundamental del oxígeno molecular, lo que conduce a la producción del oxígeno reactivo singulete (Sabbahi et al., 2010).

De acuerdo con García (2010), entre las aplicaciones más recientes del oxígeno singulete está el desarrollo de procesos de desinfección de aguas, ya que este es susceptible de reaccionar con biomoléculas presentes en la pared celular de microorganismos (los lípidos y proteínas de membrana), lo que conduciría a su inactivación. La inactivación fotodinámica (PDI) es el nombre de un proceso, derivado de la terapia fotodinámica (De Paula et al., 2010); el cual consiste en que un fotosensibilizador es absorbido favorablemente por las bacterias y posteriormente activado por la luz a una longitud de onda específica en presencia de oxígeno reactivo citotóxico, que son tóxicos a especies bacterianas (Fekrazad et al., 2016).

Debido a la inmovilización del fotosensibilizador en el medio pueden ocurrir cambios espectrales que afecten la absorción de luz, generando menos estados excitados y un tiempo de vida del estado excitado corto, por lo que el proceso de transferencia de energía al oxígeno molecular será menos eficiente y, como consecuencia, el rendimiento cuántico de producción de oxígeno singulete será menor que el determinado para el sensibilizador, por otro lado si el oxígeno singulete generado reacciona eficientemente con especies químicas presentes en el medio, llegará un momento en que la concentración de oxígeno molecular en el mismo se agote, por lo que la producción de oxígeno singulete cesa, debido a esto es importante que exista una aireación o reposición del oxígeno. Si la concentración del fotosensibilizador en el medio es muy grande, puede ocasionar que el oxígeno singulete generado sea desactivado por colisiones con el mismo fotosensibilizador que lo está produciendo, lo que disminuye apreciablemente el rendimiento cuántico de producción de oxígeno singulete.

Fotosensibilizadores en tratamiento de aguas

En estudios aplicados en la desinfección del agua, autores como Orellana et al. (2011), utilizaron azul de metileno (AM), logrando con éxito a escala de laboratorio y en una planta piloto experimental, tras 35 min de irradiación solar (0.84 kW/m^2) a efluentes contaminados con Esterichia coli, una disminución de la población microbiana de 4 a 5 órdenes de magnitud. Por otra parte, los autores Sabbahi, Alouini, Ben Ayed, (2010) realizaron un estudio utilizando muestras de efluentes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Charguia, evaluando mediante el método de Número Más Probable (NMP) la presencia de Coliformes termo tolerantes y E. coli. Para la inactivación de bacterias, utilizaron una lámpara 500 watts, tipo halógeno (OSRAM) a 650 nm como fuente de luz, concentraciones de AM desde 5 a 70 µM. Como resultado obtuvieron que a partir de 20 µM de AM se lograba la inactivación de bacterias. Asimismo, después de 2 h, utilizando una concentración de 50 µM de AM, las muestras presentaron una reducción >99% de Coliformes termo tolerantes. Los autores concluyen, que utilizando una concentración de 10 µM seguido de una exposición de 12 horas de luz solar, se puede foto blanquear AM, presentando una eficiencia del 92%.

Asimismo, otro estudio denominado Inactivación fotodinámica de Escherichia coli con AM y verde malaquita bajo luz LED roja, Hasegawa, et al. (2015), prepararon una suspensión estándar de E. coli (ATCC 25922) que contenía 106 UFC mL^{-1} (Unidades Formadores de Colonias) y con los fotosensibilizadores mencionados, irradiaron a longitudes de onda entre 600 y 680 nm, utilizando una concentración de 1000 µmol mL^{-1} de AM, redujeron el 94.6% de E. coli, en contraste con un 90% con el verde malaquita; ambos tras 15 minutos de exposición de irradiación.

Además (De Paula et al., 2010), en su trabajo, un estudio comparativo de los sistemas de irradiación para la foto inactivación de microorganismos. Utilizaron tres fuentes de radiación diferentes, AMS-II (652 nm), LED600 (663 nm) y una lámpara halógena (OSRAM, modelo ENH, 250 W a 675-700 nm), en una cepa que corresponde a Staphylococcus Aureus (ATCC 25923). Prepararon soluciones de AM, a concentraciones de 5x10^{-5}, 5x10^{-6} y 5x10^{-7} mol/dm^3. Irradiaron las muestras de agua durante 20 minutos. La primera fuente de radiación presentó una foto inactivación superior al 99%. Los otros equipos que utilizaron para irradiar también presentaron buenos resultados de foto inactivación, siendo que a la concentración de 5x10^{-5} mol/dm^3 no hubo formación de colonias.

Otro ejemplo, son Orellana et al. (2011), en una planta piloto experimental, como agente sensibilizador el autor utilizó una concentración de 0.7 g/m^3 de AM, a una iluminación de 0.28−0.84 kW/m^2, el tratamiento duró 35 min en el cual removieron Coliformes y E. coli, Enterococcus fecalis, polivirus, con 4 horas de irradiación solar la degradación del agente fotosensibilizador se aproximó al 100%. En un estudio realizado por Rossel et al., (2020), el cual consistió en la desinfección de un influente con Coliformes totales y termo tolerantes con 200 UFC/100 ml, utilizando radiación ultravioleta durante 4 segundos de exposición, eliminando por completo estos microorganismos. Otra investigación hecha por los autores Sabbahi et al. (2010), utilizando un influente con $1.1x10^4$ de Coliformes totales, logrando eliminar el 99% de estos. utilizando una concentración de 50 µM de AM a 2 horas de exposición a la luz. Un estudio similar es el de Gutiérrez et al. (2006), el autor evaluó el tiempo de inactivación de Coliformes totales y fecales utilizando una concentración 0.5011 mg/ml de Dióxido de Titanio (TiO_2), con exposición a radiación solar de 120 minutos, la muestra tenía 3500 NMP/100 ml de coliformes totales, alcanzando una inactivación del 100%. Respecto a los Coliformes termo tolerantes, la radiación es mucho más importante que la temperatura, puesto que estas bacterias resisten incrementos alrededor de 50°C sin causar mortalidades apreciables (Solarte et al., 1997).

En este proyecto se realizaron tres diferentes arreglos experimentales. Caso1. Esterichia coli ATCC 25922 depositadas en cajas Petri y azul de metileno como agente fotosensibilizador, Caso 2. E. colienteropatógena (EPEC) depositado en agua esterilizada, tratada con azul de metileno en el tren de tratamiento. Caso 3. Agua proveniente del rio Grijalva con contenido de Coliformes totales y tratada con azul de metileno y añil como agentes fotosensibilizadores en el tren de tratamiento.

Materiales y métodos

Los colorantes utilizados fueron el azul de metileno o Cloruro de Metiltionina, es un colorante derivado de la fenotiazina, capaz de enlazarse con ácidos nucleicos, es utilizado en terapia fotodinámica de tumores malignos. Se encuentra como cristales de color verde oscuro que tienen la particularidad de ser muy soluble en agua y al hacerlo, la solución se torna color azul. Su fórmula molecular es $C_{16}H_{18}N_3SCl$ y el añil, Indigofera suffruticosa, esta especie produce el colorante, que es propio de tierras tropicales, mide aproximadamente un metro y pertenece al grupo de leguminosas (Contreras, 2010). El índigo de origen vegetal está compuesto por indigotina y una serie de componentes minoritarios, como indirubina, flavonoides, sales inorgánicas, entre otros (Castañeda, 2019). En México, el colorante se obtiene de dos especies de arbustos, y aunque la más importante de ellas también tiene aplicaciones medicinales, alimenticias y cosmetológicas, el uso más conocido y tradicional es el tintóreo (Martínez, 2014). Sin embargo, otras especies de añil se han utilizado en otros países. En este sentido, Ariizumi, manifiesta que los textiles teñidos con índigo tienen actividad bactericida (Citado por Sandoval et al., 2006). Actualmente, se cultiva localmente en algunas partes de la región del Istmo de Tehuantepec en Oaxaca y su importancia ha aumentado ligeramente en los últimos años por la demanda de colorantes naturales (Hanan & Mondragón, 2009).

La espectrofotometría UV-visible es una técnica analítica que permite determinar la concentración de un compuesto en solución. Se basa en que las moléculas absorben las radiaciones electromagnéticas y a su vez que la cantidad de luz absorbida depende de forma lineal de la concentración. Para hacer este tipo de medidas se emplea un espectrofotómetro, en el que se puede seleccionar la longitud de onda de la luz que pasa por una solución y medir la cantidad de luz absorbida por la misma. La absorbancia (A) está relacionada con la muestra, puesto que indica la cantidad de luz absorbida por la misma, se define como el logaritmo de 1/T, en consecuencia:

$$A = -log\left(\frac{I_T}{I_0}\right) \quad (1)$$

Cuando la intensidad incidente (I_0) y transmitida (I_T) son iguales, la transmitancia es del 100% e indica que la muestra no absorbe a una determinada longitud de onda, y entonces A vale log 1 = 0. La cantidad de luz absorbida dependerá de la distancia que recorre está a través de la solución del cromóforo y de la concentración de éste, expresada en la ley de Beer-Lambert

$$A = \varepsilon\, c\, l \quad (2)$$

La cual cumple para soluciones diluidas a concentraciones altas *c*, la constante de proporcionalidad ε varía con la concentración, debido a fenómenos de dispersión de la luz, adición de moléculas, cambios del medio, etc. y a una longitud *l* de desplazamiento a través del material. El pico de absorción de una solución indica la región en la cual esta obtiene una mayor transferencia de energía de los fotones a sus moléculas. Para el azul de metileno se tiene una máxima absorción a una longitud de onda alrededor de los 660 nm, en la región naranja/rojo del espectro UV-Vis, por lo cual es preciso irradiar con una fuente de luz con pico de emisión presente en esta región.

Para la preparación de la dilución del colorante se realizaron los siguientes pasos, en una balanza analítica se midieron los gramos de colorante (soluto) necesarios para las concentraciones deseadas, se depositó en un vaso de precipitado y se le agregó agua destilada, a un volumen determinado para alcanzar la concentración deseada y por último, se homogenizó la solución y se almacenó en un recipiente de color ámbar bajo refrigeración. La muestra es viable de 2 a 3 meses en esas condiciones.

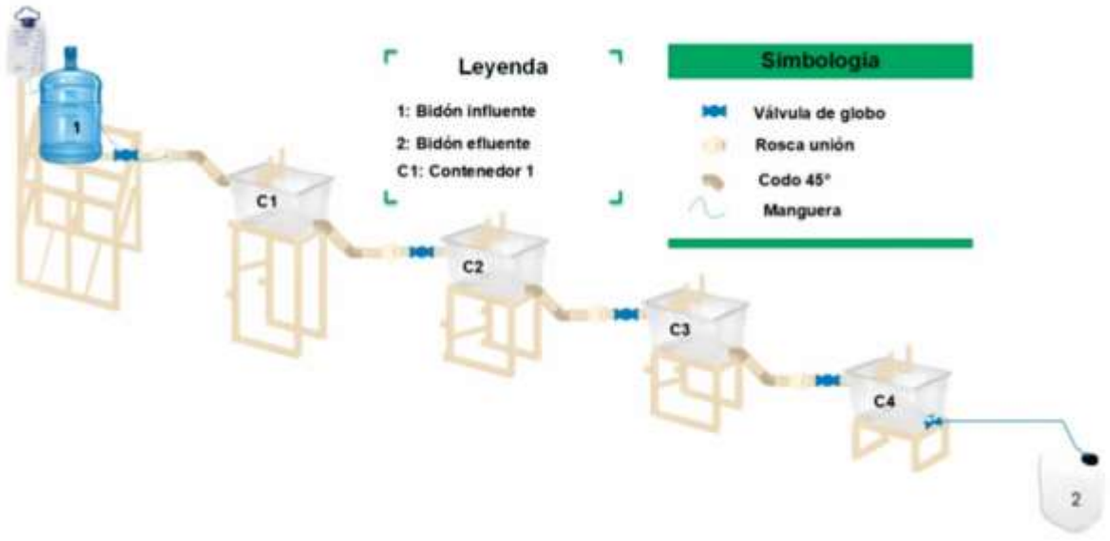
Inactivación de coliformes totales y bacterias

Para evaluar la efectividad de inactivación empleando el azul de metileno o añil como agente fotosensibilizador, se observaron las siguientes condiciones, como fuente de iluminación para la excitación del colorante se empleó la luz solar, debido a que es capaz de generar la fotosensibilización (Cooper & Goswami , 2002), por el amplio espectro que presenta, además de ser una fuente natural, limpia, y con la capacidad de aportar altas cantidades de energía en poco tiempo; se utilizaron concentraciones de colorante desde 0.85 mM; se expuso la muestra desde 25 minutos hasta 75 minutos de irradiación solar y para corroborar el efecto de inactivación se realizó el conteo de bacterias del influente y efluente. Las alícuotas tomadas para cada repetición fue empleando un Asa bacteriológica calibrada de 10 uL según las especificaciones de producción.

Tren de tratamiento

Orellana (2005) realizó el experimento de foto inactivación mediada por O_2, en una planta piloto experimental, que consistía en un tren de tratamiento con material de acero galvanizado, en este trabajo se utilizó una estructura asequible en términos de costo y disponibilidad de materiales, se construyó con tubos de CPVC de media pulgada de diámetro, que funcionó como la base del sistema.

Figura 1. Tren de tratamiento utilizado con dosificador de colorante y control de tiempo de retención hidráulico



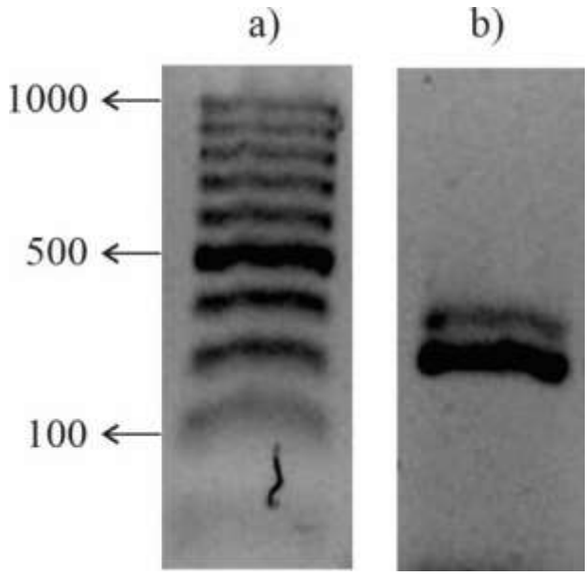
En la figura 1 se muestra el diagrama del tren de tratamiento. El arreglo tiene como entrada un bidón (1) con una capacidad de 19 litros, que funcionó como almacenamiento para el influente; seguido de cuatro contenedores, con capacidad de almacenar un volumen de 3.5 litros cada uno, conectados entre sí con tubos de CPVC de media pulgada. Para regular el caudal se utilizaron cuatro válvulas de globo de ½ pulgada; se colocaron a partir del bidón 1 y Contenedor 1 (C1), y entre cada unión de contenedores (C1, C2, C3 y C4). Para la salida del agua del último contendor se utilizó un micro gotero conectado a una manguera con equipo para venoclisis, mismo que se encargó de conducir el agua hasta el bidón de salida (2), el cual se utilizó como almacenamiento del agua tratada. Para el colorante se colocó una bolsa para enema (Industrias Plásticas Médicas, IPM) con una capacidad de 1000 ml conectada al tren de tratamiento, lo cual permitió su dilución con el agua.

Características genotípicas de Escherichia coli enteropatógena (EPEC)

La Escherichia coli es una bacteria Gram negativa que pertenece a la familia Enterobacteriaceae de la tribu Escherichia (Bergey, 1994). Entre algunos de sus múltiples atributos se sabe que es el principal anaerobio facultativo de la flora normal microbiana del colon humano, en donde participa de manera importante en el control fisiológico. Típicamente E. coli coloniza el tracto gastrointestinal de los recién nacidos dentro de sus primeras horas y permanece ahí durante toda la vida en simbiosis con su huésped humano (Vidal-Graniel, 2003).

La EPEC, denominada así para diferenciar a este tipo virulento de las bacterias de flora norma, es una bacteria causante principales de diarrea en niños menores de dos años en países en vías de desarrollo. La principal característica histopatológica de la infección es una lesión que induce la EPEC en el intestino conocida como la lesión A/E (adherencia y eliminación).

Figura 2 Genes eaeA y bfpA (384 y 324 pares de bases [pb], respectivamente) de E. coli enteropatógena (EPEC) amplificados mediante la reacción en cadena de lapolimerasa. a) MPM (100 pb); b), genes eaeAy bfpA en la cepa prototipo E. coli enteropatógena E2348/69



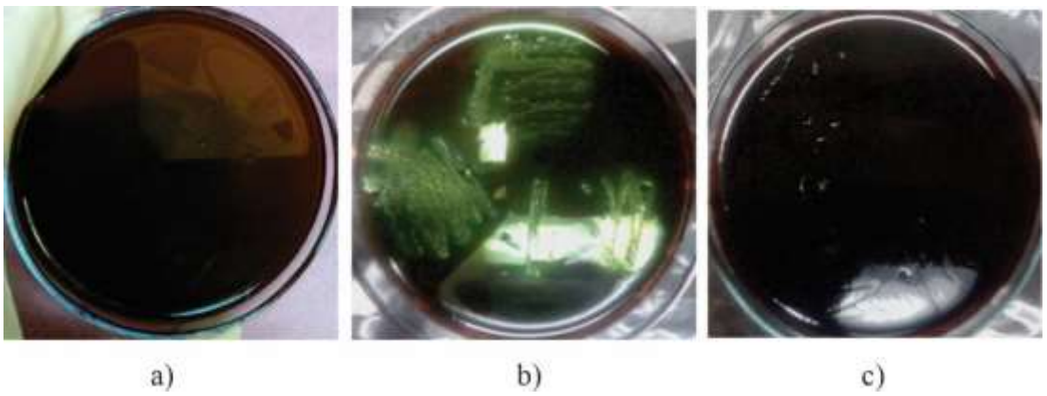
En la figura 2 se aprecian los genes que distinguen a la bacteria utilizada para los ensayos, eaeA y bfpA (384 y324 pares de bases, respectivamente), que codifican para las proteínas intimina y pili formador de rizos de esta bacteria. Ambas proteínas tienen papeles relevantes para que esta bacteria cause daño al intestino humano y de animales. Este reconocimiento se realizó mediante el análisis genético, donde se encuentran estos dos genes típicos (cada banda representa a un gen).

Resultados

Caso1. Fotosensibilización para la remoción de Esterichia coli ATCC 25922

Se realizaron ensayos en cajas de Petri, utilizando un asa de 10uL con la alícuota la cual se depositaron muestras en un agar estándar Luria Bertani (LB), se utilizó este agar ya que proporciona los nutrimentos necesarios para el crecimiento de una amplia variedad de microorganismos, entre estos, la cepa de *E. Coli ATCC 25922* utilizada en el ensayo, colocando muestras en completa oscuridad (grupo testigo), muestras irradiadas con luz solar (grupo de control) y muestras con azul de metileno (AM) expuestas de igual manera a luz solar (grupo experimental) para observar el efecto de fotosensibilización del AM sobre las bacterias.

Figura 3 Imágenes de los resultados observados sobre los ensayos realizados: a) (grupo testigo, b) grupo de control y c) grupo experimental



En la figura 3, se presentan imágenes siendo a) muestras del grupo testigo, como se esperaba, no presentaron inactivación. Lo que realza el hecho de la necesidad de una fuente de luz para activar el efecto de fotosensibilización, b) sobre el grupo de control, se realizaron ensayos con irradiación solar de 1 minuto, observando crecimiento bacteriano lo que demuestra la ausencia de efecto de oxidación generado por el fotosensibilizador y c) para el grupo experimental, se observó ausencia de crecimiento, con esto se infiere que un minuto de exposición solar es suficiente para llevar a cabo el proceso de fotosensibilización del AM sobre las muestras.

Caso 2. Fotosensibilización para la remoción de E. coli enteropatógena (EPEC)

Se utilizó el tren de tratamiento descrito en la figura 1, empleando ensayos de 10 litros de agua esterilizada a la cual se le agregaron $1x10^6$ unidades de EPEC y mediante un dosificador se agregaron dosis desde 0.85 hasta 1.05Mm de azul de metileno, exponiéndose a la luz solar durante 25 minutos. Luego de tratar el agua contaminada con E. coli enteropatógena con azul de metileno, divididas en muestras expuestas a la luz solar (R) y no expuestas a está (SR), se observó una reducción significativa en la cantidad de Unidades formadoras de colonias (UFC) de esta bacteria (Tabla 1). En la Tabla 1, muestra la cantidad de E. coli enteropatógena (UFC mL^{-1}) determinada por cada tratamiento. Las determinaciones se hicieron por duplicado, la última columna muestra el valor de p calculado mediante la prueba t de Student para muestras independientes. Se observó, además que el tratamiento realizado a una concentración de azul de metileno de 1.05 Mm presentó los mejores resultados, con una remoción de tres órdenes de magnitud, disminuyendo de $1x10^6$ UFC mL^{-1} que se tiene a la entrada hasta $1x10^3$ UFC mL^{-1} en promedio, obteniendo en uno de los casos hasta $1x10^2$ UFC mL^{-1}.

Tabla 1 Cuantificación de E. coli enteropatógena bajo diferentes tratamientos

Azul de metileno	Condición	E. Colienteropatógena Log (UFC mL^{-1})	Valor de p
Mi	SR	6.09	0.003
Mi	SR	5.90	
0	SR	6.08	
0	SR	5.81	
0.85	SR	5.93	
0.85	SR	5.57	
0.95	SR	6.13	
0.95	SR	5.60	
1.05	SR	6.21	
1.05	SR	5.04	
Media		5.8360 (±0.35)	
Mi	R	5.64	
Mi	R	5.82	
0	R	5.23	
0	R	5.41	
0.85	R	3.36	
0.85	R	3.95	
0.95	R	2.70	
0.95	R	3.65	
1.05	R	1.70	
1.05	R	3.40	
Media	R	4.0860 (±1.38)	

La prueba de Shapiro-Wilk reveló que la muestra tuvo un comportamiento normal ($p>0.05$; tabla 2).

Tabla 2 Pruebas de normalidad de los tratamientos del agua

	Cond	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
E. coli	R	0.928	10	0.428
	SR	0.881	10	0.132

Estos resultados demuestran el alcance de emplear este novedoso método para desinfectar el agua bajo condiciones controladas en laboratorio.

Caso 3. Fotosensibilización para la remoción de coliformes totales

Para la preparación de la solución, se utilizó AM en solución alcohólica al 1% de 500 ml de la marca LABESSA y añil. Para la medición de absorbancia se utilizó un espectrómetro de fibra óptica Ocean Optics Inc. USB4000 y el software Spectra Suite. Se utilizó la longitud de onda de 625 nm para determinar la concentración del colorante.

Influente: El agua fue extraída de la planta de bombeo Culati, ubicada en localidad de Chiapa de Corzo, con coordenadas 16°41'35.65" N y 93°00'33.46" W. Para el primer tratamiento (azul de metileno) se colectó 10 litros y para el segundo tratamiento (añil) se colectó 20 litros de agua y se tomó una muestra en una bolsa estéril de 500 ml seguido del protocolo que establece la NMX-AA-042-SCFI-2015.

Efluente: Se colectó el agua tratada a la salida del tren de tratamiento en una bolsa estéril de 500 ml seguido del protocolo que establece en la NMX-AA-042-SCFI-2015. En ambos casos (influente y efluente) durante el traslado de las muestras de agua al laboratorio correspondiente, se mantuvieron a una temperatura alrededor de 4 °C ± 2 °C.

El primer ensayo fue realizado con un tiempo de exposición de 75 minutos, a una radiación solar promedio de 533.75 W/m^2 (datos obtenidos del Servicio Meteorológico Nacional, SMN). Se utilizó la concentración de 248.46 mg/ml de AM aplicado para la desinfección de 12 litros de agua a un caudal de $2.66x10^{-6}$ m^3/s. Se determinó para el influente un total de 24200 UFC/100 ml, mientras que para el efluente se redujo a 1680 UFC/100 ml de coliformes totales, obteniéndose una eficiencia de remoción del 93.05%. Dichos análisis fueron desarrollados por el método sustrato cromogénico.

En el segundo ensayo se utilizó añil como fotosensibilizador, a una concentración de 0.2 mg/ml, expuesto durante 65 minutos a una radiación solar de 741.18 W/m^2. Durante ese tiempo se aplicó el tratamiento para 8.5 litros de agua, teniendo $2.17x10^{-6}$ m^3/s de caudal. Los resultados del influente tuvieron un valor de 24000 NMP/ml de organismos de Coliformes totales (Número Más Probable). Después del tratamiento, se logró reducir hasta 3500 NMP/100 ml, obteniendo una eficiencia de remoción del 85.41%. estas mediciones se realizaron según la metodología de la NOM-112-SSA1-1994 para la determinación de bacterias Coliformes con la Técnica de Número Más Probable.

Los resultados del influente y efluente del tratamiento se comparan al límite permisible para la ausencia o no detectable, referente a organismos Coliformes totales, establecido en la NOM-127-SSA1-1994. Aunque, la turbidez y los sólidos no se evaluaron en este estudio, cabe mencionar que en ambos tratamientos se presenciaron sólidos y después de 20 minutos se sedimentaron en el recipiente 1 y en los primeros 3 contenedores.

Conclusiones

La concentración de AM con mayor absorción se presentó en 1 mM a un flujo de energía de 5 J/cm^2. Las pruebas realizadas a distintos volúmenes de solución, definieron que la absorbancia de energía con respecto al volumen presenta cierto límite, en el cual se puede definir que en un volumen muy bajo el medio se satura de luz lo que provoca la inhibición en la generación de reactivos de oxígeno, así como también el mismo efecto de producción se ve afectado en volúmenes elevados. Los resultados obtenidos determinaron una alta relación entre la concentración del fotosensibilizador y la energía absorbida en un determinado tiempo para la producción de los reactivos de oxígeno. Empleando la luz solar como fuente de energía, se demostró que se obtiene la inhibición de bacterias E. coli ATCC225, EPEC y coliformes totales. La inhibición de coliformes totales aplicando azul de metileno como agente sensibilizador a una longitud de onda de 620 nm-a 630 nm fue efectivo, alcanzando una reducción de 93.05%, aunque este resultado no se encuentra dentro del límite establecido por la NOM-127-SSA1-1994. Esta baja eficiencia pudo ser ocasionada por la dosis aplicada (248.46 mg/ml) del fotosensibilizador, considerada alta, en comparación a dosis que otros autores han reportado.

El empleo de un colorante natural como el añil, resultó ser efectivo como agente sensibilizador. Ya que no existe antecedente de su empleo en el tratamiento de aguas. Presentó 85.04% de remoción de organismos de Coliformes totales. Se considera que debido a que el colorante se obtiene de la planta del Xiquilete mediante procesos tradicionales, dichos procesos de producción perjudican en menor medida al medio ambiente en contraste al empleo de un colorante como el azul de metileno.

Referencias

Bergey, DH., and J G. Holt. (1994). Bergey's manual of determinative bacteriology, 9th ed, Baltimore Williams & Wilkins.

Castañeda, M. (2019). El índigo en la pintura de caballete novohispana: mecanismos de deterioro. Intervención, Revista Internacional de Conservación, Restauración y Museología, 10(19), 25–35.

Contreras Sánchez, A. (2014). Biodiversidad perdida: el caso de los colorantes, Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán, Uso de la flora y fauna silvestre, 368-372.

Cooper, A. T., & Goswami, D. Y. (2002). Evaluation of methylene blue and rose bengal for dye sensitized solar water treatment. *J. Sol. Energy Eng.*, *124*(3), 305-310.

De Paula, L., Santos, R., Menezes, H., De Britto, J., Vieira, J., Gontijo, P., & De Oliveiraa, C. (2010). A comparative study of irradiation systems for photoinactivation of microorganisms. Journal of the Brazilian Chemical Society, 21(4), 694–700.

Fekrazad, R., Zare, H., & Vand, S. M. S. (2016). Photodynamic therapy effect on cell growth inhibition induced by Radachlorin and toluidine blue O on Staphylococcus aureus and Escherichia coli: An in vitro study. Photodiagnosis and Photodynamic Therapy, 15, 213–217.

García, D. (2010). Generación fotosensibilizada de oxígeno singlete. Tecnia, 20(1), 5–11.

Gutiérrez, C., Robles, L., Ortiz, F., & Martínez, L. (2006). Desinfección fotocatalítica del agua para consumo humano usando luz solar y dióxido de titanio (TiO2) inmovilizado. Centro de Estudios Académicos sobre Contaminación Ambiental.

Hanan, A. M., & Mondragón, J. (2009). Indigofera suffruticosa. Ficha Informativa: CONABIO.

Hasegawa, G., Lopes, J., Soares, M., & Freitas, A. (2015). Photodynamic inactivation of Escherichia coli by methylene blue and malachite green under red LED light. Revista Ambiente e Agua, 9(3), 445–458.

Martínez, S. I. (2014). Azul maya un colorante natural. La Ciencia y El Hombre, 27(1), 40–42.

Orellana, G., Villén, L., & Emilia, M. (2011). Desinfección mediante fotosensibilizadores: principios básicos. Solar Safe Water, 15(sección 4), 243– 258.

Rossel, L., Ferro, F., Ferro, A. L., & Zapana, R. (2020). Radiación ultravioleta-c para desinfección bacteriana (coliformes totales y termotolerantes) en el tratamiento de agua potable. Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research, 22(1), 68–77.

Sabbahi, S., Alouini, Z., Ben, L., & Jemli, M. (2010). Inactivation of faecal bacteria in wastewater by methylene blue and visible light. Desalination and Water Treatment, 20, 209–219.

Sandoval, F., Gschaedler, A., Vilarem, G., & Méndez, C. (2006). Efecto del tiempo 74 de cosecha sobre la producción de colorantes en Indigofera suffruticosa Mill. Agrociencia, 40(5), 585–591.

Solarte, Y., Salas, M. L., Sommer, B., Dierolf, C., & Wegelin, M. (1997). Uso de la radiación solar (UV-A y temperatura) en la inactivación del Vibrio Cholerae en agua para consumo humano. Factores que condicionan la eficiencia del proceso. ColombiaMédica, 28(3), 109–112.

Vidal-Graniel, Jorge E. (2003). Escherichia coli enteropatógena (EPEC): Una causa frecuente de diarrea infantil Salud en Tabasco, vol. 9, núm. 1, abril, 2003, pp. 188-193.

Capítulo 6 Desarrollo de software educativo para óptica

Chapter 6 Development of educational software for Optics

CALVILLO-VAZQUEZ, Ángel E[1*], PÉREZ-CORTÉS, Mario[2], PONCE DE LEÓN, Yenisey[1] e IBARRA-TORRES, Juan Carlos[3]

[1]Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Avenida Francisco J. Mújica s/n, Col. Felícitas del Río, C.P. 58060 Morelia Michoacán, México.
[2]Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería, Avenida Industrias no contaminantes x anillo periférico norte s/n, C.P. 97000, Mérida Yucatán, México.
[3] Universidad de Guadalajara, Blvd. Marcelino García Barragán 1421, C.P. 44830, Guadalajara Jalisco, México.

ID 1er Autor: *Ángel E., Calvillo Vazquez* / **CVU-CONACYT ID:** 1017182

ID 1er Coautor: *Mario, Pérez-Cortés* / **ORC ID:** 0000-0003-0281-4449, **CUV CONACYT ID:** 121168

ID 2do Coautor: *Yenisey, Ponce de León* /**ORC ID:** 0000-0001-9036-653X, **CVU CONACYT ID:** 212322

ID 3er Coautor: *Juan Carlos, Ibarra-Torres* / **ORC ID:** 0000-0003-1042-6219, **CVU CONACYT ID:** 121864

DOI: 10.35429/H.2021.16.48.57

A. Calvillo, M. Pérez, Y. Ponce De León y J. Ibarra

*mauricio.ortiz@umich.mx

S. Figueroa (AA.). Aplicaciones Láser en la Ingeniería. Handbooks-TI-©ECORFAN-Mexico, 2021.

Resumen

Una de las aplicaciones más novedosas en el área de la óptica es la generación de hologramas que se producen por la interferencia de dos haces de luz provenientes de una fuente; uno de estos haces, llamado haz objeto, contiene la información del objeto, mientras que el otro haz, llamado haz de referencia, incide directamente en el material fotosensible donde se graba el holograma. Existen hologramas en 3D y hologramas bidimensionales, estos últimos se generan utilizando como objeto una transparencia en dos dimensiones y su transformada de Fourier por lo que denominan hologramas de Fourier. La realización de un holograma de Fourier es un experimento que permite la demostración de tres conceptos fundamentales en la enseñanza de la óptica universitaria como lo son: la transformada de Fourier, la interferencia y la difracción, por lo que crear un holograma es muy ilustrativo para los estudiantes a fin de que comprendan estos conceptos de mejor forma. Grabar un holograma es un proceso delicado, costoso y arduo, por lo que en este trabajo presentamos un video animado de la creación de hologramas de Fourier realizado con el programa de animación 3D Blender, una simulación numérica basada en el programa Matlab y la pantalla de cristal líquido (LCD) de un proyector.

Hologramas de Fourier, Interferencia, Difracción, Simulación 3D

Abstract

One of the newest applications in the area of optics is the generation of holograms that are produced by the interference of two light beams emitted by a source; one of these beams, called the object beam, contains the information about the object, while the other beam, called the reference beam, travels directly into the photosensitive material where the hologram is recorded. There are 3D holograms and two-dimensional holograms, the latter are generated using a two-dimensional transparency as an object and its Fourier transform, which is why they are called Fourier holograms. The realization of a Fourier hologram is an experiment that allows the demonstration of three fundamental concepts in the teaching of optics such as: Fourier transforms, interference and diffraction, so creating a hologram is very illustrative for students to better understand these concepts. Recording a hologram is a delicate, expensive and arduous process, so in this work we present an animated video of the creation of Fourier holograms made in the 3D animation program Blender, a numerical simulation based on Matlab and the liquid crystal display of a projector.

Fourier holograms, Interference, Diffraction, 3D simulation

1. Introducción

La palabra “holografía” viene del griego “holos” que significa completo y “graphos” que significa escritura por lo que se puede entender a la holografía como la escritura del todo o una fotografía completa de una escena. La holografía fue inventada por Dennis Gabor en 1948 (Gabor, 1949) por lo que en 1971 le otorgaron el Premio Nobel (The Novel Prize, 1971). El invento de Gabor consiste en un proceso fotográfico de dos pasos en el que primero se registra en un material fotosensible un patrón de interferencia que se produce por la superposición de dos ondas de luz, una de las cuales proviene de un objeto real y la otra proviene directamente de la fuente de luz; el segundo paso a que hace referencia el proceso de Gabor consiste en la reconstrucción del holograma y para ello se hacer pasar un haz de luz por el patrón de interferencia grabado y en una pantalla distante se puede observar la imagen de objeto registrado. Aunque a Gabor se le atribuye el invento de los hologramas, no fue hasta después de la invención del laser que se pudieron mejorar las imágenes holográficas gracias al trabajo de Leith y Upatnicks en 1961 (Leith and Upatnicks, 1962).

En 1966 Lohmann y Lawrence (Goodman and Lawrence, 1967) inventaron los hologramas generados por computadora, que consisten en procesos computacionales de simulación tanto de la superposición de las ondas como la reconstrucción de los hologramas. Los materiales fotosensibles en los que se pueden registrar los hologramas son gelatinas dicromatadas, cristales fotorefractivos, fotopolímeros y los más usuales son los materiales basados en haluros de plata (Ortiz-Gutiérrez, 2016). También es posible utilizar sensores semiconductores como las cámaras de carga acoplada (CCD´s por sus siglas en inglés) para registrar los patrones de interferencia que son almacenados en computadoras y visualizadas en pantallas de cristal líquido (LCD´s) (Schnars and Jüptner, 1994).

Existen diferentes clasificaciones de los hologramas de acuerdo a como se produce la interferencia que generan las ondas de luz. Altamirano Aguilar (Altamirano – Aguilar, 2004) clasifica a los hologramas de acuerdo a la posición que ocupa el medio de registro o material fotosensible en el arreglo óptico que genera la interferencia, estos pueden ser de a) Gabor y b) De Leith y Upatnicks. Sin embargo también propone otros tipos de hologramas como Hologramas de imagen enfocada, de Fourier con lente, de Fourier sin lente, de Fraunhoffer, y de Benton (conocidos como hologramas arcoíris). Vacca en (Vacca, 2001) hace una clasificación de los hologramas de acuerdo a la forma en que son reconstruidos y esta es: a) de relieve, b) de transmisión, c) de reflexión, d) estereogramas integrales y e) pulsados. Otra característica importante para clasificar los hologramas es el espesor de la emulsión del material fotosensible donde se registra el patrón de interferencia comparado con el periodo de las franjas de interferencia. De acuerdo a éste parámetro se pueden clasificar en hologramas delgados y gruesos (Ackermann and Eichler, 2007).

Los hologramas de Fourier se generan mediante la interferencia de un haz de referencia y un haz que corresponde a la transformada de Fourier de un objeto bidimensional. Esto se puede realizar en laboratorio usando un arreglo óptico especializado y delicado. En la algunas de las instituciones de educación superior no es posible contar con este tipo de equipo especializado por lo que se propone en este trabajo, la creación de un entorno digital para que los estudiantes puedan elaborar sus propios hologramas de Fourier, entender el proceso físico y el proceso experimental para obtener sus propios hologramas. El arreglo experimental se hizo en Blender donde se puede apreciar el equipo que se utiliza, su correcta posición y de manera clara se expone su funcionamiento. Para la parte física se utiliza el entorno de Matlab para generar una interfase GUI en la que el estudiante puede introducir sus imágenes y obtener su holograma. Para la reconstrucción de los hologramas se utilizó una pantalla de cristal líquido (LCD) que se extrajo de un proyector digital y se conectó a una computadora; con un láser que pasa a través de la LCD se obtuvieron las imágenes holográficas.

2. Registro y reconstrucción de hologramas

Para crear un holograma es necesario que el haz de luz empleado cumpla las condiciones establecidas por Fresnel – Arago que son: el haz debe ser coherente, monocromático y linealmente polarizado (Hecht, 2000). Estos requisitos se cumplen fácilmente por la luz proveniente de un láser, que por sus características permite generar hologramas. Además, se debe contar con una superficie de trabajo con estabilidad mecánica, pues cualquier vibración externa impedirá que se registren imágenes holográficas.

Como se mencionó anteriormente, para grabar un holograma se requiere la interferencia de dos haces de luz, uno llamado haz objeto O, proviene del objeto que se analiza y el otro haz, llamado haz de referencia R, proviene directamente de la fuente de luz. Sean estas ondas de luz dadas por las ecuaciones (1) y (2)

$$O(\vec{r}) = A_1 \exp\left[\mathrm{i}\left(\overrightarrow{k_1} \cdot \vec{r}\right)\right], \tag{1}$$

$$R(\vec{r}) = A_2 \exp\left[\mathrm{i}\left(\overrightarrow{k_2} \cdot \vec{r}\right)\right], \tag{2}$$

donde A_1 y A_2 son las amplitudes y $\overrightarrow{k_1}$ y $\overrightarrow{k_2}$ son los vectores de propagación de los haces objeto y referencia respectivamente; y además $\vec{r}$ =(x,y,z) es el vector posición.

Estos haces se superponen un punto P en el espacio donde se coloca un material fotosensible, tal como se muestra en la figura 1. En el punto P se tiene entonces que el campo óptico, u, está dado por

$$u(\vec{r}) = O(\vec{r}) + R(\vec{r}), \tag{3}$$

Sin embargo, los materiales utilizados para el registro holográfico únicamente graban la intensidad o irradiancia I, por lo que entonces se tiene

$$I(\vec{r}) = |O(\vec{r}) + R(\vec{r})|^2 . \tag{4}$$

Desarrollando el cuadrado se tiene

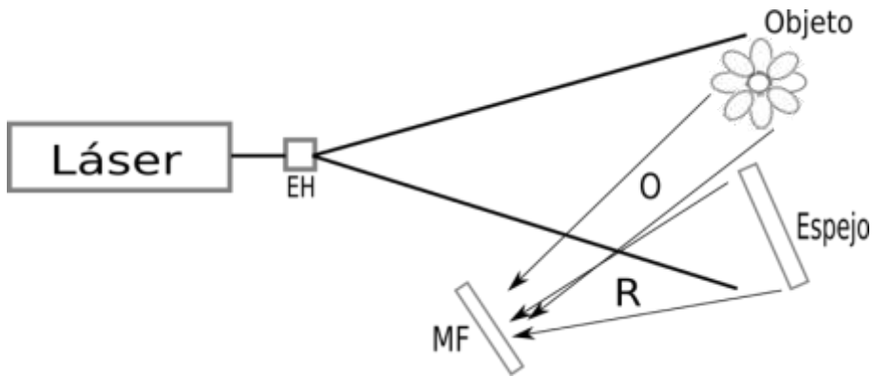
$$I(\vec{r}) = |O(\vec{r})|^2 + |R(\vec{r})|^2 + O^*(\vec{r})R(\vec{r}) + R^*(\vec{r})O(\vec{r}) \quad , \tag{5}$$

Sustituyendo las ecs. (1) y (2) y reduciendo términos se obtiene

$$I(\vec{r}) = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2cos\left[\left(\vec{k}_2 - \vec{k}_1\right)\cdot\vec{r}\right] \quad . \tag{6}$$

Se puede ver que los dos primeros términos de la ec. (6) dependen únicamente de las amplitudes de las ondas (ecs. (1) y (2)), mientras que el tercer término depende de la diferencia de fase entre las dos ondas. Este es el término de interferencia que se registra en un holograma, por lo que se demuestra entonces, que en un holograma se registra información tanto de la diferencia de fase entre las dos ondas como de las amplitudes de los haces.

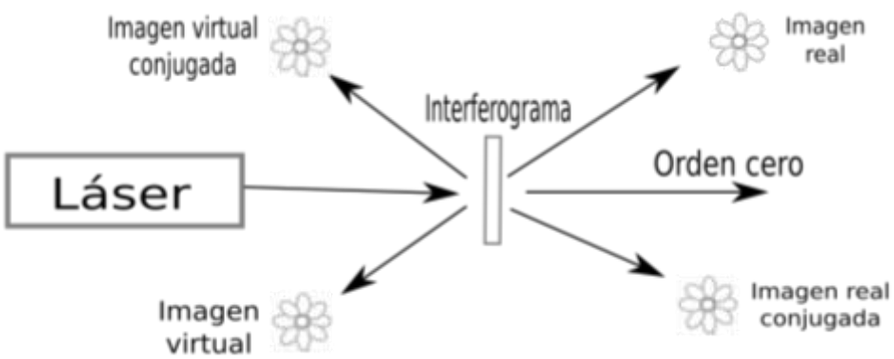
Figura 1 Esquema para el registro de hologramas. EH: Expansor de haz, O: Haz objeto; R: Haz de referencia; MF: Material fotosensible



Fuente: Elaboración Propia

Para la reconstrucción de los hologramas, se ilumina el patrón de interferencia registrado con el mismo haz de referencia utilizado durante el proceso de grabado. Este patrón de interferencia actúa como elemento difractivo por lo que el haz que pasa por éste se difracta y se desvía de su trayectoria rectilínea formando dos imágenes, una imagen real del objeto y una imagen virtual del lado donde incide el haz de luz. También se forman las imágenes conjugadas, tal como se muestra en la figura 2.

Figura 2 Esquema para la reconstrucción de hologramas



Fuente: Elaboración Propia

El proceso matemático para la reconstrucción consiste, como ya se mencionó, en iluminar el holograma o patrón de interferencia registrado en el material fotosensible por la misma onda de referencia utilizada durante el proceso de grabado, por lo que entonces se tiene de la ec. (5)

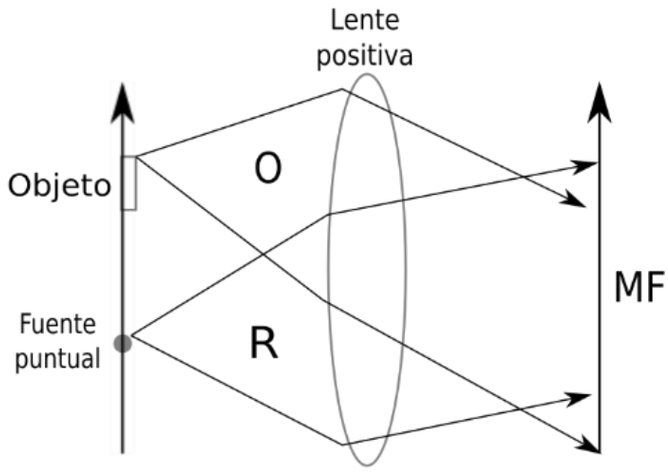
$$I(\vec{r})R(\vec{r}) = |O(\vec{r})|^2R(\vec{r}) + |R(\vec{r})|^2R(\vec{r}) + O^*(\vec{r})R^2(\vec{r}) + O(\vec{r}) \quad , \tag{7}$$

Como puede observarse de la ec. (7) el cuarto término es el haz que tiene la información del objeto, el tercer término tiene la información de la imagen conjugada y los dos primeros términos forman el haz central que no tiene información relevante y forman el orden +1 de difracción.

3. Hologramas de Fourier

Los hologramas de Fourier son un tipo de hologramas que utilizan como haz objeto un haz de luz que tenga la información de la transformada de Fourier del objeto analizado. El esquema para obtener un holograma de Fourier se muestra en la figura 3.

Figura 3 Esquema para generar un holograma de Fourier. O: Haz objeto; R: haz de referencia; MF: Material fotosensible



Fuente: Elaboración Propia

Para el caso de los hologramas de Fourier se utiliza también como haz de referencia una onda plana que se puede interpretar como la transformada de Fourier de una fuente puntual representada como una función delta. Es decir, el haz de referencia está dado por

$$R(\vec{r}) = Aexp(i2\pi vax) = \mathcal{F}[\delta(x-a)] \ , \tag{8}$$

donde A es la amplitud de la onda, υ=1/λ es la frecuencia espacial y λ es la longitud de onda; a es la distancia entre el objeto y la fuente puntual y la transformada de Fourier se representa por el símbolo $\mathcal{F}$. Similarmente, el haz objeto O se puede representar por la transformada de Fourier de la función de transmitancia f(x,y) del objeto. Es decir

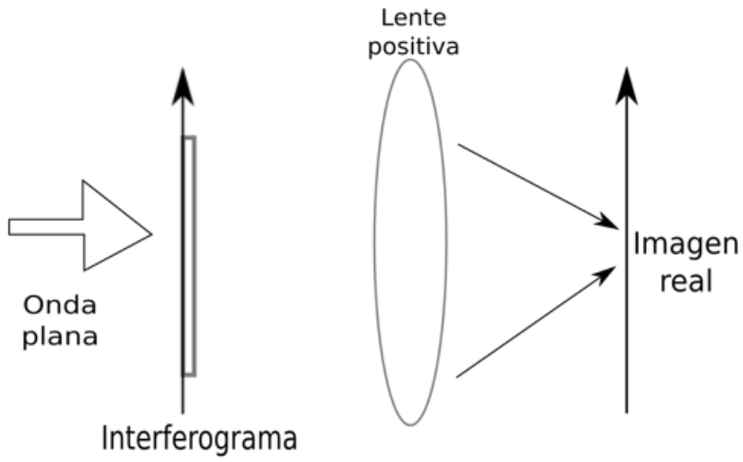
$$O(\vec{r}) = \mathcal{F}[f(x,y)] \tag{9}$$

El patrón de interferencia que se genera debido a la superposición de los haces de referencia y objeto es similar a la ec. (5). Para la reconstrucción se sigue el procedimiento mencionado anteriormente y queda expresado por la ec. (7) que explícitamente se puede escribir como

$$IR = R|\mathcal{F}[f(x,y)]\,|^2 + RA + RAexp(i2\pi va)\mathcal{F}^*[f(x,y)] + RAexp(-i2\pi va)\mathcal{F}[f(x,y)], \tag{10}$$

Donde nuevamente el símbolo * denota el complejo conjugado. Como puede observarse de la ec. (10), el cuarto término es la transformada de Fourier del objeto y el tercer término es la transformada de Fourier conjugada del objeto; por lo que ahora los objetos que se reconstruyen se pueden observar si se coloca una lente positiva (convergente) de distancia focal f separada la distancia f del interferograma, tal como se muestra en la figura 4.

Figura 4 Esquema para la reconstrucción del holograma de Fourier



Fuente: Elaboración Propia

4. Hologramas generados por computadora

Un holograma generado por computadora (HGC) consiste en realizar todo el procedimiento matemático envuelto en la formación de los hologramas en una computadora y transferir esos resultados a una transparencia o a un display controlado por computadora. Los primeros HGC utilizaban como dispositivo de salida un papel transparente en el cual se imprimía el interferograma calculado. Ahora con los avances de la tecnología este proceso puede hacerse en tiempo real si se utiliza una pantalla de cristal líquido (LCD) como se verá en la sección siguiente.

La ventaja de los HGC es que se pueden crear imágenes que nunca han existido en el mundo real y no se necesita equipo de laboratorio para su realización. Estos HGC están limitados por el proceso computacional durante su elaboración. Los HGC pueden ser de Fourier, Fresnel u otros tipos. En este trabajo se utilizaron los hologramas de Fourier y para crearlos se utilizó el siguiente procedimiento (Vijayakumar, et al, 2012).

1. El haz objeto es representado digitalmente como la imagen de la figura que se desea analizar almacenada en una matriz de mxn elementos.
2. El haz de referencia es una función delta de Dirac que digitalmente puede ser considerado como una matriz de mxn elementos cuyo valor es cero excepto el elemento central (m/2,n/2) cuyo valor es 1.
3. La propagación de los haces objeto y referencia se realiza mediante la transformada de Fourier de las matrices generadas en los puntos 1 y 2.
4. El patrón de interferencia se obtiene calculando digitalmente el cuadrado del valor absoluto de la suma de las transformadas de Fourier obtenidas en el punto 3.
5. La reconstrucción digital se hace mediante la transformada inversa de Fourier del patrón de interferencia generado en el punto 4.

Se puede generar la imagen holográfica mediante un arreglo óptico y para ello es necesario imprimir en una transparencia el patrón de interferencia generado en el punto 4, iluminarlo con una onda plana proveniente de un láser y colocando una lente convergente a la distancia focal de la transparencia. En el plano focal detrás de la lente se podrá observar, en una pantalla, la imagen del holograma generado. En este trabajo se utilizó una pantalla de cristal líquido para desplegar el patrón de interferencia generado digitalmente como se muestra en la siguiente sección.

5. Pantalla de cristal líquido

Una vez que el patrón de interferencia es generado digitalmente, se utiliza una pantalla de cristal líquido (LCD) como medio para mostrar éste y reconstruir la imagen holográfica.

La LCD utilizada fue extraída de un proyector Sharp modelo PG-A10S-SL que consta de 3 LCD´s y utiliza una lámpara halógena para iluminarlas. Cada una de las LCD´s tenía un filtro de color correspondiente a los colores rojo, verde y azul y además utiliza un prisma para mezclar las imágenes que son proyectadas por medio de una lente positiva (convergente) hacia un observador. El proyector fue desarmado de todas las piezas que no resultaban esenciales para el propósito de este trabajo y se dejaron las que permitían conectar una de las LCD a la computadora. En la figura 5 se muestran dos fotografías de la LCD utilizada.

La resolución de cada LCD, según el fabricante, es de 800x600 pixeles y cada una tiene un tamaño de 4 cm^2. El tamaño de cada pixel es de 20 micras y fue medido en el laboratorio utilizando un microscopio óptico con retícula. El área activa de cada LCD es de 1.6 cm x 1.8 cm. Las características generales de las LCD´s, proporcionadas por el fabricante son que cuentan con sistema de matriz activa TFT, tienen 480000 pixeles por cada LCD y el panel de la LCD es de poly silicón. La caracterización óptica de la LCD puede consultarse en (Calvillo-Vazquez, 2019).

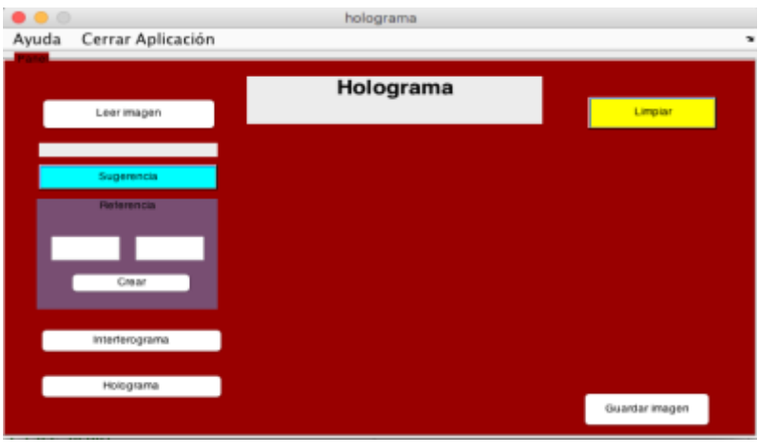
Figura 5 LCD utilizada a) extraída del proyector y b) adaptada en una montura para reconstruir el holograma

Fuente: Elaboración Propia

6. Resultados

La interfase para generar hologramas de Fourier que se elaboró en este trabajo fue hecha en el entorno de Matlab y para ello se creó una Interfase gráfica (GUI: Graphical Users Interfase). La pantalla inicial se muestra en la figura 6.

Figura 6 Captura de pantalla de la Interface grafica construida en Matlab para la creación de hologramas de Fourier



Fuente: Elaboración Propia

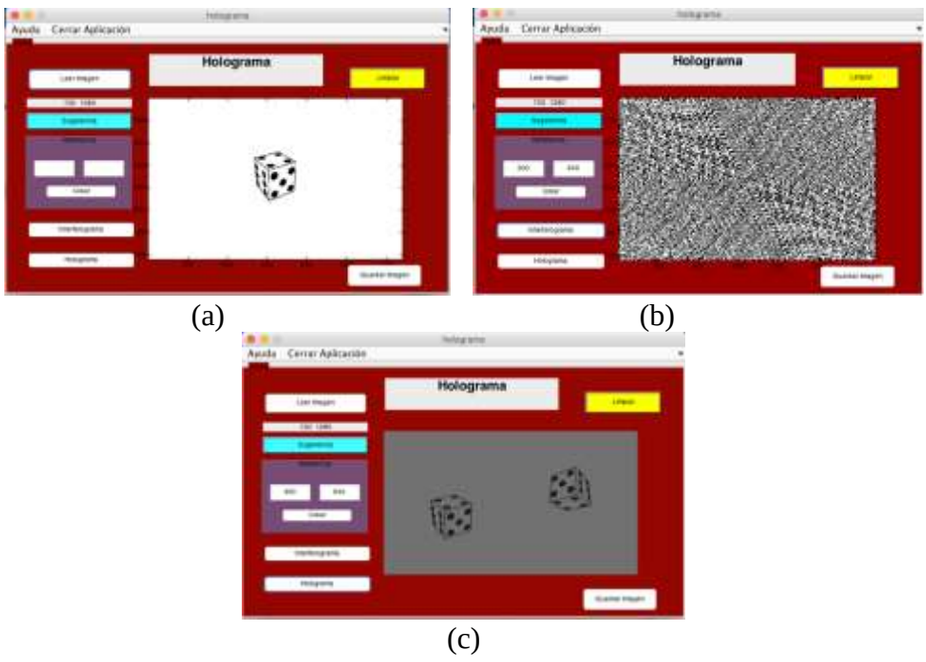
Como puede observarse en la fig. 6, la interfase es interactiva y consta de varios botones para que el usuario introduzca la información necesaria. Arriba a la izquierda aparece el botón “Leer imagen”. Este botón tiene el propósito de cargar desde el disco duro o unidad de memoria extraíble la imagen que se desea analizar. El formato de la imagen aceptado es bmp, jpg o tiff. En el recuadro gris que está abajo del primer botón aparece el tamaño en pixeles de la imagen cargada.

El siguiente botón de importancia es que aparece con la leyenda “Referencia”. Este botón se relaciona con la creación del haz de referencia. En los recuadros blancos que aparecen debajo de este botón se debe introducir la posición de la función delta de Dirac que crea el haz de referencia. El botón “sugerencia” indica que valores para la posición serán los adecuados para obtener un buen holograma. Una vez que se introducen estos valores, se presiona el botón “crear”.

Con los datos arriba introducidos, se presiona el botón “interferograma” para que la GUI muestre, en la parte central de la pantalla, el patrón de interferencia que se genera según la teoría expuesta en la sección anterior. Por último, el botón “holograma” muestra la reconstrucción digital de la imagen. Para ello, automáticamente se elimina el interferograma de la pantalla para mostrar la reconstrucción de la imagen. Aparecen también los botones “limpiar” que se utiliza para borrar los datos introducidos y volver a iniciar el proceso; el botón “guardar” almacena la imagen del interferograma o de la reconstrucción del holograma (según la que esté desplegada en la parte central de la interfase en ese momento) en la ubicación que el usuario desee.

En la figura 7 se presentan diversas capturas de pantalla que muestran el funcionamiento de la interfase.

Figura 7 Capturas de pantalla de la interfase que muestran (a) la imagen que se desea analizar; (b) el interferograma generado y (c) la reconstrucción digital del holograma



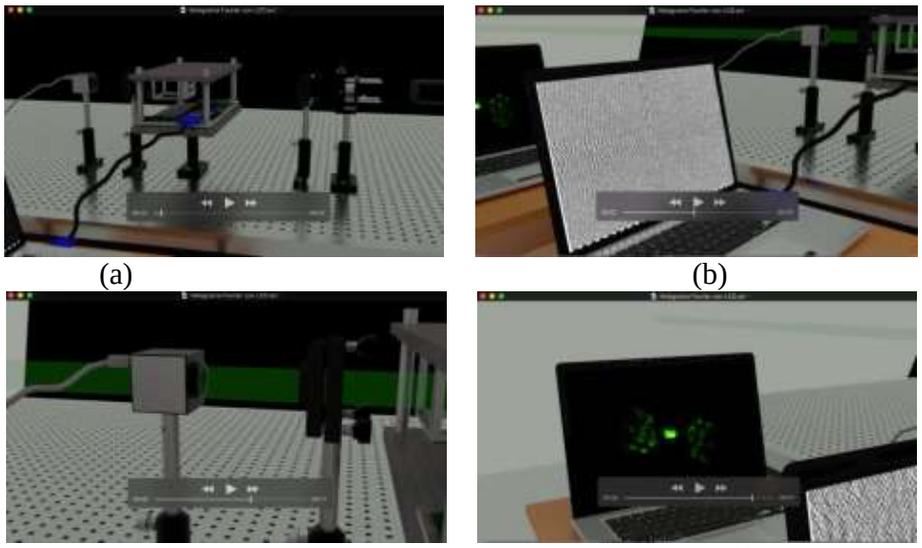
(a) (b)

(c)

Fuente: Elaboración Propia

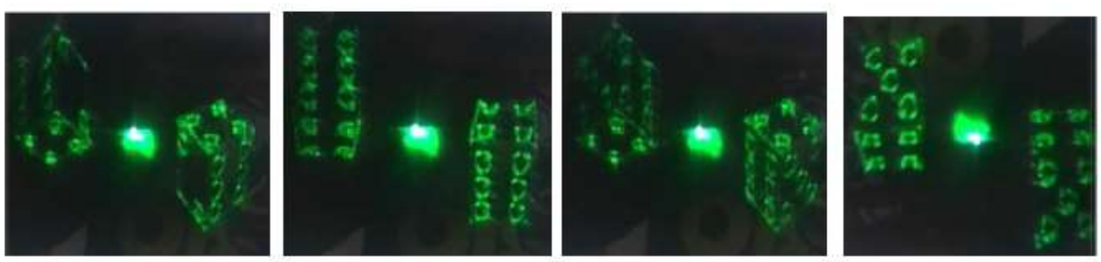
Además de la GUI creada, también se creó un video simulando el arreglo experimental para reconstruir los hologramas de Fourier. En la figura 8 se muestran las capturas de video correspondientes.

Figura 8 Capturas de pantalla del video animado para reconstruir HGC. a) Vista general del arreglo, se observa la LCD, una cámara CCD, y un sistema de filtraje de haz, b) La computadora que controla la LCD, c) cámara CCD y lente positiva para la reconstrucción de la imagen y d) captura del video por medio de la CCD y computadora



Fuente: Elaboración Propia

Figura 9 Capturas de pantalla que muestran los diferentes hologramas reconstruidos. En el video se observa que los dados giran y muestran sus diferentes caras. En las imágenes se presentan las imágenes real y conjugada



Fuente: Elaboración Propia

7. Conclusiones

Se presentó la realización de un holograma de Fourier como un experimento que permite la demostración de conceptos fundamentales en la enseñanza de la óptica por tanto realizar un experimento de grabado y reconstrucción de un holograma es muy ilustrativo para los estudiantes, sin embargo en las instituciones de educación no siempre es posible contar con un laboratorio especializado donde se puedan realizar hologramas, y de ser así, llevar a cabo el experimento es un proceso delicado, costoso y arduo. La creación de un ambiente virtual que muestre la creación de hologramas de Fourier realizados usando el programa de animación 3D Blender, una simulación numérica basada en el programa Matlab y una pantalla de cristal líquido (LCD) de un proyector es un paso fundamental hacia una nueva forma de educación.

8. Referencias

Ackermann G. K., Eichler J. (2007). Types of holograms. Holography: a practical approach (pp. 59-71). Wiley-VCH Verlang GmbH and Co.

Altamirano-Aguilar J. H. (2004). Tipos de hologramas, Holografía básica (pp. 17-20). IPN.

Calvillo Vazquez A. E. (2019). Caracterización de una pantalla comercial de cristal líquido como modulador de fase. [Tesis de Licenciatura]. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Gabor, D. (1949). Microscopy by reconstructed wave-fronts. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, *197*(1051), 454-487.

Goodman, J. W., & Lawrence, R. W. (1967). Digital image formation from electronically detected holograms. *Applied physics letters*, *11*(3), 77-79.

Hecht E. (2000). Interferencia. Óptica (pp. 384-437). Addison Wesley Iberoamericana.

Leith, E. N. (1962). Wavefront reconstruction and communication theory. *J. Opt. Soc. Am.*, *52*, 1123-1130.

Ortiz-Gutiérrez, M., Ibarra-Torres, J. C., Salgado-Verduzco, M. A., Pérez-Cortés, M., & Orozco-Muñoz, R. E. (2016). Caracterización de la gelatina de pescado dicromatada como material fotosensible. *Ciencia Nicolaita*, (67), 84-95.

Schnars, U., & Jüptner, W. (1994). Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction. *Applied optics*, *33*(2), 179-181.

The Novel Prize (6 de diciembre de 2021). The Novel Prize in Physics 1971. https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1971/summary/

Vacca, J. R. (2001). Overview of hologram technology: practical uses. Holograms and holography desing, technique and comercial applications (pp. 1-91). Charles River Media, Inc.

Vijayakumar, A., Jackin, B. J., & Palanisamy, P. K. (2012). Computer generated Fourier holograms for undergraduate optics laboratory. *Phys. Educ*, *28*(4), 4.

Capítulo 7 Dopado y Adelgazamiento de la Fibra Óptica para el Sensado de Temperatura

Chapter 7 Doping and Tapering of Optical Fibers for Temperature Sensing

SANCHEZ-LARA, Rafael†*, RODRIGUEZ-BLANCO, Marco A., TORAL-CRUZ, Homero y ALVAREZ-CHÁVEZ, José A.

University Autónoma del Carmen (UNACAR), Facultad de Ingeniería, C.56, No. 4, C.P. 24180, Cd. Del Carmen, Campeche, México.
Universidad de Quintana Roo (UQROO), División de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Boulevard Bahía s/n esq. Ignacio Comonfort, Col. Del Bosque, C.P. 77019, Chetumal, Quintana Roo, México.
Optical Sciences Group, University of Twente, Enschede, The Netherlands.

ID 1er Autor: *Rafael, Sánchez-Lara* / **ORC ID**: 0000-0001-6587-1972, **CVU CONACYT ID**: 88144

ID 1er Coautor: *Marco Antonio, Rodríguez-Blanco* / **ORC ID**: 0000-0003-3641-6895, **CVU CONACYT ID**: 92331

ID 2do Coautor: *Homero, Toral-cruz* / **ORC ID**: 0000-0002-4421-3775, **CVU CONACYT ID**: 44459

ID 3er Coautor: *José Alfredo, Álvarez-Chávez* / **ORC ID**: 0000-0003-0451-2815

DOI: 10.35429/H.2021.16.58.70

*rsanchez@pampano.unacar.mx

S. Figueroa (AA.). Aplicaciones Láser en la Ingeniería. Handbooks-TI-©ECORFAN-Mexico, 2021.

Resumen

En este trabajo se analiza la sensibilidad de un láser de fibra óptica dopada con tierras raras bajo el efecto de la variación de la temperatura y del perfil de adelgazamiento de la fibra óptica, esto con la finalidad de poder mostrar la viabilidad de uso de la fibra óptica adelgazada como un sensor de temperatura. De manera general se puede apreciar que un perfil parabólico en la fibra adelgazada conduce a una mayor sensibilidad por efecto de temperatura. También se encontró que a régimen de potencias de bombeo bajos se incrementa la sensibilidad a la temperatura. La fibra dopada con Holmio es menos sensible a los cambios de temperatura y presenta conversión de potencia a distancias más cortas. Los resultados permiten obtener una herramienta para el diseño de láseres y sensores de fibras ópticas dopadas.

Fibras dopadas, Laser, Temperatura, Sensor, Tierras raras

Abstract

In this work, the sensitivity of a rare earth doped fiber optic laser is analyzed under the effect of temperature and tapering of the optical fiber; this in order to show the viability to use a tapered optical fiber as a temperature sensor. In general, it can be seen that a parabolic profile in the tapered fiber leads to higher sensitivity. It was also found that the sensitivity increases as pump powers decreases. Holmium-doped fiber is less sensitive to temperature changes and exhibits power conversion at shorter distances. The results are a tool for the design of doped optical fiber lasers and sensors.

Doped fibers, Laser, Temperature, Sensor, Rare earths.

1. Introducción

Hoy en día la fibra óptica se ha sido utilizada en muchas aplicaciones, uno de ellos es emplearla como sensor, ya que en el ámbito industrial cada vez se demanda más tecnología que brinde una mayor seguridad y que no sea susceptible a interferencia electromagnética (Sukkar K, 2017, Amini S, 2017). Hay muchas fuentes de investigación al respecto, algunos han trabajado en la medición del desempeño de la fibra en su estado natural, utilizando técnicas de interferometría, rejillas de Bragg, rejillas de período largo, acopladores de fibra óptica y fibras adelgazadas. El principio utilizado en estos experimentos es aprovechar la dependencia con la temperatura del material dieléctrico de la fibra el cual modifica el comportamiento de la potencia de luz láser transmitida en el extremo de la fibra óptica (Zhu S, 2011). Otros trabajos de investigación se han enfocado en alterar la estructura interna de la fibra óptica mediante el dopado con tierras raras, el principio utilizado es la dependencia con la temperatura del tiempo de vida de fluorescencia en la fibra óptica dopada, es decir, existe variación en el área de sección transversal, tanto del láser de bombeo como de la señal en un amplificador de fibra dopada ((Trpkovski S, 2005, Castrellon-Uribe J, 2010).

En el afán de contribuir con el desarrollo de estas técnicas, este trabajo muestra cómo medir el desempeño de fibras dopadas con diferentes tierras raras y en diferentes perfiles de adelgazamiento de la fibra, bajo el principio de variación del área de sección transversal con la temperatura. Se presentará el modelado matemático para incluir el efecto de la variación de la temperatura en un amplificador de fibra adelgazada dopada con Iterbio (Yb), Tulio (Th), y Holmio (Ho); en el análisis se comparará el desempeño de estas tres tierras raras como dopado de la fibra óptica para el sensado de temperatura.

2. Modelado

En el modelo se considera que la sección de la fibra adelgazada está rodeada con aire, estos casos ya han sido considerado en otros estudios con fibras no dopadas, donde no se considera el efecto de la temperatura. En nuestro caso nos interesaría investigar las variaciones de potencia transmitida debido a la sensibilidad por temperatura en la emisión espontánea amplificada en el núcleo de la fibra adelgazada. Es importante modelar el patrón de intensidad transversal en el núcleo, ya que esta determina la conversión de energía entre la radiación de bombeo y la señal. Consideraremos una forma Gaussiana para los modos fundamentales del Bombeo y la señal transmitida dentro de la fibra adelgazada El patrón de intensidad transversal usando una aproximación Gaussiana se expresaría como:

$$f_{p.s}(r) = \frac{1}{\pi\Omega^2} e^{-r^2/\Omega^2} \quad (1)$$

Donde los subíndices *p* y *s* se refieren a la radiación del bombeo y la señal, y Ω se determina mediante el índice de refracción y el radio del núcleo y revestimiento respectivamente. El factor de multiplicación se eligió para normalizar *f(r)* en la siguiente forma:

$$2\pi * \int f_{p,s}(r) * dr = 1.$$

En una fibra de índice de refracción escalonado, Ω se aproxima como:

$$\Omega = a * J_0(U) * \frac{V}{U} * \frac{K_1(W)}{K_0(W)} \quad (2)$$

donde *a* es el radio del núcleo, y

$$U = a * \sqrt{k^2 * n_1^{\,2} - \beta^2}\ ,$$
$$W = a * \sqrt{\beta^2 - k^2 * n_2^{\,2}}\ ,$$
$$V = k * a * \sqrt{n_1^2 - n_2^2}\ ,$$
$$k = 2 * \pi / \lambda\ ,$$

n_1 y n_2 son los índices de refracción del núcleo y el revestimiento, respectivamente. β es la contante de propagación del modo bombeo o señal. Para un valor de *V*, el valor de *W* se puede obtener de la siguiente expresión:

$$W = 1.1428 * V - 0.996\ ,$$

La expresión anterior solo es válida para fibras de índice escalonado. De acuerdo a los valores de longitud de onda de la radiación de bombeo y señal, se puede determinar los valores de *U*, *W*, y *V* mediante la siguiente expresión de la apertura numérica de la fibra:

$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$, y el cálculo del parámetro Ω. El procedimiento es preciso para 1.5<*V*<2.5.

Para el análisis del efecto térmico, se parte de trabajos anteriores donde se han reportado cambios en la población de los niveles de energía en fibras dopadas. Existe modificación en las secciones transversales de emisión y absorción para las radiaciones del bombeo y la señal, y esto dependerá del tipo de dopado en la fibra, concentraciones de dopado, y el grado de desorden de la estructura del vidrio usado en diferentes tipos de fibras activas.

Usaremos los cambios en los coeficientes de absorción y emisión transversales para 3 diferentes tipos de dopado (Ytb, Th y Ho), iniciaremos el análisis con el Iterbio, sin embargo, el modelado utilizado sería similar a Th y Ho:
Iterbio:

$$\sigma(T) = \sigma(20°C) + \frac{d\sigma}{dT} * \Delta T \quad (3)$$

$$\frac{d\sigma_{abs}^{1064nm}}{dT} = 7.78 * 10^{-29} m^2 / °K \quad (4)$$

$$\frac{d\sigma_{em}^{1064nm}}{dT} = -2.44 * 10^{-28} m^2 / °K \quad (5)$$

$$\frac{d\sigma_{abs}^{976nm}}{dT} = \frac{d\sigma_{em}^{976nm}}{dT} = -1.63*10^{-27}\, m^2/°K \tag{6}$$

Donde, σ_{abs}^{1064nm} y σ_{em}^{1064nm} son los coeficientes de absorción y emisión transversales para la radiación de señal y, σ_{abs}^{976nm} and σ_{em}^{976nm} son los coeficientes de absorción y emisión transversales para la radiación del bombeo.

Tulio:

$$\sigma_{abs}^{1650nm}(T) = 15.56*10^{-25} - 38*10^{-28}*T \tag{7}$$

$$\sigma_{em}^{1650nm}(T) = 1.8*10^{-26} + 1.99*10^{-28}*T \tag{8}$$

$$\sigma_{abs}^{1841nm}(T) = -1.96*10^{-26} + 3.53*10^{-28}*T \tag{9}$$

$$\sigma_{em}^{1841nm}(T) = 3.75*10^{-25} - 1.57*10^{-29}*T \tag{10}$$

Holmio:

$$\sigma_{abs}^{1940}(T) = 2.21*10^{-24} - 6.49*10^{-27}T \tag{11}$$

$$\sigma_{em}^{1940}(T) = 1.59*10^{-24} - 4.34*10^{-27}T \tag{12}$$

$$\sigma_{abs}^{2090}(T) = 9.09*10^{-26} + 1.01*10^{-27}T \tag{13}$$

$$\sigma_{em}^{2090}(T) = 3.54*10^{-24} - 1.04*10^{-26}T \tag{14}$$

Como se puede observar para cada tierra rara, las longitudes de onda de la absorción y emisión son diferentes, además de su dependencia con la temperatura. Para el modelado del amplificador se inicia con el siguiente par de ecuaciones acopladas donde se considera el efecto de la temperatura:

$$\frac{dI_p(r,z)}{dz} = \left(\sigma_{em}^{p}(T)*n_2(T) - \sigma_{abs}^{p}(T)*n_1(T)\right)*N_{tot}*I_p(r,z) \tag{15}$$

$$\frac{dI_s(r,z)}{dz} = \left(\sigma_{em}^{s}(T)*n_2(T) - \sigma_{abs}^{s}(T)*n_1(T)\right)*N_{tot}*I_s(r,z) \tag{16}$$

donde, $I_p(r,z)$ e $I_s(r,z)$ son las intensidades de la radiación de bombeo y señal, N_{tot} es la población del dopado, σ_{abs}^{p}, σ_{em}^{p}, σ_{abs}^{s}, σ_{em}^{s} son los coeficientes de absorción y emisión transversal dependientes de la temperatura para el bombeo y señal respectivamente, y $n_1(T)$, $n_2(T)$ son las poblaciones de estado superior e inferior del dopado dependientes de la temperatura, los cuales son considerados en estado estacionario en acuerdo a las siguientes expresiones:

$$n_2 = \frac{R_{abs} + W_{abs}}{R_{abs} + R_{em} + W_{abs} + W_{em} + A_{esp}} \tag{17}$$

$$n_1 = 1 - n_2 \tag{18}$$

Donde, $R_{abs} = \sigma_{abs}^{p} I_p h\nu_p$, $R_{em} = \sigma_{em}^{p} I_p h\nu_p$, $W_{abs} = \sigma_{abs}^{s} I_s h\nu_s$, and $W_{em} = \sigma_{em}^{s} I_p h\nu_s$.

En las ecuaciones anteriores no se considera la generación de ruido amplificado espontáneo, solo se considera los efectos del perfil de adelgazamiento y temperatura.

Para considerar los efectos del adelgazamiento y el traslape de los modos fundamentales del bombeo y señal con el núcleo activo usamos la siguiente expresión

$$I_{p,s}(r,z) = P_{p,s}(z) * f_{p,s}(r) \tag{19}$$

Los subíndices *p* y *s* son la radiación de bombeo y señal, $P_{p,s}(z)$son la potencia del bombeo y señal dependiente de z, y $f(r)$ es la expresión dada por la Eq. 1. Se puede observar que el efecto del adelgazamiento y la temperatura en el parámetro Ω definido en la Eq. 2 modifica directamente la evolución de la intensidad de bombeo y señal descrito en Eq. 7 and 8.

Al considerar la potencia de bombeo para cualquier valor de z, obtenemos la siguiente expresión:

$$P_{p,s}(z) = \int_0^{\infty}\int_0^{2\pi} I_{p,s}(r,z) * r * dr * d\varphi = 2\pi * \int_0^{\infty} I_{p,s}(r,z) * r * dr \tag{20}$$

donde:

$$\frac{dP_{p,s}(z)}{dz} = 2\pi \int_0^{\infty} \frac{d * I_{p,s}(r,z)}{dz} r * dr \tag{21}$$

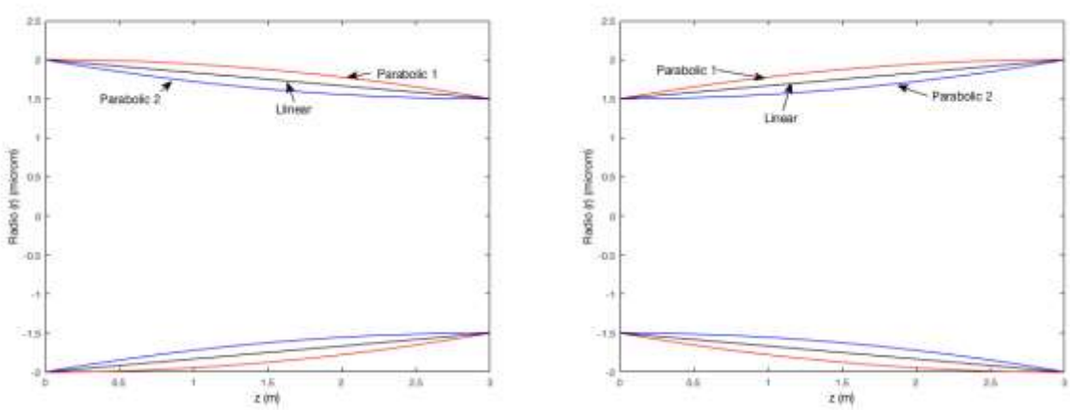
Se puede reescribir la Eq. 15 y 16 usando las Eq. 19 and 21:

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = 2 * \pi * \int_0^{a(z)} \left(\sigma_{em}^{p}(T) * n_2(T) - \sigma_{abs}^{p}(T) * n_1(T)\right) * N_{tot} * P_p(z) * f_p(r) * r * dr \tag{22}$$

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = 2 * \pi * \int_0^{a(z)} \left(\sigma_{em}^{s}(T) * n_2(T) - \sigma_{abs}^{s}(T) * n_1(T)\right) * N_{tot} * P_s(z) * f_s(r) * r * dr \tag{23}$$

Se está considerando que la fibra está dopada con concentración uniforme en el núcleo del radio *a*, el cual depende de z. También se puede notar también que $n_1(T)$ y $n_2(T)$ dependen de $f_{p,s}(r)$ debido a sus relaciones con las intensidades I_p e I_s. Una vez definidos las ecuaciones de potencias dependientes con la temperatura, se puede modelar los perfiles de adelgazamiento longitudinal del núcleo de la fibra para diferentes esquemas de bombeo como se muestra en la figura 1.

Figura 1 Perfiles de adelgazamiento en los amplificadores dopados, con potencia de bombeo en co-propagación con la señal con diferentes terminaciones: a) Bombeo con un radio amplio al inicio (Taper 1), b) Bombeo con un radio angosto al inicio (Taper 2)



a) b)

Fuente: Elaboración Propia

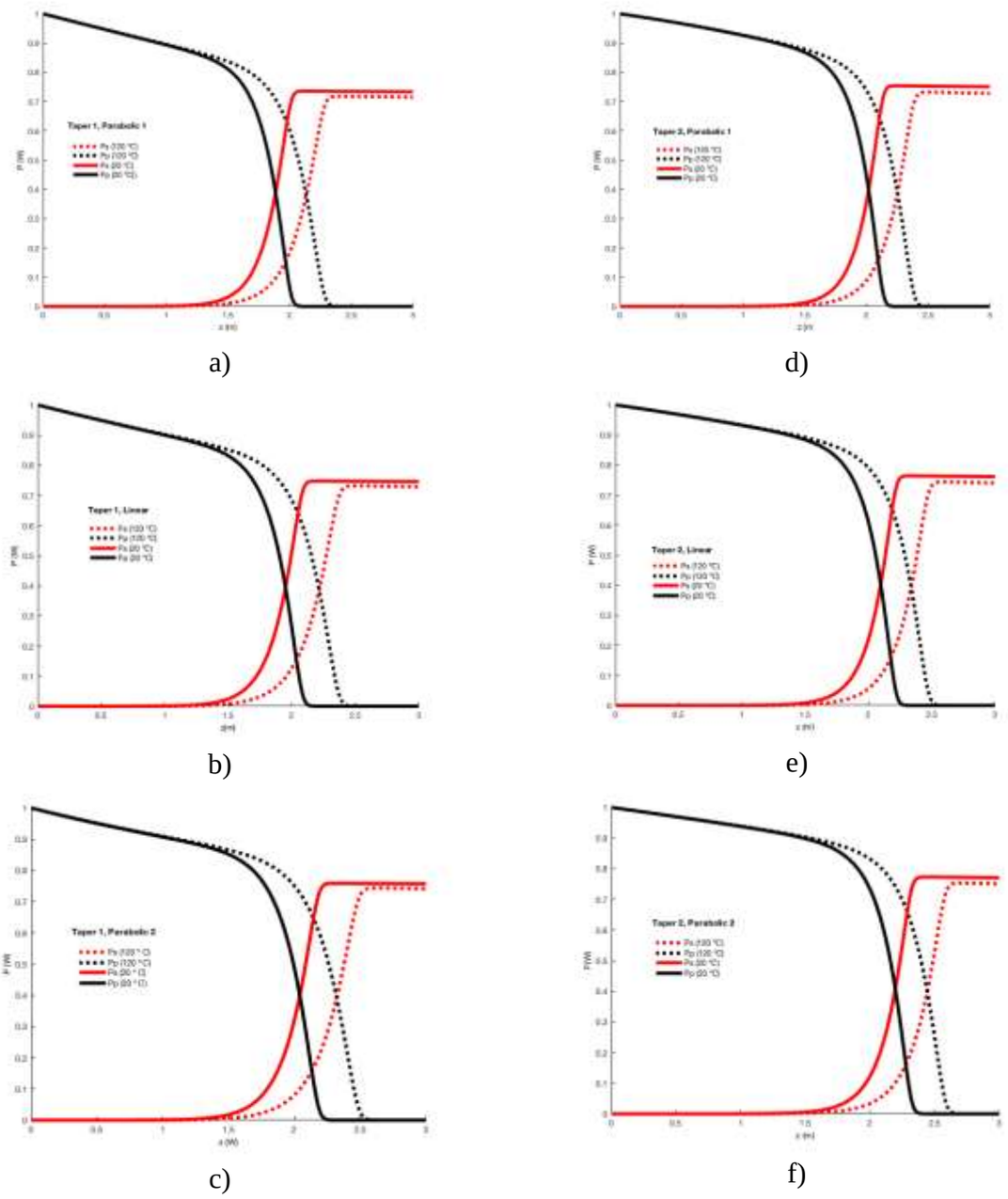
3. Análisis de resultados

Analizaremos primeramente la conversión de energía de bombeo a señal en dos diferentes perfiles de adelgazamiento que llamaremos Taper 1 y Taper 2, mostrados en la figura 1a y 1b, respectivamente. Se considera una NA=0.18 constante y una temperatura variable. De manera detallada mostraremos el procedimiento para el dopado con Iterbio y posteriormente procederemos a dar los resultados para Tulio y Holmio.

Iterbio:

Las longitudes de onda del bombeo y señal son $976nm$ and $1064nm$, respectivamente. La potencia de bombeo para ambos perfiles de adelgazamiento (Tapers) se establecen a 1W y los resultados de conversión de energía para dos temperaturas diferentes se muestra en la figura 2 para cada Taper.

Figura 2. Amplificador dopado con Yb. Evolución de la potencia de bombeo y señal a dos temperaturas, potencia de bombeo a 1 W y diferentes perfiles de adelgazamiento del núcleo activo, a), b) and c) Taper 1 d), e) y f) Taper 2



a) d)

b) e)

c) f)

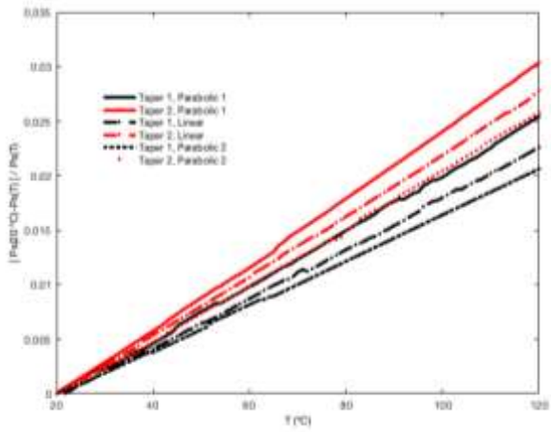
Fuente: Elaboración Propia

Un punto importante a observar en los resultados de la figura 2 es el punto de intersección de la curva de radiación de bombeo y señal, el cual para diferentes temperaturas se modifica, indicando de esta manera cual perfil en cada Taper afecta más el desempeño del amplificador bajo diferentes temperaturas y longitudes de fibra. Para medir esta sensibilidad, se analiza la eficiencia de conversión de energía en el extremo de la fibra a diferentes temperaturas T tomando como referencia la conversión a 20°C, se utilizará la siguiente expresión para calcular esta eficiencia:

$$[Ps(20°C) - Ps(T)]/\, Ps(20°C) \tag{24}$$

La ecuación se aplica para cada perfil considerado con una longitud de fibra de 3 m y potencia de bombeo de 1 W. Estos resultados se muestran en la figura 3.

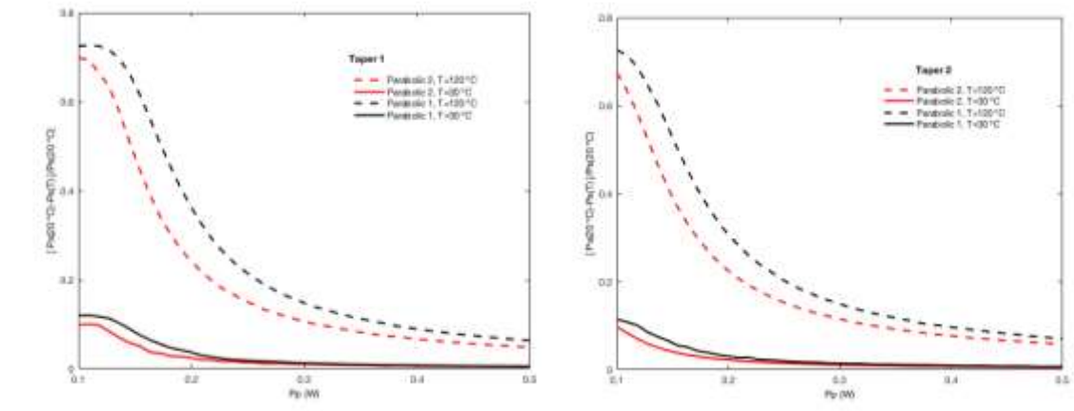
Figura 3 Sensibilidad en Yb a diferentes Temperaturas para los Tapers 1 y 2, con diferentes perfiles de adelgazamiento



Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a la figura 3, se puede visualizar que existe una sensibilidad más alta a altos valores de temperatura, además se puede observar que en el Taper 2 hace el amplificador más sensible a la temperatura en todos los perfiles de adelgazamiento del núcleo. Las líneas punteadas presentan valores más altos de sensibilidad que las líneas continuas, en particular el perfil denominado parabolic 1 se obtiene una mejora de la sensibilidad del amplificador de fibra adelgazada. La figura 4 muestra los cambios de la sensibilidad cuando modificamos la potencia de bombeo a 30 y 120°C.

Figura 4 Comportamiento de la sensibilidad en Iterbio variando la potencia de bombeo de 0.1 a 0.5 W a dos temperaturas T=30 y 120°C, para diferentes perfiles de Tapers, a) Taper 1, b) Taper 2



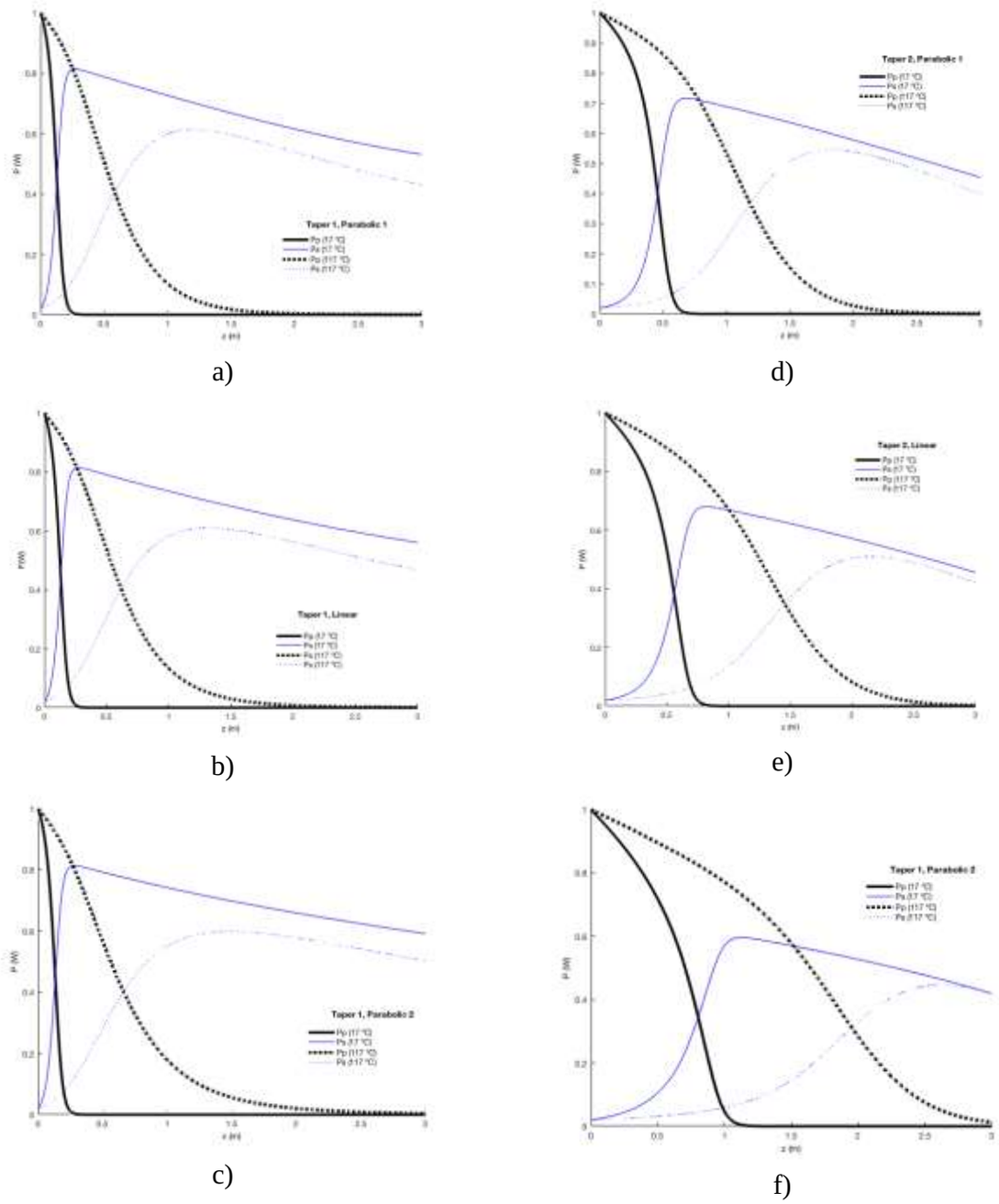
a) b)

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a la figura 4 podemos observar un dato interesante, la sensibilidad incrementa con valores más bajos de potencia de bombeo, y es diferente dependiendo del Taper y perfil de adelgazamiento.

Como apreciamos en figura 2, esta sensibilidad se puede incrementar cuando la longitud de la fibra está entre 2-2.5 m, donde se encuentran los puntos de intersección entre el residual de bombeo y la señal. De manera similar para el dopado con Tulio, la temperatura es considerado de 17 °C to 117 °C. La potencia de bombeo y de señal en co-propagación se establece en 1 W y 20 mW, respectivamente. Los resultados de conversión de señal para dos temperaturas se muestran en la figura 5 para ambos Tapers con sus respectivos perfiles de adelgazamiento.

Figura 5 Amplificador dopado con Th. Evolución de la potencia de bombeo y señal a dos temperaturas, potencia de bombeo a 1 W y diferentes perfiles de adelgazamiento del núcleo activo, a), b) and c) Taper 1 d), e) y f) Taper 2



a) d)

b) e)

c) f)

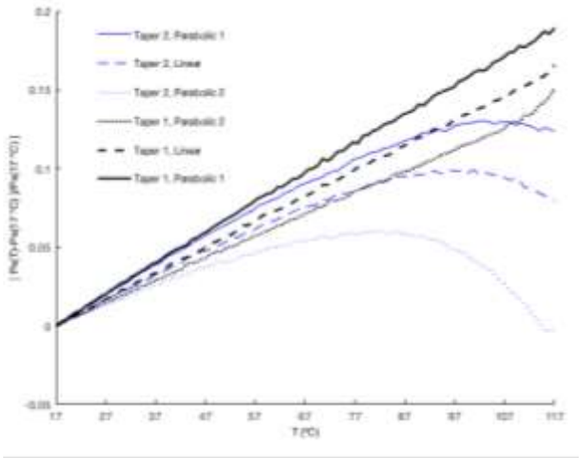
Fuente: Elaboración Propia

Se puede analizar la sensibilidad a los cambios de temperatura con la misma expresión usada anteriormente: $\Delta=[P_s(17\ °C)-P_s(T)]/\ P_s(17\ °C)$, los resultados se muestran en la figura 6 y 7. De acuerdo a la figura 6, todos los amplificadores muestran un incremento en la sensibilidad a partir de los 27 °C hasta un máximo de 117°C. Las curvas para el Taper 2 se satura en 87 °C aproximadamente, indicando una pérdida de sensibilidad con respecto a la curva del Taper 1.

Sin embargo, este comportamiento puede variar modificando las longitudes del Taper, es decir de la gráfica de la figura 5 podríamos elegir algún perfil de adelgazamiento con mayor sensibilidad en base a los puntos de intersección para mejorar la sensibilidad a una temperatura específica.

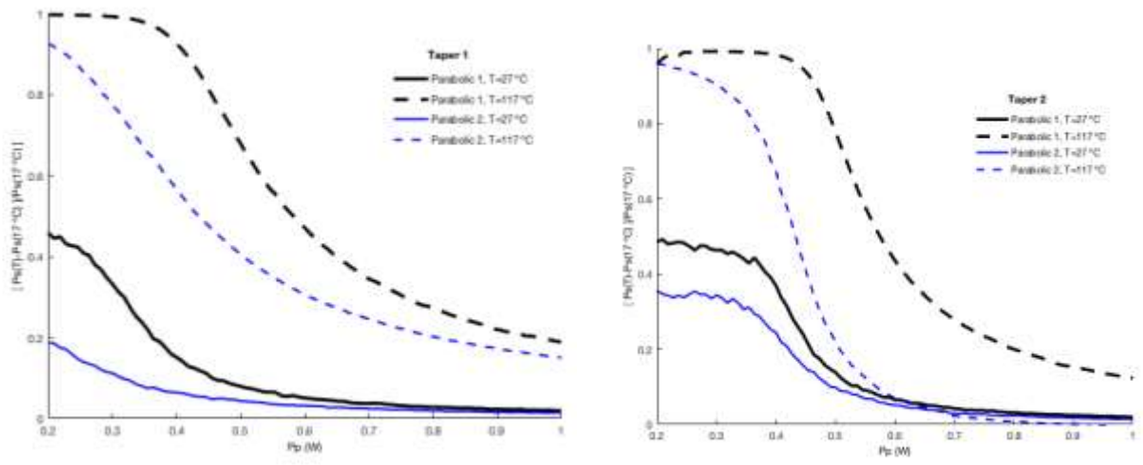
La figura 7 muestra cómo cambia la sensibilidad con respecto a la potencia de bombeo para diferentes perfiles de ambos Tapers, se usaron las temperaturas de 27 y 117 °C. De la misma manera la señal se calcula en el extremo de la fibra de 3 m en acuerdo a la figura 1. La sensibilidad crece conforme incrementa la temperatura y disminuye con valores bajos de potencia de bombeo. Por lo que podemos decir que la sensibilidad de la radiación de señal es mayor a potencias de bombeo bajos y dependiendo del perfil de Taper utilizado.

Figura 6 Sensibilidad en Th a diferentes Temperaturas para los Tapers 1 y 2, con diferentes perfiles de adelgazamiento



Fuente: Elaboración Propia

Figura 7 Comportamiento de la sensibilidad en Th variando la potencia de bombeo de 0.2 a 1 W a dos temperaturas T=300 y 390°K, para diferentes perfiles de Tapers



a) b)

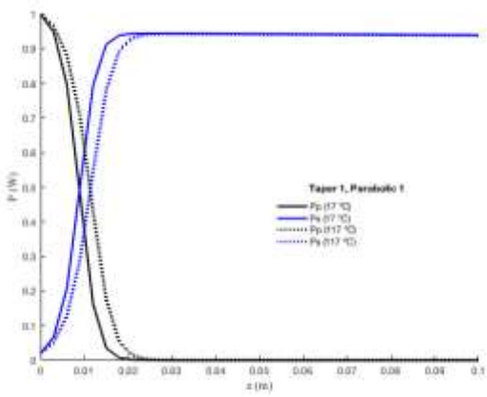
Fuente: Elaboración Propia

Los resultados obtenidos en ambos dopados (Yb y Th) son similares para el sensado de temperatura, sin embargo, aunque el comportamiento es similar los resultados son diferentes. Es decir, la evolución de la potencia del bombeo y de la señal en el punto de intersección se presenta a distancias más cortas en la fibra, la eficiencia de conversión es mayor, y el comportamiento de la sensibilidad a diferentes temperaturas en función de la potencia de bombeo muestra una mayor respuesta para el amplificador dopado con Tulio.

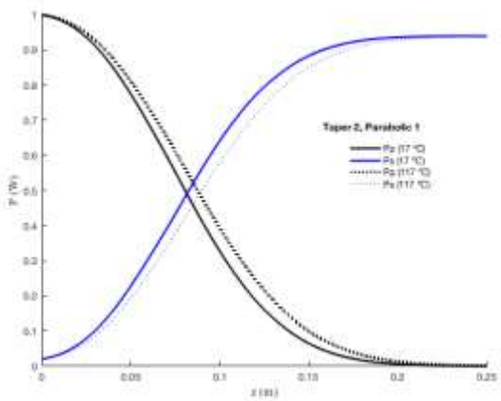
A continuación, mostramos los resultados para el dopado con Holmio:

En la figura 8 podemos observar la conversión de potencia entre la radiación de bombeo y la señal a lo largo de la fibra dopada y adelgazada usando dos tipos de Tapers. Se puede observar que la máxima conversión de potencia (puntos de intersección) se encuentra a diferentes longitudes para ambos Tapers. El punto de intersección en los perfiles a), b), y c), que corresponde al Taper 1, ocurre siempre a longitudes más cortas de la fibra (0.01m aproximadamente) comparado a lo obtenido en el Taper 2 (el cual ocurre entre 0.1m y 0.4 m aproximadamente). Esta diferencia de una orden de magnitud entre ambos Tapers se observa solamente en un amplificador de fibra dopada con Holmio, para los otros dopados la diferencia de longitudes en los puntos de intersección son despreciables en ambos Tapers.

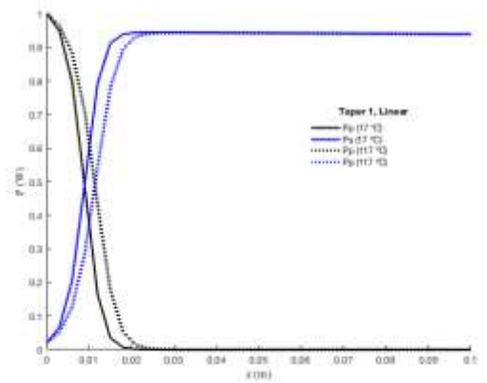
Figura 8 Amplificador dopado con Ho. Evolución de la potencia de bombeo y señal a dos temperaturas, potencia de bombeo a 1 W y diferentes perfiles de adelgazamiento del núcleo activo, a), b) y c) Taper 1; d), e) y f) Taper 2



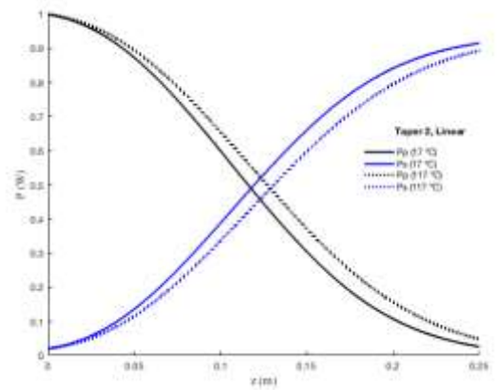
2a)



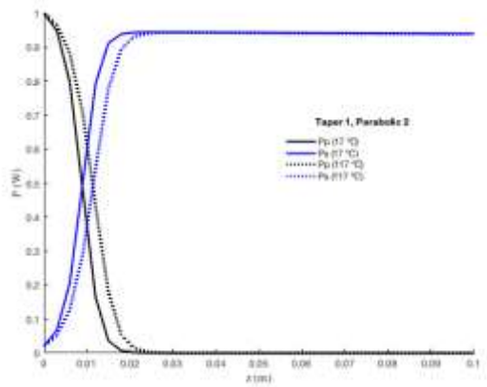
2d)



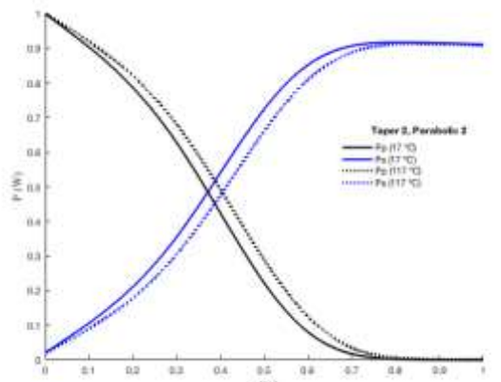
2b)



2e)



2c)



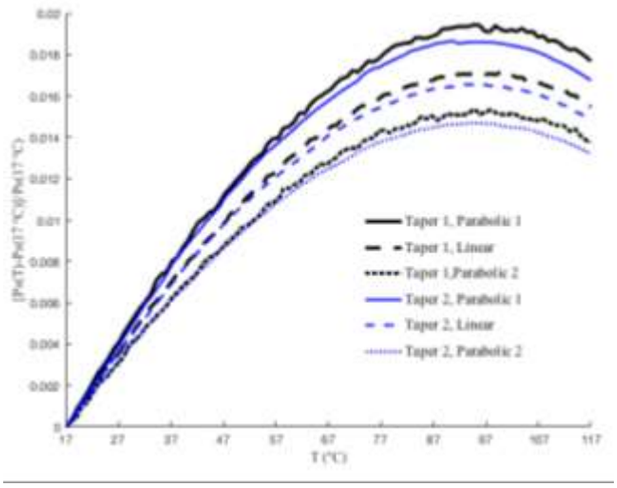
2f)

Fuente: Elaboración Propia

En la misma Figura 8 d), e) y f) para el Taper 2, se puede observar que la longitud en el punto de intersección depende fuertemente de los perfiles de adelgazamiento, variando entre 0.1m y 0.4m. Por otro lado, en el Taper 1 el punto de intersección en los perfiles a), b), y c) varía alrededor de 0.01m. Por lo que sugerimos que un amplificador de fibra dopado con Holmio se puede implementar con longitudes de fibras más cortos usando el esquema del Taper 1, mostrando además una conversión de potencia más estable para diferentes perfiles de adelgazamiento del núcleo. También se puede observar como la temperatura afecta la conversión de potencia entre la radiación del bombeo y la señal. En particular, la longitud de la fibra donde ocurre los puntos de intersección incrementa conforme incrementa la temperatura. La dependencia con la temperatura es muy similar en ambos Tapers. Para todos los perfiles de adelgazamiento, la desviación de la longitud de los puntos de intersección cuando la temperatura incrementa de 17 °C a 87 °C es más grande que el obtenido cuando la temperatura incrementa de 87 °C a 117 °C. Se puede observar una saturación a temperaturas mayores a 87 °C.

Se puede analizar la sensibilidad a los cambios de temperatura con la misma expresión usada anteriormente: Δ=[Ps(17 °C)-Ps(T)]/ Ps(17 °C). Se puede calcular para cada perfil de adelgazamiento de cada Taper con una longitud de fibra= 1 m, una potencia de bombeo = 1W, y una potencia de señal = 10mW. Los resultados se muestran en la figura 9.

Figura 9 Sensibilidad en Ho a diferentes Temperaturas para los Tapers 1 y 2, con diferentes perfiles de adelgazamiento con L=1 m



Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a la figura 9, todos los casos muestran un incremento constante de la sensibilidad con respecto a la temperatura en el rango de 17° a 77 °C, todas las curvas presentan un perfil lineal donde las pendientes indican la sensibilidad de la señal amplificada con respecto a la temperatura para los diferentes perfiles de adelgazamiento de ambos Tapers. Se puede identificar una curva con la máxima pendiente positiva (+2.5x10-4/°C) que corresponde al caso del Taper 1 con perfil de adelgazamiento parabólico 1 (línea negra).

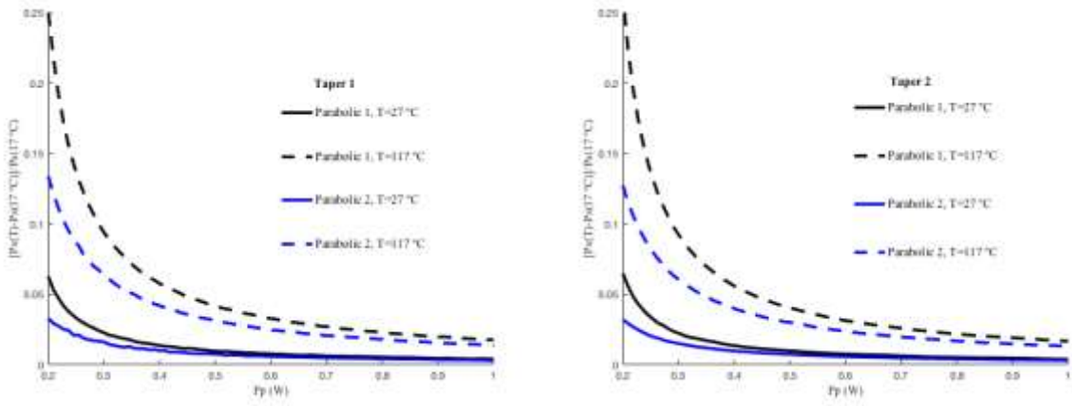
Por otro lado, en la misma Figura 9, se puede observar que todas las curvas alcanzan la saturación de la sensibilidad alrededor de 87 °C. Si comparamos estos resultados con los otros dopados (Iterbio y Tulio) podemos observar que son muy similares, sin embargo, para las fibras dopadas con Holmio hay más saturación en las curvas.

Para los láseres de fibra conviene tener una sensibilidad a la temperatura reducida para alcanzar una operación más estable, en este caso el uso del Taper 2 con un perfil de adelgazamiento parabólico 3 para el rango de temperatura entre 77-107 °C sería lo más recomendado. Por otro lado, para el uso como sensor de temperatura por fibra, es deseable tener alta respuesta a la temperatura, por lo que el uso de un esquema de Taper 1 con un perfil parabólico 1 en el rango de temperatura de 17-77 °C sería el recomendado.

La respuesta a la temperatura mostrada en la figura 9 para una longitud de fibra de 1m se puede mejorar a longitudes más cortas. En acuerdo a la figura 8, el mayor cambio en la señal amplificada con respecto a la temperatura ocurre aproximadamente a 0.01m para el esquema del Taper 1, y alrededor de 0.1m para el Taper 2.

La figura10 muestra cómo evoluciona la sensibilidad con respecto a la potencia de bombeo inicial para ambos Tapers analizados, usando las temperaturas de 27 °C y 117 °C. Se puede observar que la sensibilidad crece a valores bajos de potencia de bombeo inicial, de la misma manera que los otros tipos de dopados. El comportamiento es similar para los diferentes Tapers. Estos son resultados importantes para el diseño de láseres y sensores de temperatura con fibra ópticas dopadas.

Figura 10 Comportamiento de la sensibilidad en Ho variando la potencia de bombeo de 0.2 a 1 W a dos temperaturas T=27 y 117 °C, para diferentes perfiles de Tapers



4a) 4b)

Fuente: Elaboración Propia

En acuerdo a la figura 10, la sensibilidad en ambos Tapers se puede incrementar 10 veces si empleamos potencias de bombeo menores a 300 mW. Este incremento en la sensibilidad depende altamente del perfil de adelgazamiento utilizado.

Podemos comentar también que la longitud de la fibra determina la dimensión del sensor, en este contexto podemos decir que los amplificadores de fibra dopados con Ho son más pequeños que los otros amplificadores dopados con otras tierras raras. Por lo tanto, los amplificadores de fibra dopados con Ho, pueden ofrecer una oportunidad de ofrecer sensores de temperatura con fibra óptica más compactos. En este sentido se necesitaría un fuerte análisis de optimización incluyendo otras variables en el sistema.

4. Conclusiones

Se ha realizado un análisis numérico detallado sobre el comportamiento de los amplificadores de fibra dopado con tierras raras, en particular el Iterbio, Tulio y Holmio; con respecto a la variación de la temperatura. Se utilizaron fibras adelgazadas denominadas Tapers con diferentes perfiles de adelgazamiento. Se encontró que dependiendo el perfil de adelgazamiento del Taper y la potencia de bombeo inicial se modifica significativamente la sensibilidad a la temperatura. La sensibilidad es más alta conforme se reduce el radio del núcleo en la dirección de propagación (Taper 1) y se maximiza si la longitud de la fibra es igual a la distancia del punto de intersección donde se obtiene la conversión de potencia. Por otro lado, la sensibilidad en la temperatura se puede incrementar si usamos potencias de bombeo más bajas en la entrada del amplificador, por lo que en aplicaciones de sensado de temperatura es recomendable trabajar en un régimen de baja potencia de bombeo.

El amplificador de fibra dopado con Holmio se puede usar para desarrollar sensores de temperatura más compacto en comparación con los otros dopados de tierras raras. Los resultados proporcionan información importante para el desarrollo de láseres y sensores de fibra dopadas.

5. Agradecimientos

Agradecemos a la UNACAR y la UNAM por el apoyo brindado para la realización de este trabajo. Los autores declaramos que no hay conflicto de interés acerca de la publicación de este artículo.

6. Referencias

Agger SD, P. J. (2006). Emission and absorption cross section of thulium doped silica fibers. Optics Express, 50-57.

Alvarez-Chavez JA, P.-S. G.-H.-R. (2013). Temperature sensing characteristics of tapered Yb-doped fiber amplifiers. Optik, 5818-5821.

Amini S, K. P. (2017). Application of fiber-optic temperature data analysis in hydraulic fracturing evaluation. Society of Exploration Geophysicists (págs. 2105-2115). Austin, Texas: American Association of Petroleum.

Castrellon-Uribe J, G.-T. G. (2010). Remote temperature sensor based on the up-conversion fluorescente power ratio of an erbium-doped silica fiber pumped at 975 nm. Fiber and Integrated Optics, 272-283.

E. Ji, Y. S. (2017). Spectra-and temperature-dependent dynamics of directly end-pumped holmium lasers. Applied Physics B, 123-129.

Ghatak A, T. K. (1998). An introduction to fiber optics. Cambridge University Press, 576.

Ji Y, S. M. (2013). Spectroscopic analysis of efficient laser material. Optical Materials Express Vol 3.

Li L, L. Q. (2008). High power single transverse mode operation of tapered large-mode-area fiber laser. Optics Communication, 655-657.

Sanchez-Lara R, C. -H.-A.-P.-C. (2017). Temperature sensing characteristics of tapered Tm3+ doped fiber amplifiers. Laser Physics, 27(8):085108.

Sukkar K, M. S. (2017). Temperature sensing for petroleum pipelines monitoring and control using fiber optics. 3rd International Scientific Conference New Trends in Information. Baghdad.

Trpkovski S, W. S. (2005). Er3+:Yb3+doped fibre with embedded FBG for simultaneous measurement of temperature and longitudinal strain. Measurement Science and Technology, 12(2).

Turri G, S. V. (2008). Temperature-dependent spectroscopic properties of Tm3 + in germanate, silica, and phosphate glasses. Journal of Applied Physics, 103(9):093104.

Vazquez-Zuniga LA, C. S. (2010). Thermal characteristics of an ytterbium-doped fiber amplifier operating at 1060 and 1080 nm. Japanese Journal of Applied Physics, 49(2R):022502.

Zhang YJ, Z. F. (2011). Top-Hat beam Tm3 doped fiber using an intracavity abrupt taper. Laser Physics, 215-218.

Zhu S, X. J. (2011). Temperature sensor based on a single- mode tapered optical fiber. Journal of Shangai University (English Edition), 49(2R):022502.

Capítulo 8 Estudio y Caracterización de la Pérdida de Paquetes en Sistemas de Voz sobre IP

Chapter 8 Doping and Tapering of Optical Fibers for Temperature Sensing

TORAL-CRUZ, Homero†*, CHAN-PUC, Freddy Ignacio, VÁZQUEZ-ÁVILA, José Luis y MAY-ALARCÓN, Manuel

Universidad de Quintana Roo (UQROO), División de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Boulevard Bahía s/n esq. Ignacio Comonfort, Col. Del Bosque, C.P. 77019, Chetumal, Quintana Roo, México.
Universidad Autónoma del Carmen (UNACAR), Facultad de Ingeniería, C.56, No. 4, C.P. 24180, Cd. Del Carmen, Campeche, México.

ID 1er Autor: *Homero, Toral-Cruz* / **ORC ID**: 0000-0002-4421-3775, **CVU CONACYT ID**: 44459

ID 1er Coautor: *Freddy Ignacio, Chan-Puc* / **ORC ID**: 0000-0002-2564-3841, **CVU CONACYT ID**: 83879

ID 2do Coautor: *José Luis, Vázquez-Ávila* / **ORC ID**: 0000-0002-9654-2431, **CVU CONACYT ID**: 102415

ID 3er Coautor: *Manuel, May-Alarcón* / **ORC ID**: 0000-0003-1586-4496, **CVU CONACYT ID**: 121176

DOI: 10.35429/H.2021.16.71.80

H. Toral, F. Chan, J. Vázquez y M. May

*htoral@uqroo.edu.mx

S. Figueroa (AA.). Aplicaciones Láser en la Ingeniería. Handbooks-TI-©ECORFAN-Mexico, 2021

Resumen

La tecnología de voz sobre el protocolo de Internet (VoIP) habilita la transmisión de voz sobre las redes IP; sin embargo, las redes IP proporcionan un servicio de mejor esfuerzo y la calidad de servicio (QoS) no está garantizada. La tasa de pérdida de paquetes (PLR) es un parámetro importante que afecta la QoS de los sistemas VoIP. Varios estudios han demostrado que la pérdida de paquetes presenta dependencia temporal, por tanto, si se pierde un paquete, existe una alta probabilidad que también se pierda el siguiente paquete. Este fenómeno se conoce como comportamiento de pérdida de paquetes a ráfagas. Esta dependencia temporal puede modelarse eficazmente mediante una cadena de Markov de estados finitos. Además, se propone una descripción de la pérdida de paquetes de VoIP basada en comportamientos microscópicos y macroscópicos, donde estos comportamientos pueden ser modelados por cadenas de Markov de dos y cuatro estados, respectivamente.

Pérdida de Paquetes, Voz sobre IP, Modelos de Markov, Comportamiento Microscópico, Comportamiento Macroscópico

Abstract

Voice over Internet Protocol (VoIP) technology enables voice transmission over IP networks; however, IP networks provide a best effort service, and the quality of service (QoS) is not guaranteed. The packet loss rate (PLR) is an important parameter that impacts the QoS of VoIP systems. Several studies have shown that packet loss exhibit a finite temporal dependency; so, if a packet is lost, then there is a high probability that the next packet will also be lost. This phenomenon is known as a bursty packet loss behavior. This temporal dependency can be effectively modeled by a finite states Markov chain. Furthermore, a description of VoIP packet loss based on microscopic and macroscopic behaviors is proposed, where these behaviors can be modeled by Markov chains of two and four states, respectively.

Packet Loss, Voice over IP, Markov Models, Microscopic Behavior, Macroscopic Behavior

1. Introducción

Hace un par de décadas, la calidad de servicio de los sistemas de voz sobre el protocolo de Internet estaba afectada principalmente por el ancho de banda y otros parámetros como: retardos y pérdida de paquetes. En esa época se pensaba que el incremento del ancho de banda solucionaría el problema de calidad de servicio. Los recientes avances en la electrónica digital han permitido el surgimiento de nuevas técnicas de compresión de voz y multiplexación, que han contribuido significativamente en mejorar el funcionamiento de los sistemas VoIP; en este contexto se suman también el surgimiento de nuevas tecnologías de comunicaciones como la red óptica pasiva con capacidad de gigabit (GPON - Gigabit-capable Pasive Optic Network) (Abbas & Gregory, 2016), la red móvil de quinta generación (5G - Fifth Generation Mobile Network) (Panwar, Sharma, & Singh, 2016) y redes Wi-Fi de próxima generación (Next Generation Wi-Fi - Wi-Fi 6) (Edward, y otros, 2021), que permiten altas velocidades de transmisión de los datos. Sin embargo, el problema de calidad de servicio en los sistemas VoIP persiste y el reto se centra en disminuir los retardos y atenuar los efectos de la pérdida de paquetes.

Existen diferentes parámetros que determinan la calidad de servicio en los sistemas VoIP; sin embargo, el parámetro pérdida de paquetes es el principal deterioro que los convierte perceptualmente diferente del sistema telefónico clásico o red telefónica pública conmutada (Public Switched Telephone Network - PSTN). Debido al comportamiento dinámico de las redes IP, la pérdida de paquetes puede mostrar una gran variedad de distribuciones. La distribución de paquetes perdidos más estudiada en pruebas de calidad de voz es la de perdidas aleatorias o de Bernoulli (Toral-Cruz, Pathan, & Ramírez Pacheco, 2013) (pérdida de paquetes homogéneas). La pérdida de paquetes homogénea significa que la pérdida de los paquetes se presenta de forma independiente, es decir, la pérdida de un paquete en particular es independiente de la pérdida de paquetes anteriores. Diversos estudios han demostrado que la pérdida de paquetes presenta naturaleza ráfagoza (pérdida de paquetes no homogéneas) y muestra una dependencia temporal. Por lo tanto, si el paquete $\boldsymbol{n}$ se pierde, entonces existe una mayor probabilidad de que el paquete $\boldsymbol{n+1}$ también se pierda. Por consiguiente, existe una fuerte correlación entre la pérdida de paquetes consecutivos, lo que resulta en un comportamiento de pérdida de paquetes a ráfagas. Un modelo generalizado que permite representar la dependencia temporal entre paquetes perdidos es el modelo de Markov de estados finitos (Jelassi & Rubino, 2018).

Una forma de representar el comportamiento temporal de la pérdida de paquetes es mediante periodos microscópico y macroscópico. Donde el comportamiento microscópico puede ser modelado adecuadamente por una cadena de Markov de dos estados, mientras que el comportamiento macroscópico puede ser modelado correctamente por una cadena de Markov de cuatro estados. En este capítulo, se presenta el estudio de la pérdida de paquetes de un sistema de voz sobre el protocolo de Internet y la caracterización de su comportamiento temporal.

2. Pérdida de Paquetes

En las redes IP, la pérdida de paquetes es muy común y esperada debido a su naturaleza de recursos compartidos. Algunos protocolos de datos utilizan la pérdida de paquetes para conocer las condiciones de la red y poder reducir el número de paquetes que se envían (Davidson & Peters, 2006). La pérdida de paquetes marca la diferencia entre la tecnología VoIP y PSTN (Rake, 2006); es producida por errores en los medios de transmisión, congestión en la red o inestabilidad en el enrutamiento. La pérdida por congestión es la causa más común, los paquetes IP de diversas fuentes se ponen en la cola de los router que forman la subred del backbone de Internet para su transmisión hacia su destino final, sin embargo, cuando la cola se llena, los paquetes entrantes son descartados y se producen pérdidas.

El nivel aceptable de pérdida de paquetes esta en función del tamaño del paquete, un tamaño de paquete de alto valor disminuirá el retardo extremo a extremo, pero si el paquete se pierde, la degradación será proporcional al tamaño del paquete. Un sistema VoIP puede tolerar un porcentaje mayor de pérdidas si el tamaño de los paquetes a transmitir es reducido, sin embargo, un tamaño de paquete pequeño aumenta el retardo de extremo a extremo (Ransome & Rittinghouse, 2004). Por tal motivo existe un compromiso entre los retardos y la pérdida de paquetes.

Diversos estudios han demostrado que la pérdida de paquetes presenta naturaleza rafagoza, es decir, si un paquete se pierde, existe una alta probabilidad que el siguiente paquete también se pierda. A este fenómeno se le conoce como pérdida de paquetes a ráfagas. Un modelo que permite representar este fenómeno es el modelo de Markov de estados infinitos o cadenas de Markov. Una cadena de Markov de dos estados puede ser utilizada para representar una ráfaga de paquetes perdidos (burst) o una ráfaga de paquetes que llegaron correctamente a su destino (gap). Para lograr un comportamiento similar al que ocurre en Internet, es necesario usar una cadena de Markov de cuatro estados. Así podremos tener varias transiciones entre bursts y gaps.

3. Distribución de Pérdida de Paquetes

Debido al comportamiento dinámico o variable en el tiempo de Internet, la pérdida de paquetes puede presentar diversas distribuciones. Una de las distribuciones más utilizadas para representar la pérdida de paquetes es mediante el modelo de Bernoulli o Gilbert-Elliott; en el cual, un periodo de tiempo delimitado por paquetes perdidos con una tasa alta es conocido como burst, y un periodo entre dos bursts es llamado gap, en el cual los paquetes son recibidos correctamente (Friedman, Caceres, & Clark, 2003).

Un burst corresponde al periodo de tiempo durante el cual la tasa de pérdida de paquetes es lo suficientemente alta para producir una degradación notable en la calidad de la voz (Friedman, Caceres, & Clark, 2003).

Un gap corresponde al periodo de tiempo durante el cual los paquetes son recibidos correctamente o pueden ocurrir pérdidas aisladas, sin producir degradaciones significativas en la calidad de la voz y en general, el efecto de estas pérdidas aisladas puede ser resuelto por algún mecanismo de atenuación o recuperación de paquetes perdidos (Friedman, Caceres, & Clark, 2003).

Un burst se define, en términos de un valor denominado Gmin, como la secuela más larga que: (a) comienza con un paquete perdido, (b) no contiene ocurrencias de Gmin o más paquetes recibidos consecutivamente, y (c) termina con un paquete perdido (Friedman, Caceres, & Clark, 2003). Formalmente, un gap se define como cualquiera de los siguientes: (a) el periodo desde el inicio de una sesión RTP al tiempo de la recepción del último paquete recibido antes del primer burst, (b) el periodo desde el final del último burst, ya sea a la hora del informe o al final de la sesión RTP, lo que ocurra primero, o (c) el periodo de tiempo entre dos bursts (Friedman, Caceres, & Clark, 2003).

Consideremos el arribo (paquete recibido correctamente) y la pérdida de un paquete hacia un destino, como los resultados mutualmente excluyentes A y $\bar{A}$ que ocurren con probabilidades p y q, respectivamente. Ahora, definamos la variable aleatoria discreta X, donde $X = 1$ cuando A ocurre y $X = 0$ cuando $\bar{A}$ ocurre. Lo anterior podemos escribirlo de la siguiente manera (Gebali, 2008):

$$p(1) = p$$

$$p(0) = q \tag{1}$$

$$q = 1 - p$$

La media y la varianza para X estan dadas por las ecuaciones 2 y 3, respectivamente:

$$\mu = p \tag{2}$$

$$\sigma^2 = p(1-p) \tag{3}$$

El uso de esta distribución de Bernoulli no será de mucha utilidad, porque esta distribución considera que las pérdidas se presentan de manera independientes, es decir, que la pérdida de un paquete no depende si el paquete anterior se perdió o arribó; a esto llamaremos pérdidas homogéneas. Esta distribución no representa el comportamiento real de internet; cuando un paquete se pierde es muy probable que el siguiente también se pierda, y los consiguientes también, creando una ráfaga de paquetes perdidos en un periodo de tiempo dado (Toral-Cruz, Pathan, & Ramírez Pacheco, 2013).

Por consiguiente, usaremos el término burst para referirnos a una ráfaga de paquetes perdidos, es decir, que si el paquete n se pierde es muy probable que el paquete $n-1$ también se pierda, esto crea por consiguiente una dependencia temporal entre n y $n-1$ (Rake, 2006).

4. Modelado de Pérdida de Paquetes

Una serie de tiempo de paquetes perdidos o traza de pérdida de paquetes de tráfico VoIP, puede modelarse usando modelos de estados finitos en tiempo discreto, tales como, las cadenas de Markov. Se puede obtener un modelo simplificado de una traza de pérdida, utilizando únicamente una cadena de Markov de dos estados. Para lograr mayor precisión, es conveniente utilizar más números de estados (Rake, 2006).

Consideremos una secuencia de variables aleatorias $X_0, X_1, \ldots,$ y supongamos que el conjunto de todos los posibles valores es $\{0, 1, \ldots, M\}$. Donde X_n es el estado de algún sistema en el tiempo n, y, de acuerdo con la interpretación, decimos que el sistema está en estado j en el tiempo n si $X_n = j$. La secuencia de variables aleatorias nos dice que una cadena de Markov está formada por:

$$P_{ij} = P(X_n = j \mid X_{n-1} = i) \tag{4}$$

Una cadena de Markov es un proceso aleatorio donde el valor de la variable aleatoria en un instante n depende solo de su valor en su pasado inmediato $n-1$ (Ross, 2012).
Los valores $P_{ij},\ 0 \le i \le M,\ 0 \le j \le M$, son llamados probabilidades de transición de la cadena de Markov y satisfacen lo siguiente:

$$P_{ij} \ge 0 \qquad \sum_{j=0}^{M} P_{ij} = 1 \qquad i = 0, 1, \ldots, M \tag{5}$$

Las probabilidades de transición P_{ij} entre estados pueden ser representadas mediante una matriz cuadrada de la siguiente forma:

$$T = \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} & \ldots P_{0M} \\ P_{10} & P_{11} & \ldots P_{1M} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{M0} & P_{M1} & \ldots P_{MM} \end{bmatrix} \tag{6}$$

Para obtener el enésimo paso de la matriz de transición es necesario multiplicar la matriz por sí misma n veces, es decir:

$$T = T^n \tag{7}$$

P_{ij} representa las probabilidades en estado estable S_i. El estado estable (steady-state) de la matriz de transición, puede ser obtenido a partir de lo siguiente (Estrada-Vargas, Torres-Roman, & Toral-Cruz, 2009):

$$\bar{S} = \bar{S}T \tag{8}$$

o, equivalentemente a:

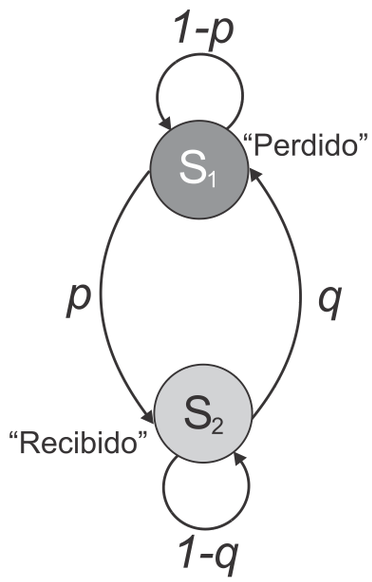
$$(I - T')\bar{S} = 0 \tag{9}$$

donde $\overline{S} = [s_1 \ \ s_2 \ \ ... \ \ s_M]$, T' es la transpuesta de la matriz T e I la matriz identidad.

Una ráfaga de paquetes perdidos y recibidos sigue el comportamiento de una cadena de Markov de dos estados (también conocido como modelo de Gilbert) y puede ser descrita mediante dos parámetros (p y q) (Rake, 2006), como se muestra en la Figura 1.

Donde p y q son las dos probabilidades de transición, q (transición de recibido→perdido) y p (transición de perdido→recibido). El estado S_1 representa los paquetes perdidos y S_2, representa el estado en el que los paquetes son recibidos (Estrada-Vargas, Torres-Roman, & Toral-Cruz, 2009).

Figura 1 Cadena de Markov de 2 estados



Fuente de Consulta: Elaboración Propia

La matriz de transición de esta cadena de Markov de dos estados, estará dada por:

$$T = \begin{bmatrix} 1-p & p \\ q & 1-q \end{bmatrix}; \quad p + q = 1 \tag{10}$$

Sustituyendo la transpuesta de la matriz de la ecuación (10), tenemos:

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \left[\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1-p & q \\ p & 1-q \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p & -q \\ -p & q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \end{pmatrix} \tag{11}$$

Resolviendo la ecuación (11) podemos encontrar que:

$$0 = pS_1 - qS_2 = -pS_1 + qS_2 \quad (12)$$

Al despejar la ecuación (12) obtenemos:

$$S_2 = \frac{p}{q} S_1 \quad (13)$$

Como $S_2 + S_1 = 1$, podemos sustituir la ecuación (13) para obtener:

$$S_1 = \frac{q}{p+q}$$
$$S_2 = \frac{p}{p+q} \quad (14)$$

Donde S_1, representa la taza de pérdida de paquetes de la comunicación.

La distribución de pérdida descrita con el modelo de Markov de 2 estados, puede también ser caracterizado por un vector o secuencia binaria; este vector estará compuesto por paquetes perdidos (unos) y paquetes recibidos (ceros) (Rake, 2006). La distribución del número consecutivo de paquetes perdidos $(f_b(k))$ y paquetes recibidos $\left(f_g(k)\right)$, pueden ser expresados en términos de p y q (Rake, 2006).

$$f_b(k) = p(1-p)^{k-1} \quad (15)$$

$$f_g(k) = q(1-q)^{k-1} \quad (16)$$

Estas dos distribuciones geométricas nos indican el número de pasos k para cambiar de un estado a otro, en este caso, del estado de paquetes perdidos al estado de paquetes recibidos $f_b(k)$, o viceversa $f_g(k)$. El promedio de paquetes perdidos y recibidos consecutivamente pueden ser calculados como la esperanza de k y deducidas a partir de las ecuaciones (15) y (16). El promedio de paquetes perdidos consecutivamente se puede calcular de la siguiente manera (Rake, 2006):

$$\bar{b} = E\{k\} = \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot p(1-p)^{k-1} \quad (17)$$

donde $q = 1 - p$. Después de sustituir p en la ecuación (17) tenemos:

$$\bar{b} = E\{k\} = p \sum_{k=1}^{\infty} k\, q^{k-1} \quad (18)$$

Sin embargo $\frac{d}{dp}(q^k) = kq^{k-1}$. Entonces la ecuación (18), se puede reescribir de la siguiente manera:

$$\bar{b} = E\{k\} = p \sum_{k=1}^{\infty} \frac{d}{dq}(q^k) \quad (19)$$

Intercambiando el orden de la derivada y la sumatoria tenemos:

$$\bar{b} = E\{k\} = p \frac{d}{dq} \left[\sum_{k=1}^{\infty} q^k\right] \quad (20)$$

Desarrollando la sumatoria:

$$\begin{aligned} &S = \textstyle\sum_{k=1}^{\infty} q^k = q^1 + q^2 + q^3 + q^4 + \cdots \\ &S = q^1 + q^2 + q^3 + q^4 + \cdots \\ &S = q(1 + q^1 + q^2 + q^3 + \cdots) \\ &S = q(1+S) = q + qS \\ &S - qS = q \\ &S(1-q) = q \\ &S = \frac{q}{(1-q)} \end{aligned} \quad (21)$$

Sustituyendo el resultado de la ecuación (21) en la ecuación (20) y derivando:

$$\bar{b} = E\{k\} = p\frac{d}{dq}\left[\frac{q}{(1-q)}\right] = p\left[\frac{(1-q)\frac{d}{dq}(q) - q\frac{d}{dq}(1-q)}{(1-q)^2}\right]$$
$$\bar{b} = E\{k\} = p\left[\frac{(1-q)-q(-1)}{(1-q)^2}\right] = \frac{p}{(1-q)^2} \quad (22)$$

donde $p = 1 - q$. Después de sustituir q en la ecuación (22) tenemos:

$$\bar{b} = E\{k\} = \frac{p}{p^2} = \frac{1}{p} \quad (23)$$

Aplicando el mismo procedimiento utilizado para el cálculo del promedio de paquetes perdidos, podemos calcular el promedio de paquetes recibidos consecutivamente, quedando de la siguiente forma:

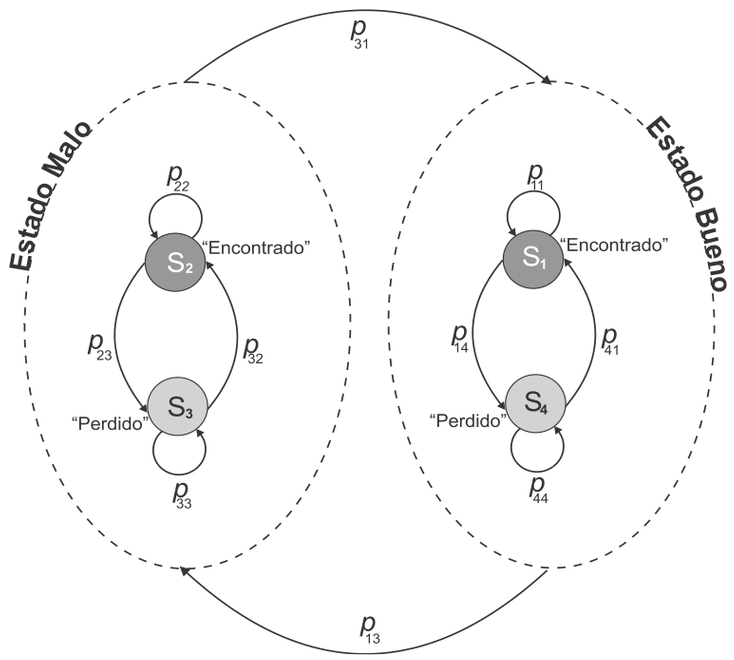
$$\bar{g} = E\{k\} = \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot q(1-q)^{k-1} = \frac{1}{q} \quad (24)$$

A partir de las ecuaciones (23) y (24) podemos encontrar la taza de pérdida de paquetes de la comunicación (S_1), como se expresa en la ecuación (14):

$$S_1 = \frac{q}{p+q} = \frac{\bar{b}}{\bar{b}+\bar{g}}$$
$$S_1 = \frac{\bar{b}}{\bar{b}+\bar{g}} = \frac{\frac{1}{p}}{\frac{1}{p}+\frac{1}{q}} = \frac{\frac{1}{p}}{\frac{q+p}{(p)(q)}} = \frac{(p)(q)}{(p)(q+p)} = \frac{q}{(p+q)} \quad (25)$$

Para lograr una mejor aproximación en el modelado de la serie de tiempo de PLR o traza de pérdida de paquetes de tráfico VoIP, debemos usar un mayor número de estados, es decir, una cadena de Markov de n estados. En este trabajo nos limitaremos a analizar únicamente cadenas de Markov de dos y cuatro estados.

Figura 2 Cadena de Markov de 4 estados



Fuente de Consulta: Elaboración Propia

En la Figura 2 se muestra una cadena de Markov de 4 estados. Este modelo explica que existen dos niveles de rafagosidad, una donde hay muchos paquetes perdidos (estado malo) y otra donde hay pocos paquetes perdidos (estado bueno).

En una cadena de Markov de cuatro estados, los estados S_3 y S_4 (los estados de paquetes perdidos), los estados S_1 y S_2 (los estados de paquetes recibidos) y los parámetros $[p_{14}, p_{41}, p_{23}, p_{32}, p_{13}, p_{31} \in (0,1)]$ son necesarios para hallar todas las probabilidades de transición (Estrada-Vargas, Torres-Román, & Toral-Cruz, 2010). La probabilidad de estado estable de estar en el estado bueno esta dada por la siguiente ecuación (Toral-Cruz, 2010):

$$\pi_B = \frac{P_{13}}{P_{13}+P_{31}} \tag{26}$$

y la probabilidad de estado estable de estar en el estado malo esta dada por la siguiente ecuación (Estrada-Vargas, Torres-Román, & Toral-Cruz, 2010), (Toral-Cruz, 2010):

$$\pi_G = \frac{P_{31}}{P_{31}+P_{13}} \tag{27}$$

En el estado "bueno" (G) la perdida de paquetes ocurre con probabilidad baja P_G, mientras que en el estado "malo" (B) ocurre con probabilidad alta P_B.
Todos los paquetes perdidos en un estado bueno o malo pueden ser calculados siguiendo las ecuaciones que a continuación se presentan:

$$P_G = \frac{p_{14}}{p_{14}+p_{41}} \tag{28}$$

$$P_B = \frac{p_{23}}{p_{23}+p_{32}} \tag{29}$$

La probabilidad total de todos los paquetes perdidos para una cadena de Markov de cuatro estados está dada por la ecuación:

$$PLR = \pi_G P_G + \pi_B P_B \tag{30}$$

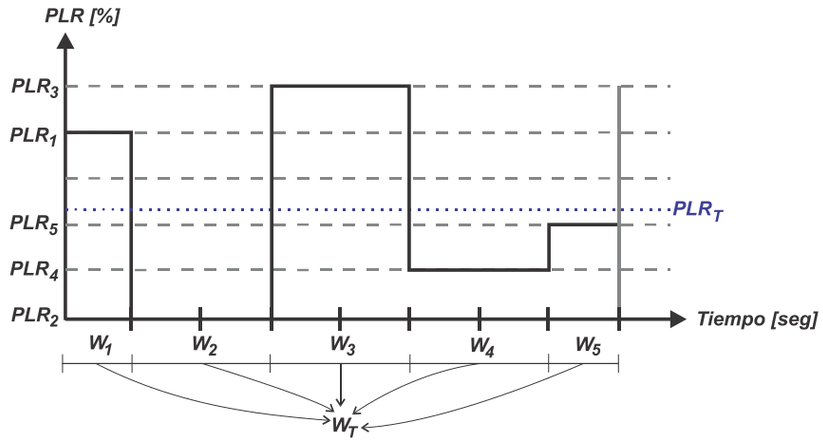
5. Comportamiento Microscópico y Macroscópico

La pérdida de paquetes en un sistema VoIP puede ser descrita en función de ventanas de tiempo angostas y amplias. Donde, el comportamiento de los paquetes perdidos en una ventana de tiempo angosta será llamada Microscópica, y el comportamiento de pérdida de paquetes en una ventana de tiempo amplia será llamado Macroscópica (Toral-Cruz, 2010).

El comportamiento microscópico corresponde al periodo de pérdida de paquetes observado en una ventana de tiempo W_1 de una comunicación VoIP; donde este periodo de paquetes perdidos tiene un valor PLR_1 específico (Toral-Cruz, 2010).

Por otra parte, el comportamiento macroscópico se refiere al conjunto de periodos microscópicos $(W_1, W_2, W_3, \dots, W_n)$ observado en toda la duración de la comunicación VoIP; en el que cada periodo microscópico tiene su propio valor PLR $(PLR_1, PLR_2, PLR_3, \dots, PLR_n)$, como se muestra en la Figura 3. En la Figura 3 se puede observar que existen diferentes niveles de PLR para cada periodo microscópico, es decir, la pérdida de paquetes se concentra en algunos intervalos de tiempo u ocurre a ráfagas (burst).
El comportamiento microscópico puede ser modelado por una cadena de Markov de dos estados, mientras que el comportamiento macroscópico puede ser modelado por una cadena de Markov de cuatro estados (Toral-Cruz, 2010).

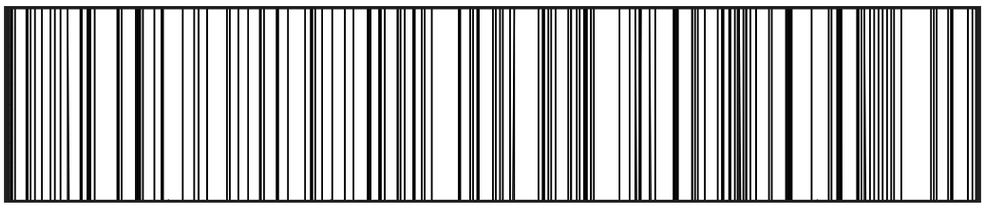
Figura 3 Comportamiento microscópico y macroscópico



Fuente de Consulta: Elaboración Propia

En la Figura 4 se representa el comportamiento de la pérdida de paquetes de forma homogénea; es decir, el patrón de paquetes perdidos está representado por un periodo microscópico.

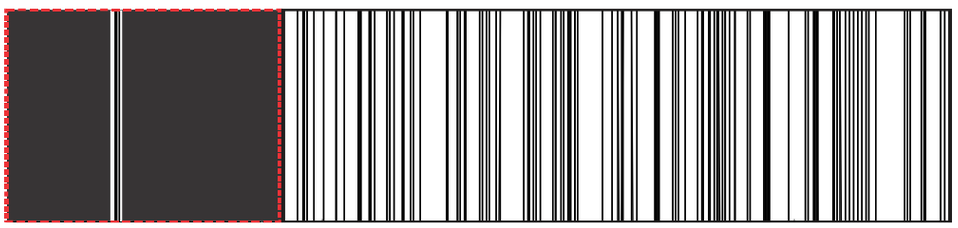
Figura 4 Paquetes perdidos de forma homogénea



Fuente de Consulta: Elaboración Propia

Por otro lado, en la Figura 5 se representa el comportamiento de la pérdida de paquetes de forma no homogénea; es decir, el patrón de paquetes perdidos está representado por más de un periodo microscópico.

Figura 5 Paquetes perdidos de forma no homogénea



Fuente de Consulta: Elaboración Propia.

Con el fin de simplificar esta descripción de paquetes perdidos, los periodos microscópicos pueden ser clasificados en dos conjuntos; uno para pérdidas bajas y otra para pérdidas altas de paquetes. El umbral usado para delimitar los dos conjuntos es una función de la percepción de la calidad, buena o mala, de acuerdo con el cálculo de valores MOS(Toral-Cruz, 2010).

En la Figura 4.3, el periodo microscópico con altas perdidas de paquetes está delimitado por un recuadro punteado, mientras que un periodo microscópico con bajas perdidas está delimitado por un recuadro continuo.

7. Conclusiones

Las redes IP no garantizan la calidad de servicio en aplicaciones multimedia tales como VoIP, esto debido a que proporcionan un servicio de mejor esfuerzo. Por tal motivo, retardos, jitter y pérdida de paquetes son los deterioros más comunes en la transmisión de voz sobre las redes IP. Derivado de estos puntos, muchos trabajos han sido orientados al análisis de las principales métricas de desempeño. En este capítulo se presenta el estudio y caracterización de la pérdida de paquetes basada en su dependencia temporal, lo cual indica que existe una fuerte correlación entre la pérdida de paquetes consecutivos (pérdida de paquetes a ráfagas). Se presenta una descripción de comportamientos microscópico y macroscópico, donde estos comportamientos pueden ser modelados mediante cadenas de Markov de dos y cuatro estados, respectivamente.

Agradecimientos

Agradecemos a la UQROO y UNACAR por el apoyo brindado para la realización de este trabajo. Los autores declaramos que no hay conflicto de interés acerca de la publicación de este artículo.

Referencias

Abbas, H. S., & Gregory, M. (2016). The next generation of passive optical networks: A review. *Journal of Network and Computer Applications, 67*, 53-74.

Davidson, J., & Peters, J. (2006). *Voice Over IP Fundamentals.* NJ: Cisco Press.

Edward, O., Lehr, W., Katsaros, K., Selinis, I., Bubleye, D., & Kusuma, J. (2021). Revisiting Wireless Internet Connectivity: 5G vs Wi-Fi 6. *Telecommunications Policy, 45*, 1-15.

Estrada-Vargas, L., Torres-Román, D. L., & Toral-Cruz, H. (2010). Characterization and modeling of packet loss of a VoIP communication. *World Academy of Science, Engineering and Technology* (págs. 912-916). Paris: WASET.

Estrada-Vargas, L., Torres-Roman, D., & Toral-Cruz, H. (2009). Analytical Description of a Parameter-based Optimization of the Quality of Service for VoIP Communications. *WSEAS Transactions on Communications, 9*, 1042-1052.

Friedman, T., Caceres, R., & Clark, A. (2003). *RTP Control Protocol Extended Reports (RTCP XR).* Washington D.C: Network Working Group / Request for Comments.

Gebali, F. (2008). *Analysis of Computer and Communication Networks.* Boston, MA: Springer.

Jelassi, S., & Rubino, G. (2018). A perception-oriented Markov model of loss incidents observed over VoIP networks. *Computer Communications, 128*, 80-94.

Panwar, N., Sharma, S., & Singh, A. (2016). A survey on 5G: The next generation of mobile communication. *Physical Communication, 18*, 64-84.

Rake, A. (2006). *Speech Quality of VoIP: Assessment and Prediction.* London: John Wiley & Sons Inc.

Ransome, J., & Rittinghouse, J. (2004). *Voice over Internet Protocol (VoIP) Security.* Amsterdam: Elsevier Digital Press .
Ross, S. (2012). *First Course in Probability.* Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.

Toral-Cruz, H. (2010). *Modelado de los Parámetros de QoS de Tráfico VoIP Auto-similar y una Mejora al Modelo E.* Guadalajara: CINVESTAV.

Toral-Cruz, H., Pathan, A.-S., & Ramírez Pacheco, J. C. (2013). Accurate modeling of VoIP traffic QoS parameters in current and future networks with multifractal and Markov models. *Mathematical and Computer Modelling, 57*(11-12), 2832-2845.

Capítulo 9 Estimación de la Vida Útil de la Turbina de Vapor de 110MW Utilizando Redes Neuronales Artificiales

Chapter 9 Steam Turbine Life Estimation at 110 MW Using Artificial Neural Networks

YOUNESS, El Hamzaoui†*, ÁLVAREZ-ARELLANO, Juan A y VÁZQUEZ-ÁVILA, José L.

Universidad Autónoma del Carmen, Campus III, Facultad de Ingeniería, Avenida Central S/N, Esq. Con Fracc. Mundo Maya, C.P. 24115, Ciudad del Carmen, Camp., Mex.

ID 1er Autor: *El Hamzaoui, Younes* / **ORC ID**: 0000-0001-5287-1594, **CVU CONACYT ID**: 292367

ID 1er Coautor: *Juan A. Álvarez-Arellano* / **CVU CONACYT ID**: 27636

ID 2do Coautor: *José L. Vázquez Ávila* / **ORC ID**: 0000-0002-9654-2431, **CVU CONACYT ID**: 102415

DOI: 10.35429/H.2021.16.81.96

E.H. Youness, J. Álvarez y J. Vázquez

*****eyouness@pampano.unacar.mx

S. Figueroa (AA.). Aplicaciones Láser en la Ingeniería. Handbooks-TI-©ECORFAN-Mexico, 2021

Resumen

Las turbinas de vapor tienen muchas aplicaciones en diversos sectores industriales y, según la experiencia común, los fallos de los álabes son el principal origen de las averías de funcionamiento de estas máquinas, lo que provoca grandes pérdidas económicas en la industria de la turbomaquinaria. Las turbinas están diseñadas para trabajar en condiciones estables de funcionamiento. Sin embargo, se han producido fallos en los álabes tras un corto periodo de tiempo de trabajo.

Estos fallos se atribuyen comúnmente a la tensión de resonancia de los álabes en diferentes etapas a determinadas frecuencias de excitación. Se desarrolló un enfoque de red neuronal artificial (RNA) para predecir la vida útil de los álabes. La configuración 08-40-1 (08 entradas, 40 neuronas ocultas y 1 de salida) presentó una excelente concordancia (R2 = 0,97 y RMSE = 0,000255) entre el valor de la vida útil experimental y el simulado considerando la función de transferencia sigmoidal tangente hiperbólica y lineal en la capa oculta y en la capa de salida, respectivamente.

En el siguiente estudio, se llevó a cabo el análisis de sensibilidad, y mostró, además, que todas las variables de entrada (amortiguación, densidad, presión, temperatura, flujo másico, entalpía, frecuencia y magnitudes de vibración) tienen un fuerte efecto en las turbinas de vapor. Sin embargo, la presión del vapor es el parámetro más influyente, con una importancia relativa del 40%, seguido del flujo másico. Por lo tanto, los resultados mostraron que la modelación y simulación con redes neuronales podía predecir y simular de forma eficaz el comportamiento de la estimación del ciclo de vida en los álabes de las turbinas de vapor tipo 110MW.

Redes Neuronales Artificiales, Análisis de fatiga, Grietas de turbina de vapor, Evaluación de la vida útil

Abstract

Steam turbines have many applications in various industrial sectors and, according to common experience, blade failures are the main source of malfunctions of these machines, causing large economic losses in the turbomachinery industry. Turbines are designed to operate under stable operating conditions. However, blade failures have occurred after a short period of operation.

These failures are commonly attributed to blade resonance stress at different stages at certain excitation frequencies. An artificial neural network (ANN) approach was developed to predict blade life. The 08-40-1 configuration (08 inputs, 40 hidden and 1 output neurons) presented an excellent agreement (R2 = 0.97 and RMSE = 0.000255) between the experimental and simulated lifetime value considering the hyperbolic and linear tangent sigmoidal transfer function in the hidden and output layers, respectively. In the following study, the sensitivity analysis was carried out, and further showed that all the input variables (damping, density, pressure, temperature, mass flow, enthalpy, frequency and vibration magnitudes) have a strong effect on steam turbines.

However, steam pressure is the most influential parameter, with a relative importance of 40%, followed by mass flow. Therefore, the results showed that modeling and simulation with neural networks could effectively predict and simulate the life cycle estimation behavior in 110MW type steam turbine blades.

Artificial Neural Networks, Fatigue Analysis, Steam Turbine Cracking, Life Cycle Assessmen

1. Introducción

Uno de los equipos más importantes en las centrales de generación de energía, específicamente en las centrales termoeléctricas son las turbinas de vapor (Figura 1.1.). Sus componentes principales son el rotor y el estator. Un rotor está compuesto por varias etapas llamadas L-0, L-1, L-2, etc. Cada etapa contiene un número determinado de álabes que permiten a través de un flujo de vapor generar movimiento.

Figura 1 Turbina de vapor de 110MW

En una turbina de vapor el fluido entra a alta presión y se expande pasando por varias etapas. Cuando llega a las últimas etapas presenta baja presión y temperatura. En las primeras etapas también llamadas de alta presión, los alabes son cortos creciendo en forma gradual en las etapas intermedias hasta llegar a las últimas etapas también conocidas como de baja presión, estas contienen los alabes más largos, pero igual los cortos que presentan mayor rapidez y por lo tanto sus frecuencias naturales son altas. A medida que el tamaño de los alabes va aumentando, su rigidez va disminuyendo y como consecuencia sus frecuencias naturales también disminuyen.

Esto está en el hecho de que la frecuencia natural depende de la rapidez; a mayor rapidez pues mayor será la frecuencia natural y a menor rigidez, la frecuencia natural será menor. El cálculo de la frecuencia natural es un parámetro de gran importancia ya que permite conocer la frecuencia a la cual un sistema no debe ser excitado, ya que si esto sucede puede aparecer el efecto de la resonancia manifestándose como grandes amplitudes de vibración. Existen diferentes métodos y formas para determinar la frecuencia natural de elementos o sistemas vibratorios, algunos de ellos son analíticos otros son experimentales y en ciertos casos se combinan ambos.

En las turbinas se presenta el fenómeno de resonancia el cual tiene lugar cuando la frecuencia de excitación coincide con la frecuencia natural del sistema. Esto se da porque las turbinas de vapor presentan puntos de resonancia que son causados por la excitación forzada del paso de vapor por las toberas. Las turbinas de vapor están diseñadas para trabajar en condiciones estables de operación, sin embargo, presentan paros y arranques ocasionando que los alabes pasen por sus puntos de resonancia. Estos son causados por las armónicas de velocidad y las NPF (frecuencia de paso de vapor por las toberas, siglas en ingles). Por lo tanto, para conocer las velocidades críticas en cada etapa de la turbina es necesario dibujar el diagrama de Campbell, trazando las frecuencias naturales de los alabes, las NPF y las excitaciones por revolución.

El tamaño de los álabes de la etapa de alta presión está limitado por la disponibilidad de nuevos materiales que puede resistir las condiciones de altas presiones y temperaturas. Mientras que, en los álabes largos de baja presión, las cargas centrifugas dictan la longitud a la cual los álabes pueden ser diseñados. Los alabes de las últimas etapas contribuyen en un mayor rendimiento debido a que producen más energía, pero son componentes que presentan mayores fallas por fractura. Puesto que los álabes de la última etapa son grandes y el flujo se encuentra a bajas presiones se ven afectados considerablemente por la velocidad de rotación y el flujo del vapor. Los álabes son miembros estructurales flexibles dando como resultado que un gran número de sus frecuencias naturales puedan coincidir con frecuencias de excitación. Esto origina que la turbina se diseñe para evitar resonancia en condiciones estables de operación, aunque esto no evita que experimente el fenómeno de resonancia durante paros y arranques. Podemos encontrar en la literatura que la resonancia es un fenómeno que ocurre cuando la frecuencia de excitación coincide con una de las frecuencias naturales, cuando esto sucede los esfuerzos se concentran en una cierta zona del material hasta llegar a la fractura del mismo, estas zonas de concentración de esfuerzos dependen de ciertos factores involucrados con el montaje, las condiciones de inyección del vapor y el diseño de los alabes.

Las turbinas de vapor por estar sujetas a fuerzas provenientes de diferentes fuentes (flujo de vapor, armónicas de giro, desbalance e imperfecciones en la garganta mínima) presentan cargas de tipo alternante y de inestabilidad aerodinámica, originando esfuerzos estáticos y dinámicos. Los esfuerzos estáticos combinados con alguno de los siguientes factores como: la discontinuidad en el material, la velocidad de rotación, el desafinamiento y el diseño del alabe podrían dar lugar al inicio de una grieta, además la resistencia de los alabes se basa únicamente en los esfuerzos estáticos. Los esfuerzos dinámicos son los principales causantes de fatiga ya que son el resultado de cargas cíclicas, estos esfuerzos se presentan por las armónicas de velocidad y por las fuerzas de excitación del vapor. El análisis de los esfuerzos en los alabes es complicado por su geometría y la iteración de varios modos de amortiguamiento en ellos. Las turbinas de vapor de 110 MW pueden ser afectadas ampliamente por la tensión, la fatiga, la corrosión, la fragilidad o el amortiguamiento.

También, el ambiente dentro de las turbinas de vapor y las conexiones de los alabes tiene un efecto negativo en la vida útil de los álabes, principalmente causado por el transporte y concentración de impurezas. De manera similar el material de construcción, sus propiedades como resistencia a la fatiga, esfuerzo de fluencia, esfuerzo ultimo y el factor de amortiguamiento pueden afectar la vida esperada de los alabes. Los principales factores que afectan la vida útil de los álabes son: los esfuerzos, el ambiente, las propiedades del material, cargas estáticas (centrífugas y por presión de vapor) presentes en los álabes móviles, cargas dinámicas (fuerzas de vapor inestables, recirculación) presentes en los alabes móviles, amortiguamiento, frecuencias, vibraciones (se presentan durante el funcionamiento normal de las operaciones propagándose en fatiga), densidades y tensiones.

Nuestra evaluación de vida útil puede maximizar el ciclo de vida de dichas turbinas para el funcionamiento óptimo de una turbina de vapor, se requiere que sus componentes funcionen con eficiencia y con el menor porcentaje de pérdidas. Específicamente, los álabes deben conservar dos características principales: conservar su capacidad de mantener carga sin que sufra una ruptura; y conservar su rigidez dentro de los límites seguros para evitar deformaciones excesivas. Al combinarse diferentes valores de datos de entrada, la vida útil de estos componentes disminuye en gran medida; sin necesidad de presencia de resonancia, esto con la observación de que los valores existentes en la naturaleza no son de carácter determinístico asumiendo ciertos rasgos de aleatoriedad. Sin embargo, el acelerado avance del desarrollo tecnológico en las últimas décadas ha abierto las puertas de diversas áreas del conocimiento humano a la aplicación de la inteligencia artificial donde está el algoritmo Redes Neuronales Artificiales (RNA).

2. Materiales and metodología

La evolución tecnológica, cuyos orígenes se remontan a los comienzos de la historia humana, ha tenido, a partir de la década de los cuarenta, un impulso extraordinario gracias al diseño y la progresiva popularización de máquinas llamadas computadoras u ordenadores. La computadora ha sido definida como una máquina capaz de realizar y controlar a gran velocidad cálculos y procesos complicados que requieren una toma rápida de decisiones. Su función consiste, por tanto, en tratar la información que se le suministra y proveer los resultados requeridos. Sin embargo, este enunciado tan simple está definiendo un hito tradicional. La computadora es, hoy por hoy, incapaz de hacer algo para lo que no ha sido programada. Sin embargo, el progreso que representa en la capacidad para realizar un número muy grande de cálculos a una alta velocidad (milésimas de segundo), permitió el desarrollo de modelos y algoritmos computacionales robustos donde se requiere de muchas operaciones (p.ej., algoritmos de inteligencia artificial: las redes neuronales artificiales, la lógica difusa, los algoritmos genéticos, entre otros, y los métodos estadísticos avanzados como es el caso del método de Monte Carlo).

2.1. Redes Neuronales Artificiales (RNA)

Las neuronas se agrupan en distintas capas y combinados entre sí según una determinada arquitectura. Al igual que en la naturaleza, la función de la red es determinada en gran medida por las conexiones entre dos elementos (neuronas), cada conexión entre dos neuronas tiene un coeficiente de peso que se le atribuye. La estructura de la red estándar para una función de aproximación es la percepción de múltiples capas (feedforward). La red de alimentación hacia adelante tiene a menudo una o más capas ocultas de neuronas sigmoides seguida de una capa de salida de neuronas lineales. Múltiples capas de neuronas con funciones de transferencia no lineal permiten que la red aprenda relaciones no lineales y lineales entre los vectores de entrada y salida.

La capa de salida lineal de la red permite producir valores fuera del rango de -1 a 1 [Aleboyeh et al. 2008]. Para la red, la anotación apropiada se utiliza en las redes de dos capas (capa oculta y capa de salida). El número de neuronas en las capas de entrada y salida se da, respectivamente, por el número de variables de entrada y de salida del proceso de investigación. El número óptimo de neuronas en la capa oculta (s) ns es difícil de precisar, y depende de la complejidad del proceso. Este número se determina generalmente de manera iterativa. Cada neurona en la capa oculta tiene bias b (umbral), que se añade a las entradas ponderadas para formar una n neurona (Ec. 1). Esta suma, n, es el argumento de la función de transferencia f.

$$n_s = Wi_{(1,1)} ln_1 + Wi_{(1,2)} ln_2 + \cdots + Wi_{(1,k)} ln_k + b_1 \quad (1)$$

Los coeficientes asociados a la capa oculta se agrupan en matrices de conexión Wi (pesos) y bi (bias). La capa de salida calcula la suma ponderada de las señales proporcionadas por la capa oculta, y los coeficientes asociados se agrupan en matrices de Wo y b2. Usando la notación de matrices, la salida de la red puede ser dada por (Ec. 2):

$$Out = g(W_o \; x \; f(W_i \; x \; ln + b_1) + b_2) \quad (2)$$

Las neuronas en la capa oculta pueden utilizar cualquier función de transferencia para generar su producción. En este capítulo, se aplica una función de transferencia de tipo tangencial hiperbólica sigmoidal (TANSIG) en la capa oculta y se considera una función de transferencia lineal (PURELIN) en la capa de salida f y g, respectivamente [Demuth y Beale 1998]. El sistema ajusta los pesos de las conexiones internas para minimizar los errores entre la salida de la RNA versus la salida experimental, que pueden resumirse de la siguiente manera: al principio, proponer a un grupo de números aleatorios como los valores iniciales de los pesos y bias, a continuación, calcular la salida de todas las capas por capa de neuronas, comenzando con la capa de entrada, utilizando las Ecs. (3-6):

$$f = TANSIG(W_i * \; ln_k + b1_s) \quad (3)$$

$$f = \frac{2}{1+\exp[-2*(W_i * \; ln_k + b1_s]} - 1 \quad (4)$$

$$g = PURELIN(W_o * f + b2_l) \quad (5)$$

$$g = Out_l \quad (6)$$

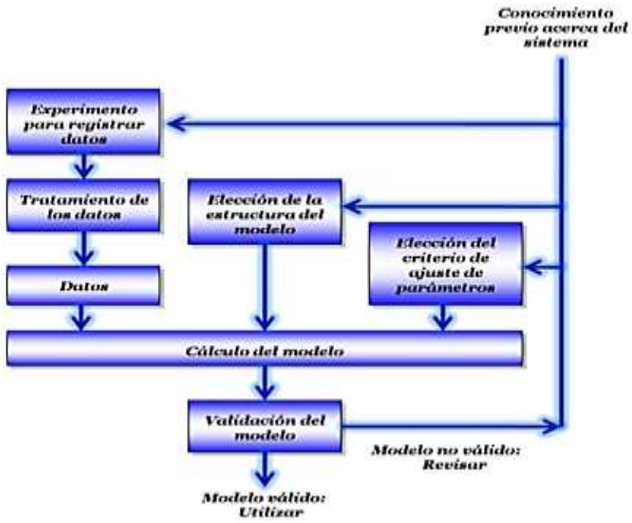
Si tenemos en cuenta las funciones de transferencia, la Ec. 6 puede ser expresada de la siguiente manera (Ec. 7):

$$Out_l = PURELIN\{W_o \times [TANSIG(W_i \times In_k + b1_s)] + b2_l\} \quad (7)$$

Dónde s es el número de neuronas en la capa oculta (S = 3), k es el número de neuronas en la capa de entrada (K=16). l es el número de neuronas en la capa de salida (l = 1). W_i, W_o y $b1_s, b2_l$ son pesos y bias, respectivamente. La Ec. (7) no es compleja porque se compone de una operación aritmética simple. Por lo tanto, puede ser utilizada para la aplicación de estimación en línea de procesos industriales, en tiempo real. La RNA fue entrenada mediante el algoritmo de propagación hacia atrás "Backpropagation".

Cabe mencionar que todos los cálculos se realizaron con el software Matlab considerando la herramienta de neural networks toolbox (RNA). En la figura 2, se muestra el procedimiento de identificación neuronal.

Figura 2 Procedimiento de identificación neuronal



2.2. Aprendizaje de la red neuronal

Un algoritmo de aprendizaje (o entrenamiento) se define como un procedimiento que consiste en ajustar los coeficientes (pesos y bias) de una RNA, para minimizar una función de error entre los valores de salida de la RNA y los valores de salida experimentales [Rumelhart et al. 1986]. Para determinar el algoritmo de aprendizaje más eficiente en el desarrollo de RNA, nosotros hemos evaluado diez algoritmos de propagación hacia atrás (ver Tabla 4.1). Este análisis utiliza cinco neuronas en la capa oculta para todos los algoritmos de propagación. El análisis demostró que el algoritmo de entrenamiento de Levenberg-Marquardt tiene menor valor de la raíz de la sumatoria cuadrada del error promedio $(RMSE)$. También, encontramos que este algoritmo realiza menor tiempo de procesamiento computacional, lo cual lo hace muy rápido en comparación con otros algoritmos de entrenamiento. Lo anterior es debido a que el algoritmo de Levenberg-Marquardt fue diseñado para aproximar las segundas derivadas parciales sin tener que calcular la matriz Hessiana. Cuando la función del desempeño tiene la forma de una suma de cuadrados, entonces la matriz Hessiana se puede aproximar como:

$$H = J^T J \tag{8}$$

El gradiente se puede calcular como:

$$g = J^T e \tag{9}$$

Donde, J, es la matriz Jacobiana que contiene las primeras derivadas de los errores de la red con respecto a los pesos y bias, y e, es un vector de error de la RNA. La matriz jacobiana puede calcularse por medio de una técnica de retropropagación estándar que es mucho menos compleja que la matriz Hessiana. El algoritmo de Levenberg - Marquardt utiliza esta aproximación (Ec.10):

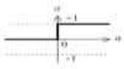
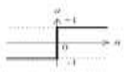
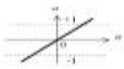
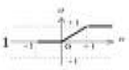
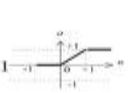
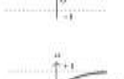
$$X_{k+1} = X_k - [J^T J + \mu I]^{-1} J^T e \tag{10}$$

Cuando el escalar, μ, es cero, esto es sólo el método de Newton utilizando la matriz Hessiana aproximada. Cuando μ es grande, esto se convierte en gradiente descendente con un tamaño de pequeño paso [Khatae y Kasiri 2010].

2.3. Funciones de transferencias empleadas en redes neuronales

Las funciones de transferencias son funciones matemáticas que juegan un papel significativo en el proceso de aprendizaje de redes neuronales. Las principales funciones de transferencias usadas están mostradas en la figura 3:

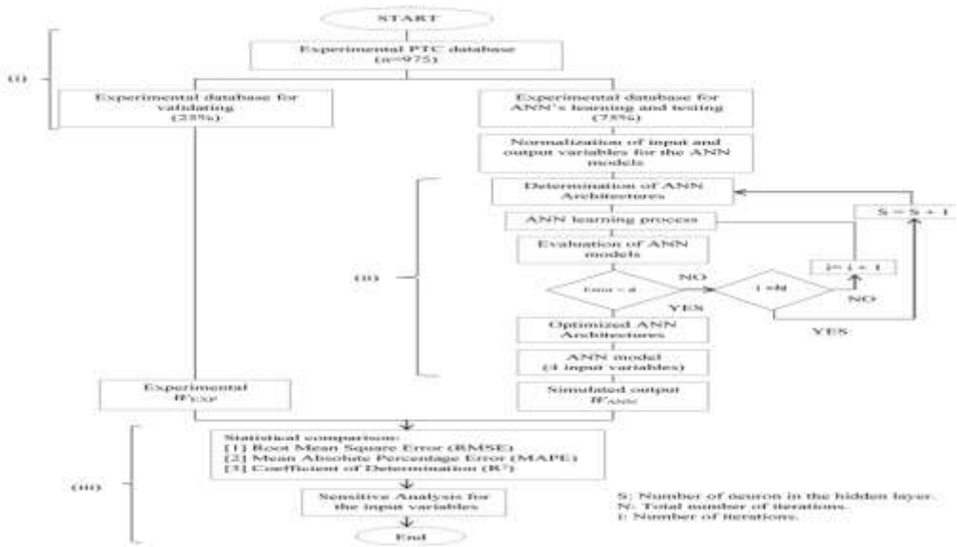
Figura 3 Funciones de transferencias empleadas en redes neuronales

Función	Ecuación	Símbolo	Descripción
Limitador fuerte	$a = \begin{cases} 1 \; si \; n \geq 0, \\ 0 \; si \; n < 0 \end{cases}$		Permite a la neurona clasificar las entradas en dos categorías diferentes, Cierto (1) o Falso (0).
Limitador fuerte simétrico	$a = \begin{cases} 1 \; si \; n \geq 0, \\ -1 \; si \; n < 0 \end{cases}$		Al igual que el limitador fuerte, fuerza a la neurona para generar una salida binaria, ahora entre 1 y -1 con lo cual abarca un mayor rango de valores.
Lineal	$a = n$		La salida de esta función de transferencia es idéntica al valor de la entrada neta.
Lineal saturada	$a = \begin{cases} 0 \; si \; n < 0, \\ n \; si \; 0 \geq n \geq 1 \\ 1 \; si \; n > 1 \end{cases}$		La función toma los valores de entrada netas y reduce la salida en un rango de 0 a 1. Se emplea cuando se poseen variaciones suaves de valores positivos.
Lineal saturada simétrica	$a = \begin{cases} -1 \; si \; n < 0, \\ n \; si \; 0 \geq n \geq 1 \\ 1 \; si \; n > 1 \end{cases}$		La función toma los valores de entrada netas y reduce la salida en un rango de -1 a 1. Se emplea cuando se poseen variaciones suaves de valores positivos y negativos.
Logarítmica sigmoidea	$a = \frac{1}{1+e^{-n}}$		Esta función de transferencia presenta una rápida convergencia. La función toma los valores de entrada netas y reduce la salida en un rango de 0 a 1.
Tangente hiperbólica sigmoidea	$a = \frac{2}{1+e^{-2n}} - 1$		Similar a la anterior, cubre un mayor rango de valores (-1 a 1). Se emplea cuando la velocidad es más importante que la forma de la función de transferencia.

Sin embargo, en la figura 3 muestra el diagrama de flujo para la obtención del modelo RNA para modelar y simular la vida útil de la turbina (VU):

El rendimiento del modelo de RNA es evaluado estadísticamente: por la raíz de la sumatoria cuadrada del error promedio (RMSE) [Hamed et al. 2004; Hernández et al. 2004], por la desviación estándar relativa (RSD) y por el coeficiente de regresión (R^2). Lo anterior se calcula con los valores experimentales y las predicciones de la RNA. Estas Ecs. 11-13, son consideradas como criterio de evaluación de los modelos de RNA:

Figura 4 Diagrama de flujo del RNA para modelar y simular VU



$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(y_{q,pred} - y_{q,exp})^2}{Q}} \tag{11}$$

$$RSD = \frac{RMSE}{y_m} \; x \; 100 \tag{12}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{q=1}^{Q}(y_{q,pred} - y_{q,exp})^2}{\sum_{q=1}^{Q}(y_{q,exp} - y_m)^2} \quad (13)$$

Dónde Q es el número de datos, $y_{q,pred}$ es el valor simulado de la RNA, $y_{q,exp}$es el valor experimental, y_m es el promedio de los valores experimentales.

3. Resultados

Un algoritmo de aprendizaje (o entrenamiento) se define como un procedimiento que consiste en ajustar los coeficientes (pesos y sesgos) que representen los parámetros de la red neuronal, para minimizar una función de error (generalmente cuadrática) entre las salidas de la red, para un conjunto dado de entradas, y las salidas correctas (ya conocidas). Si se utilizan no linealidades suaves, el gradiente de la función de error se puede calcular mediante el procedimiento clásico de retropropagación. Para determinar el mejor algoritmo de entrenamiento, se estudiaron 10 algoritmos de retropropagación. Además, se usaron cuarenta neuronas en la capa oculta para todos los algoritmos de retropropagación. La Tabla 1, muestra una comparación de diferentes algoritmos de entrenamiento de retropropagación. El algoritmo de entrenamiento de retropropagación de Levenberg-Marquardt podría tener un error cuadrático medio (RMSE) más pequeño; por otro lado, encontramos que el entrenamiento con el algoritmo Levenberg Marquardt puede ejecutarse sin problemas en una computadora con una menor especificación de memoria expandida y el tiempo de entrenamiento es más rápido, al respecto de otros algoritmos de retropropagación. Porque, el algoritmo Levenberg-Marquardt fue diseñado para acercarse a la velocidad de entrenamiento de segundo orden sin tener que calcular la matriz hessiana.

Tabla 1 Comparación de 10 algoritmos de Retro-propagación con cinco neuronas en la capa oculta

Algoritmo de Retro-propagación	Función	Error cuadrático medio (RMSE)	Época	Coeficiente de correlación (R^2)	Mejor ecuación lineal
Retropropagación Levenberg-Marquardt	trainlm	0.00235005	1000	0.990	Y=0.990X+0.306
Descenso de gradiente por lotes	traingd	0.01657932	2000	0.998	Y=0.986X+0.927
Descenso de gradiente por lotes con impulso	traingdm	0.01982303	2000	0.987	Y=0.988X+0.837
Retropropagación de gradiente conjugado de Polak-Ribiere	traincgp	0.03267017	2000	0.979	Y=0.957X+2.53
Retropropagación de gradiente conjugado escalado	trainscg	0.44944913	2000	0.974	Y=1.020X-0.783
Retropropagación BFGS cuasi-Newton	trainbfg	0.48619630	2000	0.971	Y=0.982X+1.23
Retropropagación de gradiente conjugado Powell-Beale	traincgb	0.50820237	2000	0.965	Y=0.960X+2.03
Retropropagación secante de un paso	trainoss	0.02753381	2000	0.782	Y=0.617X+45.3
Retropropagación de gradiente conjugado de Fletcher-Reeves	traincgf	0.01756329	2000	0.725	Y=0.425X+34.8
Tasa de aprendizaje variable por retropropagación	traingdx	0.20039637	2000	0.718	Y=0.386X+38

Cuando la función del error tiene la forma de una suma de cuadrados (como es típico en el entrenamiento de redes de retroalimentación), entonces la matriz de Hessiana puede ser aproximada como:

$$H = J^T J \quad (13)$$

Y el gradiente se puede calcular como:

$$g = J^T e \quad (14)$$

Donde ***J*** es la matriz jacobiana que contiene las primeras derivadas de los errores de red con respecto a los pesos y umbrales, y es un vector de errores de red. La matriz jacobiana se puede calcular a través de una técnica de retropropagación estándar que es mucho menos complejo que calcular la matriz de Hessiana. El algoritmo Levenberg-Marquardt utiliza esta aproximación a la matriz Hessiana en la siguiente actualización de Newton:

$$X_{k+1} = X_k - [J^T J + \mu I]^{-1} J^T e \tag{15}$$

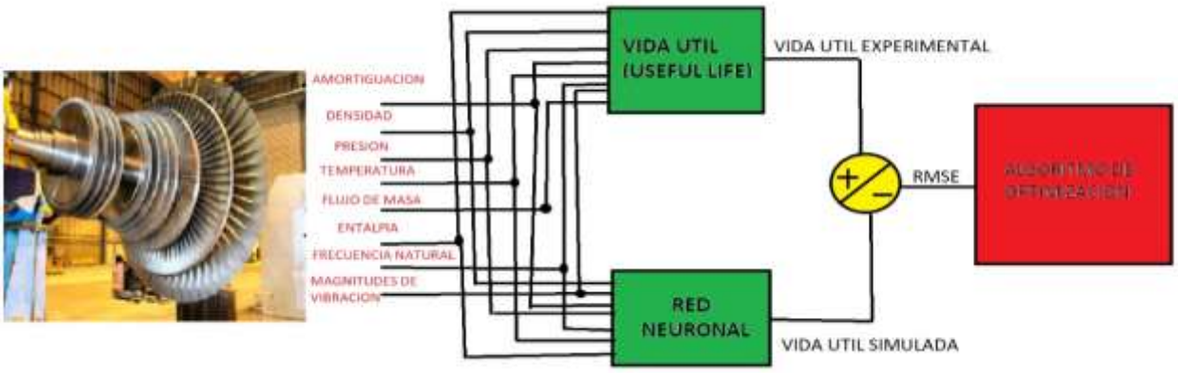
Cuando el sintonizador (μ) l es cero, este es solo el método de Newton, utilizando la matriz aproximada Hessiana. Cuando $\mu = 1$ es grande, éste se convierte en gradiente descendente con un pequeño tamaño de escalón. El método de Newton es más rápido y más preciso cerca de un mínimo de error, por lo que el objetivo es cambiar hacia el método de Newton lo más rápido posible, por lo tanto, μ se reduce después de cada paso exitoso (reducción en la función del error) y se incrementa solo cuando un paso tentativo aumentaría la función del desempeño del error. En este contexto, la función del error siempre se reduce en cada iteración del algoritmo [47]. Entonces, para esta motivación, el algoritmo de Levenberg-Marquardt se consideró el algoritmo de entrenamiento en el presente estudio de investigación. Sin embargo, el rendimiento del modelo RNA ha sido medido estadísticamente por el error cuadrático medio (RMSE), como sus siglas en inglés (Root Mean Square Error) y coeficiente de regresión, que se calcula con los valores experimentales y las predicciones de la red. Estos cálculos son utilizados como criterio para encontrar el modelo adecuado (figura 5), obtenido de la siguiente manera:

$$RMSE = \sqrt{\frac{(\sum_{q=1}^{Q}(y_{q,pred} - y_{q,exp})^2)}{Q}} \tag{16}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{q=1}^{Q}(y_{q,pred} - y_{q,exp})^2}{\sum_{q=1}^{Q}(y_{q,exp} - y_m)^2} \tag{17}$$

Donde Q es el número de datos experimentales, y_{qpred} es la predicción de la red, y_{qexp} es la respuesta experimental, y_m es el promedio de valores reales y_q es un índice de datos. En consecuencia, RMSE se utilizó como la función de error que mide el rendimiento de la red. Por lo tanto, la red que tiene un RMSE mínimo y un R^2 máximo se seleccionó como el mejor modelo neuronal de RNA.

Figura 5 Arquitectura del algoritmo neuronal al respecto de la vida útil y el procedimiento utilizado para el algoritmo aprendizaje



Como mencionamos anteriormente, las variables de entrada a RNA fueron la presión, flujo de masa, amortiguamiento, frecuencia, vibración, entalpia, temperatura y densidad del vapor. Sin embargo, la vida útil fue salida. Las características de las variables de entrada y salida se muestran en la tabla 2, respectivamente.

Tabla 2 Características de las variables de entrada y salida del modelo de red neuronal artificial

Variables de capa de entrada	Rango
Amortiguación ($N\frac{s}{m}$)	[133,171]
Frecuencia natural (Hz)	[8139,11255]
Magnitudes de vibración $\left(\frac{m}{s^2}\right)$	[4472,8236]
Densidad $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$	[370,398]
Presión (MPa)	[1.46,3.34]
Temperatura (ºC)	[385,420]
Flujo de masa $\left(\frac{Kg}{s}\right)$	[551,592]
Entalpia (KJ)	[421062,816958]
Variable de capa de salida	Rango
UL (Vida útil, por siglas en inglés) (Min)	[4850000,5270000]

La topología de una red neuronal artificial está determinada por el número de capas, el número de nodos en cada capa y La naturaleza de las funciones de transferencia. La optimización de la topología RNA es probablemente el paso más importante en el desarrollo de un modelo [47].

Para determinar el número óptimo de neuronas en la capa oculta, se utilizó una serie de topologías, en las que el número de neuronas varió de 1 a 40. Todos los RNA fueron entrenados utilizando diez algoritmos de retropropagación, como ha sido mencionado en la tabla 5.1. La capacitación en red es un proceso mediante el cual el peso y el umbral de conexión en el RNA se adaptan a través de un proceso continuo de simulación por el entorno en el que está incrustada la red. El objetivo principal del entrenamiento es minimizar la función de error (RMSE) buscando un conjunto de pesos (weight) y bias (umbrales) de conexión que provoque que el RNA genera salidas que sean iguales o cercanas al valor objetivo. En otras palabras, el algoritmo de retropropagación minimiza el RMSE entre la salida observada y la predicha en la capa de salida, a través de dos fases. En la fase de avance, la entrada externa señales de información en las neuronas de entrada que se propagan hacia adelante para calcular la señal de información de salida en la neurona de salida.

En la fase hacia atrás, se realizan modificaciones a las fuerzas de conexión, en función de la diferencia en las señales de información predichas y observadas en la neurona de salida [47].

Los conjuntos de datos se dividieron en subconjuntos de entrenamiento, validación y prueba, cada uno de los cuales contiene 5000, 2500 y 2500 muestras, respectivamente. Los conjuntos de validación y prueba, para la evaluación y el modelado de las redes, se seleccionaron aleatoriamente de los datos experimentales. Como la función de transferencia utilizada en la capa oculta era sigmoidal (tansig), todas las muestras deben ser normalizado en el rango de 0.1-0.9. Entonces, todos los conjuntos de datos de entrada xi (de los conjuntos de entrenamiento, validación y prueba) se escalaron a un nuevo valor xi de la siguiente manera:

$$x_i = 0.8\left(\frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}\right) + 0.1 \tag{18}$$

La topología final se obtuvo después de 20000 ejecuciones de 1000 iteraciones (epoch) a partir de pesos iniciales aleatorios. Para cada corrida, se calculó el error de red contra el número de neuronas en la capa oculta. En la figura 6 se ilustra el error de red frente al número de neuronas en la capa oculta. Se descubrió que el rendimiento de la red se estabilizó con cuarenta neuronas en la capa oculta (8–40–1). Entonces, en base a la aproximación de la función del erro (RMSE), se utilizaron una cantidad de neuronas en la capa oculta igual a cuarenta, y una red neuronal de propagación de retroalimentación de tres capas para modelar el proceso como se muestra en la figura 7.

Figura 6 Numero óptimo de neuronas en la capa oculta

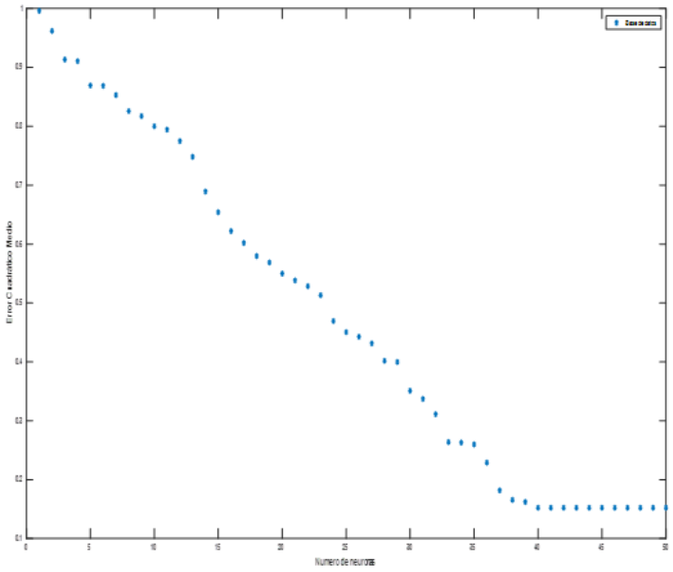
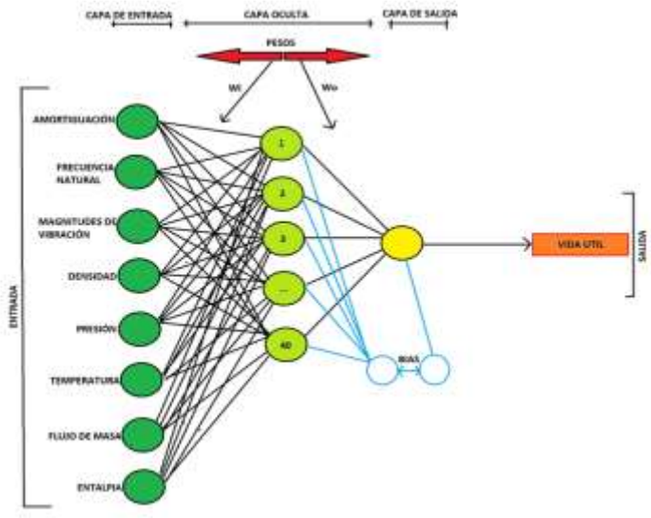


Figura 7 Modelo de predicción de los valores de la vida útil



3.1. Modelo propuesto de red neuronal

Se encontró que una red neuronal con cuarenta neuronas en la capa oculta (que involucra 361 coeficientes: 320 pesos y 41 bias) es eficiente en la predicción de la vida útil. La figura 8, presenta datos experimentales y simulados disponibles para la base de datos de aprendizaje y también ilustra datos experimentales y simulados para probar la base de datos.

Parámetros ajustables obtenidos (pesos y bias) en el modelo propuesto S=40, K=8.														
Pesos de la capa oculta									**Pesos de la capa de salida**		**Bias de la capa oculta**		**Bias de la capa de salida**	
$\boldsymbol{IW}_{(s,}$	$W_{i(1,1)}$ 1.51074 55e+01	$W_{i(1,2)}$ 1.71357 66e+01	$W_{i(1,3)}$ 1.28095 00e+01	$W_{i(1,4)}$ 1.69061 98e+01	$W_{i(1,5)}$ 1.54533 18e+01	$W_{i(1,6)}$ 1.73064 13e+01	$W_{i(1,7)}$ 1.34225 98e+01	$W_{i(1,8)}$ 1.35083 76e+01	$\boldsymbol{W}_{0(s}$	$W_{0(1)}$ 1.25169 77e+05	$\boldsymbol{b1}_{(s}$	$b1_{(1)}$ 3.86021 71e+01	$\boldsymbol{b2}$	1.25175 92e+05
	$W_{i(2,1)}$ 5.12820 82e+01	$W_{i(2.2)}$ 7.54318 83e+01	$W_{i(2,3)}$ 5.63457 77e+01	$W_{i(2,4)}$ 5.29120 83e+01	$W_{i(2,5)}$ 5.00392 40e+01	$W_{i(2,6)}$ 5.86888 87e+01	$W_{i(2,7)}$ 5.57222 55e+01	$W_{i(2,8)}$ 5.60623 62e+01		$W_{0(2)}$ 1.25140 59e+05		$b1_{(2)}$ 1.25411 74e+02		
	$W_{i(3,1)}$ - 3.79821 51e+01	$W_{i(3,2)}$ - 5.71293 88e+01	$W_{i(3,3)}$ - 4.02184 35e+01	$W_{i(3,4)}$ - 4.66912 32e+01	$W_{i(3,5)}$ - 4.53767 28e+01	$W_{i(3,6)}$ - 4.73570 93e+01	$W_{i(3,7)}$ - 4.25122 82e+01	$W_{i(3,8)}$ - 4.51770 53e+01		$W_{0(3)}$ - 1.25110 83e+05		$b1_{(3)}$ - 9.54908 46e+01		
	$W_{i(4,1)}$ - 4.89639 45e+01	$W_{i(4,2)}$ - 7.41272 32e+01	$W_{i(4,3)}$ - 5.82318 28e+01	$W_{i(4,4)}$ - 5.50429 15e+01	$W_{i(4,5)}$ - 5.02979 56e+01	$W_{i(4,6)}$ - 6.12251 26e+01	$W_{i(4,7)}$ - 5.42797 68e+01	$W_{i(4,8)}$ - 6.02551 65e+01		$W_{0(4)}$ - 1.25142 65e+05		$b1_{(4)}$ - 1.23950 78e+02		
	$W_{i(5,1)}$	$W_{i(5,2)}$	$W_{i(5,3)}$	$W_{i(5,4)}$	$W_{i(5,5)}$	$W_{i(5,6)}$	$W_{i(5,7)}$	$W_{i(5,8)}$		$W_{0(5)}$		$b1_{(5)}$		

	-2.99338 04e+01	-3.60781 30e+01	-2.52453 12e+01	-3.07478 34e+01	-3.19544 53e+01	-3.36358 21e+01	-2.99143 78e+01	-2.65221 15e+01		-1.25162 24e+05		-6.88513 28e+01	
	$W_{i(6,1)}$ -2.18224 71e+01	$W_{i(6,2)}$ -2.77847 60e+01	$W_{i(6,3)}$ -1.84654 72e+01	$W_{i(6,4)}$ -2.37892 45e+01	$W_{i(6,5)}$ -2.44378 10e+01	$W_{i(6,6)}$ -2.81725 96e+01	$W_{i(6,7)}$ -2.00503 87e+01	$W_{i(6,8)}$ -2.13467 13e+01		$W_{0(6)}$ -1.25164 23e+05		$b1_{(6)}$ -5.04923 06e+01	
	$W_{i(7,1)}$ -2.71892 16e+01	$W_{i(7,2)}$ -5.06239 11e+01	$W_{i(7,3)}$ -3.74433 13e+01	$W_{i(7,4)}$ -3.89785 95e+01	$W_{i(7,5)}$ -2.58595 76e+01	$W_{i(7,6)}$ -4.18808 58e+01	$W_{i(7,7)}$ -3.66224 68e+01	$W_{i(7,8)}$ -4.60804 89e+01		$W_{0(7)}$ -1.25090 30e+05		$b1_{(7)}$ -7.80229 28e+01	
	$W_{i(8,1)}$ -3.32615 24e+01	$W_{i(8,2)}$ -4.36208 28e+01	$W_{i(8,3)}$ -2.98601 46e+01	$W_{i(8,4)}$ -3.19188 40e+01	$W_{i(8,5)}$ -3.34605 42e+01	$W_{i(8,6)}$ -3.76298 45e+01	$W_{i(8,7)}$ -3.30866 65e+01	$W_{i(8,8)}$ -2.97914 52e+01		$W_{0(8)}$ -1.25158 48e+05		$b1_{(8)}$ -7.66688 25e+01	
	$W_{i(9,1)}$ 2.60264 60e+01	$W_{i(9,2)}$ 3.50213 69e+01	$W_{i(9,3)}$ 2.46488 99e+01	$W_{i(9,4)}$ 2.83651 68e+01	$W_{i(9,5)}$ 2.84347 77e+01	$W_{i(9,6)}$ 2.98847 08e+01	$W_{i(9,7)}$ 2.87624 07e+01	$W_{i(9,8)}$ 2.37216 16e+01		$W_{0(9)}$ 1.25164 69e+05		$b1_{(9)}$ 6.62212 25e+01	
	$W_{i(10,1)}$ -4.93527 35e+01	$W_{i(10,2)}$ -7.36325 48e+01	$W_{i(10,3)}$ -5.51818 35e+01	$W_{i(10,4)}$ -5.36169 87e+01	$W_{i(10,5)}$ -5.23795 98e+01	$W_{i(10,6)}$ -6.35553 24e+01	$W_{i(10,7)}$ -5.49247 41e+01	$W_{i(10,8)}$ -5.40650 60e+01		$W_{0(10)}$ -1.25135 68e+05		$b1_{(10)}$ -1.27122 13e+02	
	$W_{i(11,1)}$ 4.20701 17e+01	$W_{i(11,2)}$ 6.03345 83e+01	$W_{i(11,3)}$ 4.62833 96e+01	$W_{i(11,4)}$ 4.45131 74e+01	$W_{i(11,5)}$ 4.28185 16e+01	$W_{i(11,6)}$ 5.35008 47e+01	$W_{i(11,7)}$ 4.37255 21e+01	$W_{i(11,8)}$ 4.49835 20e+01		$W_{0(11)}$ 1.25139 12e+05		$b1_{(11)}$ 9.93517 51e+01	
	$W_{i(12,1)}$ 1.60427 14e+01	$W_{i(12,2)}$ 2.78865 80e+01	$W_{i(12,3)}$ 2.65330 68e+01	$W_{i(12,4)}$ 1.71635 76e+01	$W_{i(12,5)}$ 1.77419 08e+01	$W_{i(12,6)}$ 1.99752 22e+01	$W_{i(12,7)}$ 2.28623 31e+01	$W_{i(12,8)}$ 2.79021 79e+01		$W_{0(12)}$ 1.25086 39e+05		$b1_{(12)}$ 5.85415 43e+01	
	$W_{i(13,1)}$ 1.77900 41e+03	$W_{i(13,2)}$ 2.03456 50e+03	$W_{i(13,3)}$ 1.70081 71e+03	$W_{i(13,4)}$ 1.38091 10e+03	$W_{i(13,5)}$ 1.64809 50e+03	$W_{i(13,6)}$ 2.04411 52e+03	$W_{i(13,7)}$ 1.84157 72e+03	$W_{i(13,8)}$ 1.29806 16e+03		$W_{0(13)}$ 1.25121 81e+05		$b1_{(13)}$ 3.66116 31e+03	
	$W_{i(14,1)}$ 2.42844 35e+01	$W_{i(14,2)}$ 3.79517 16e+01	$W_{i(14,3)}$ 2.99031 73e+01	$W_{i(14,4)}$ 2.85373 54e+01	$W_{i(14,5)}$ 2.45067 64e+01	$W_{i(14,6)}$ 2.90574 08e+01	$W_{i(14,7)}$ 2.44345 09e+01	$W_{i(14,8)}$ 3.02966 54e+01		$W_{0(14)}$ 1.25134 86e+05		$b1_{(14)}$ 6.04640 99e+01	
	$W_{i(15,1)}$ 3.29998 00e+03	$W_{i(15,2)}$ 5.24823 47e+03	$W_{i(15,3)}$ 4.46771 49e+03	$W_{i(15,4)}$ 3.45748 48e+03	$W_{i(15,5)}$ 3.25075 92e+03	$W_{i(15,6)}$ 4.07129 06e+03	$W_{i(15,7)}$ 3.64009 41e+03	$W_{i(15,8)}$ 4.45716 81e+03		$W_{0(15)}$ 1.25016 59e+05		$b1_{(15)}$ 9.00724 46e+03	
	$W_{i(16,1)}$ 2.99513 32e+02	$W_{i(16,2)}$ 2.21226 94e+02	$W_{i(16,3)}$ 1.90116 02e+02	$W_{i(16,4)}$ 3.90698 28e+02	$W_{i(16,5)}$ 3.25605 54e+02	$W_{i(16,6)}$ 3.81489 16e+02	$W_{i(16,7)}$ 2.86017 40e+02	$W_{i(16,8)}$ 2.94601 36e+02		$W_{0(16)}$ 1.25081 98e+05		$b1_{(16)}$ 6.16272 87e+02	
	$W_{i(17,1)}$ 2.57273 83e+01	$W_{i(17,2)}$ 3.81150 74e+01	$W_{i(17,3)}$ 2.83434 77e+01	$W_{i(17,4)}$ 2.88580 48e+01	$W_{i(17,5)}$ 2.41697 43e+01	$W_{i(17,6)}$ 3.34650 24e+01	$W_{i(17,7)}$ 2.48319 55e+01	$W_{i(17,8)}$ 2.81366 72e+01		$W_{0(17)}$ 1.25142 12e+05		$b1_{(17)}$ 6.08819 27e+01	
	$W_{i(18,1)}$ -3.10306 74e+01	$W_{i(18,2)}$ -5.53057 42e+01	$W_{i(18,3)}$ -5.51615 00e+01	$W_{i(18,4)}$ -2.98617 86e+01	$W_{i(18,5)}$ -2.83320 34e+01	$W_{i(18,6)}$ -3.70349 15e+01	$W_{i(18,7)}$ -3.21460 01e+01	$W_{i(18,8)}$ -5.04201 06e+01		$W_{0(18)}$ -1.25168 88e+05		$b1_{(18)}$ -9.54323 97e+01	
	$W_{i(19,1)}$ 1.64188 18e+00	$W_{i(19,2)}$ 4.00374 40e+00	$W_{i(19,3)}$ 6.38674 38e+00	$W_{i(19,4)}$ 3.02734 72e+00	$W_{i(19,5)}$ 4.07437 02e+00	$W_{i(19,6)}$ 6.63308 28e+00	$W_{i(19,7)}$ 7.41067 58e+00	$W_{i(19,8)}$ 5.03220 17e+00		$W_{0(19)}$ 1.25130 25e+05		$b1_{(19)}$ 1.18964 32e+01	
	$W_{i(20,1)}$ 3.48282 26e+00	$W_{i(20,2)}$ -3.78936 40e-02	$W_{i(20,3)}$ 1.33178 80e+00	$W_{i(20,4)}$ 1.11837 38e+00	$W_{i(20,5)}$ -1.69156 97e+00	$W_{i(20,6)}$ 2.98649 85e+00	$W_{i(20,7)}$ -3.44794 33e+00	$W_{i(20,8)}$ 2.25238 39e+00		$W_{0(20)}$ 1.25073 42e+05		$b1_{(20)}$ -9.92438 03e-01	
	$W_{i(21,1)}$ -9.00321 51e+00	$W_{i(21,2)}$ -1.42142 51e+01	$W_{i(21,3)}$ -1.05398 97e+01	$W_{i(21,4)}$ -9.23492 13e+00	$W_{i(21,5)}$ -1.13481 96e+01	$W_{i(21,6)}$ -1.46441 96e+01	$W_{i(21,7)}$ -9.61355 36e+00	$W_{i(21,8)}$ -1.04935 05e+01		$W_{0(21)}$ -1.25171 11e+05		$b1_{(21)}$ -1.92543 66e+01	
	$W_{i(22,1)}$ -7.81819 11e-01	$W_{i(22,2)}$ -4.89688 33e+00	$W_{i(22,3)}$ -3.56725 07e-01	$W_{i(22,4)}$ -2.12585 25e+00	$W_{i(22,5)}$ -1.85906 51e+00	$W_{i(22,6)}$ -5.27688 15e+00	$W_{i(22,7)}$ -3.02388 41e-01	$W_{i(22,8)}$ -4.96916 74e+00		$W_{0(22)}$ -1.25172 63e+05		$b1_{(22)}$ -7.38989 05e+00	
	$W_{i(23,1)}$ 2.44111 15e+00	$W_{i(23,2)}$ 2.84222 21e+00	$W_{i(23,3)}$ 5.88055 39e+00	$W_{i(23,4)}$ 2.14584 73e+00	$W_{i(23,5)}$ 3.12015 61e+00	$W_{i(23,6)}$ 5.94268 71e+00	$W_{i(23,7)}$ 7.33231 86e-01	$W_{i(23,8)}$ 3.81015 07e+00		$W_{0(23)}$ 1.25170 64e+05		$b1_{(23)}$ 1.09955 66e+01	
	$W_{i(24,1)}$ -5.98914 39e+00	$W_{i(24,2)}$ -6.03482 04e+00	$W_{i(24,3)}$ -4.19516 78e+00	$W_{i(24,4)}$ -1.12354 16e+00	$W_{i(24,5)}$ -5.28894 79e+00	$W_{i(24,6)}$ -5.04357 81e+00	$W_{i(24,7)}$ -5.85616 70e+00	$W_{i(24,8)}$ -3.69239 74e+00		$W_{0(24)}$ -1.25156 78e+05		$b1_{(24)}$ -6.60817 97e+00	
	$W_{i(25,1)}$ 3.29125 17e+01	$W_{i(25,2)}$ 4.55027 16e+01	$W_{i(25,3)}$ 3.29807 39e+01	$W_{i(25,4)}$ 3.09625 32e+01	$W_{i(25,5)}$ 3.22422 39e+01	$W_{i(25,6)}$ 3.70950 92e+01	$W_{i(25,7)}$ 3.16027 25e+01	$W_{i(25,8)}$ 3.50513 47e+01		$W_{0(25)}$ 1.25139 46e+05		$b1_{(25)}$ 7.60012 39e+01	
	$W_{i(26,1)}$ 1.68422 74e+01	$W_{i(26,2)}$ 2.29390 66e+01	$W_{i(26,3)}$ 1.56131 39e+01	$W_{i(26,4)}$ 1.56360 46e+01	$W_{i(26,5)}$ 1.56667 89e+01	$W_{i(26,6)}$ 1.42883 02e+01	$W_{i(26,7)}$ 1.65665 99e+01	$W_{i(26,8)}$ 1.42635 99e+01		$W_{0(26)}$ 1.25107 38e+05		$b1_{(26)}$ 2.90061 88e+01	
	$W_{i(27,1)}$ -4.59944 92e+00	$W_{i(27,2)}$ -3.02119 12e+00	$W_{i(27,3)}$ -1.98602 72e+00	$W_{i(27,4)}$ -5.09333 45e+00	$W_{i(27,5)}$ -1.11995 79e+00	$W_{i(27,6)}$ -3.63494 57e+00	$W_{i(27,7)}$ -8.13579 90e-01	$W_{i(27,8)}$ -4.22880 23e+00		$W_{0(27)}$ -1.25173 02e+05		$b1_{(27)}$ -8.96746 05e+00	
	$W_{i(28,1)}$ -6.26235 15e-01	$W_{i(28,2)}$ 5.43041 42e-01	$W_{i(28,3)}$ -5.79175 00e-01	$W_{i(28,4)}$ -9.49506 32e-02	$W_{i(28,5)}$ -1.38781 65e+00	$W_{i(28,6)}$ -2.98336 44e-01	$W_{i(28,7)}$ -1.39279 24e+00	$W_{i(28,8)}$ 6.37319 52e-01		$W_{0(28)}$ -2.36870 99e+05		$b1_{(28)}$ 9.75284 09e-01	
	$W_{i(29,1)}$	$W_{i(29,2)}$	$W_{i(29,3)}$	$W_{i(29,4)}$	$W_{i(29,5)}$	$W_{i(29,6)}$	$W_{i(29,7)}$	$W_{i(29,8)}$		$W_{0(29)}$		$b1_{(29)}$	

	-4.38806 29e+01	-5.72364 21e+01	-3.92301 87e+01	-3.72452 01e+01	-4.90864 16e+01	-4.88434 60e+01	-3.80825 86e+01	-2.86852 40e+01		-1.25167 34e+05		-9.49940 78e+01	
	$W_{i(30,1)}$ -5.56560 41e+00	$W_{i(30,2)}$ -4.03255 91e+00	$W_{i(30,3)}$ -2.80019 79e+00	$W_{i(30,4)}$ -3.03525 50e+00	$W_{i(30,5)}$ -1.17332 51e+00	$W_{i(30,6)}$ -1.23531 85e+00	$W_{i(30,7)}$ -6.82084 62e-01	$W_{i(30,8)}$ -3.61902 29e+00		$W_{0(30)}$ -1.25174 46e+05		$b1_{(30)}$ -9.94676 50e+00	
	$W_{i(31,1)}$ -2.04825 61e+01	$W_{i(31,2)}$ -2.35039 07e+01	$W_{i(31,3)}$ -1.82245 97e+01	$W_{i(31,4)}$ -1.88478 93e+01	$W_{i(31,5)}$ -1.86643 86e+01	$W_{i(31,6)}$ -1.98395 01e+01	$W_{i(31,7)}$ -1.64030 02e+01	$W_{i(31,8)}$ -1.59650 35e+01		$W_{0(31)}$ -1.25165 91e+05		$b1_{(31)}$ -4.13629 02e+01	
	$W_{i(32,1)}$ -8.88676 99e-01	$W_{i(32,2)}$ -5.18111 29e+00	$W_{i(32,3)}$ -2.39821 15e+00	$W_{i(32,4)}$ -6.36144 46e+00	$W_{i(32,5)}$ -1.92355 35e+00	$W_{i(32,6)}$ -6.27824 62e+00	$W_{i(32,7)}$ -1.66083 35e-01	$W_{i(32,8)}$ -6.46595 74e+00		$W_{0(32)}$ -1.24278 11e+05		$b1_{(32)}$ -8.74544 99e+00	
	$W_{i(33,1)}$ 2.39881 26e+01	$W_{i(33,2)}$ 2.77675 92e+01	$W_{i(33,3)}$ 1.26300 66e+01	$W_{i(33,4)}$ 2.62105 01e+01	$W_{i(33,5)}$ 2.39902 70e+01	$W_{i(33,6)}$ 2.99946 54e+01	$W_{i(33,7)}$ 1.93047 96e+01	$W_{i(33,8)}$ 1.60488 11e+01		$W_{0(33)}$ 1.25086 25e+05		$b1_{(33)}$ 4.59130 29e+01	
	$W_{i(34,1)}$ -1.80723 64e+01	$W_{i(34,2)}$ -2.28558 12e+01	$W_{i(34,3)}$ -2.56585 85e+01	$W_{i(34,4)}$ -1.09565 55e+01	$W_{i(34,5)}$ -1.11596 42e+01	$W_{i(34,6)}$ -1.73082 52e+01	$W_{i(34,7)}$ -1.57228 50e+01	$W_{i(34,8)}$ -1.71819 67e+01		$W_{0(34)}$ -1.25087 31e+05		$b1_{(34)}$ -4.83774 67e+01	
	$W_{i(35,1)}$ -5.60621 69e+01	$W_{i(35,2)}$ -8.09629 48e+01	$W_{i(35,3)}$ -6.40119 01e+01	$W_{i(35,4)}$ -5.64879 39e+01	$W_{i(35,5)}$ -5.32657 79e+01	$W_{i(35,6)}$ -5.96255 23e+01	$W_{i(35,7)}$ -5.96085 51e+01	$W_{i(35,8)}$ -6.71414 40e+01		$W_{0(35)}$ -1.25100 92e+05		$b1_{(35)}$ -1.30451 78e+02	
	$W_{i(36,1)}$ -5.03013 45e+00	$W_{i(36,2)}$ -3.24844 06e+00	$W_{i(36,3)}$ -1.42112 58e+00	$W_{i(36,4)}$ -9.91871 86e-01	$W_{i(36,5)}$ -4.69167 14e+00	$W_{i(36,6)}$ -1.09066 12e+00	$W_{i(36,7)}$ -3.46455 25e+00	$W_{i(36,8)}$ -5.57922 10e+00		$W_{0(36)}$ -1.25175 59e+05		$b1_{(36)}$ -9.57877 87e+00	
	$W_{i(37,1)}$ -6.51286 71e+00	$W_{i(37,2)}$ -1.01817 02e+01	$W_{i(37,3)}$ -1.10794 33e+01	$W_{i(37,4)}$ -9.02267 37e+00	$W_{i(37,5)}$ -7.07419 18e+00	$W_{i(37,6)}$ -8.62556 19e+00	$W_{i(37,7)}$ -4.75489 80e+00	$W_{i(37,8)}$ -6.27608 70e+00		$W_{0(37)}$ -1.25173 50e+05		$b1_{(37)}$ -1.69752 64e+01	
	$W_{i(38,1)}$ -6.47420 37e+01	$W_{i(38,2)}$ -9.36881 15e+01	$W_{i(38,3)}$ -7.18838 81e+01	$W_{i(38,4)}$ -6.92895 99e+01	$W_{i(38,5)}$ -6.85421 77e+01	$W_{i(38,6)}$ -7.94263 16e+01	$W_{i(38,7)}$ -6.77379 83e+01	$W_{i(38,8)}$ -7.36591 70e+01		$W_{0(38)}$ -1.25117 34e+05		$b1_{(38)}$ -1.48468 67e+02	
	$W_{i(39,1)}$ -4.30747 41e+00	$W_{i(39,2)}$ -5.28675 74e+00	$W_{i(39,3)}$ -1.78862 94e+00	$W_{i(39,4)}$ -2.56407 56e+00	$W_{i(39,5)}$ -2.03445 63e+00	$W_{i(39,6)}$ -5.38071 35e+00	$W_{i(39,7)}$ -5.27702 07e+00	$W_{i(39,8)}$ -3.68993 02e+00		$W_{0(39)}$ -1.25174 74e+05		$b1_{(39)}$ -1.40001 31e+01	
	$W_{i(40,1)}$ -2.11706 49e+01	$W_{i(40,2)}$ -3.08652 14e+01	$W_{i(40,3)}$ -2.69385 68e+01	$W_{i(40,4)}$ -3.40781 73e+01	$W_{i(40,5)}$ -2.70030 56e+01	$W_{i(40,6)}$ -2.75369 36e+01	$W_{i(40,7)}$ -2.26441 81e+01	$W_{i(40,8)}$ -3.54436 53e+01		$W_{0(40)}$ -1.25085 40e+05		$b1_{(40)}$ -5.63768 68e+01	

$$UsefulLife\ (UL) = \sum_{s=1}^{S}\left[W_{0(1,s)}\left(\frac{2}{1+exp\left(-2\left(\sum_{k=1}^{K}\left(W_{i(s,k)}ln_{(k)}\right)+b1_{(s)}\right)\right)}-1\right)\right]+b2_{(l)} \quad (19)$$

Donde ***S*** es el número de neuronas en la capa oculta (*S = 40*), k es el número de la entrada (*K = 8*), y W_i, W_o y b son peso y bias, respectivamente.

$$\text{UL}= 2\left[\frac{W_{o(1,1)}}{1+e^{X1}}+\frac{W_{o(1,2)}}{1+e^{X2}}+\frac{W_{o(1,3)}}{1+e^{X3}}+\frac{W_{o(1,4)}}{1+e^{X4}}+\frac{W_{o(1,5)}}{1+e^{X5}}+\frac{W_{o(1,6)}}{1+e^{X6}}+\frac{W_{o(1,7)}}{1+e^{X7}}+\frac{W_{o(1,8)}}{1+e^{X8}}+\frac{W_{o(1,9)}}{1+e^{X9}}+\frac{W_{o(1,10)}}{1+e^{X10}}+\frac{W_{o(1,11)}}{1+e^{X11}}+\frac{W_{o(1,12)}}{1+e^{X12}}+\frac{W_{o(1,13)}}{1+e^{X13}}+\frac{W_{o(1,14)}}{1+e^{X14}}+\frac{W_{o(1,15)}}{1+e^{X15}}+\frac{W_{o(1,16)}}{1+e^{X16}}+\frac{W_{o(1,17)}}{1+e^{X17}}+\frac{W_{o(1,18)}}{1+e^{X18}}+\frac{W_{o(1,19)}}{1+e^{X19}}+\frac{W_{o(1,20)}}{1+e^{X20}}+\frac{W_{o(1,21)}}{1+e^{X21}}+\frac{W_{o(1,22)}}{1+e^{X22}}+\frac{W_{o(1,23)}}{1+e^{X23}}+\frac{W_{o(1,24)}}{1+e^{X24}}+\frac{W_{o(1,25)}}{1+e^{X25}}+\frac{W_{o(1,26)}}{1+e^{X26}}+\frac{W_{o(1,27)}}{1+e^{X27}}+\frac{W_{o(1,28)}}{1+e^{X28}}+\frac{W_{o(1,29)}}{1+e^{X29}}+\frac{W_{o(1,30)}}{1+e^{X30}}+\frac{W_{o(1,31)}}{1+e^{X31}}+\frac{W_{o(1,32)}}{1+e^{X32}}+\frac{W_{o(1,33)}}{1+e^{X33}}+\frac{W_{o(1,34)}}{1+e^{X34}}+\frac{W_{o(1,35)}}{1+e^{X35}}+\frac{W_{o(1,36)}}{1+e^{X36}}+\frac{W_{o(1,37)}}{1+e^{X37}}+\frac{W_{o(1,38)}}{1+e^{X38}}+\frac{W_{o(1,39)}}{1+e^{X39}}+\frac{W_{o(1,40}}{1+e^{X40}}\right]\ldots$$

$$-\left(W_{o(1,1)}+W_{o(1,2)}+W_{o(1,3)}+W_{o(1,4)}+W_{o(1,5)}+W_{o(1,6)}+W_{o(1,7)}+W_{o(1,8)}+W_{o(1,9)}+W_{o(1,10)}+W_{o(1,11)}+W_{o(1,12)}+W_{o(1,13)}+W_{o(1,14)}+W_{o(1,15)}+W_{o(1,16)}+W_{o(1,17)}+W_{o(1,18)}+W_{o(1,19)}+W_{o(1,20)}+W_{o(1,21)}+W_{o(1,22)}+W_{o(1,23)}+W_{o(1,24)}+W_{o(1,25)}+W_{o(1,26)}+W_{o(1,27)}+W_{o(1,28)}+W_{o(1,29)}+W_{o(1,30)}+W_{o(1,31)}+W_{o(1,32)}+W_{o(1,33)}+W_{o(1,34)}+W_{o(1,35)}+W_{o(1,36)}+W_{o(1,37)}+W_{o(1,38)}+W_{o(1,39)}+W_{o(1,40)}\right)+b2_{(1)} \quad (20)$$

En la ecuación 19, describe el comportamiento de la vida útil de la turbina de vapor de 110MW, que ha sido inspirado del algoritmo neuronal. Sin embargo, antes de desarrollar la ecuación de la vida útil, tenemos que denotar las siguientes variables para simplificar el cálculo:

V1 = Amortiguación (N s/m)
V2 = Frecuencia natural (Hz)
V3 = Magnitudes de vibración (m/s^2)
V4 = Densidad (Kg/m^3)
V5 = Presión (MPa)
V6 = Temperatura (ºC)
V7 = Flujo de masa (Kg/s)
V8 = Entalpia (KJ)

Sin embargo, la salida está representada la vida útil, por sus siglas en inglés (useful life) (UL) en minutos.

4. Conclusiones

Las redes neuronales artificiales se han utilizado ampliamente en el modelado y la simulación de turbinas de vapor dentro de la industria de la energía eléctrica que proporcionan energía eléctrica a los clientes. Las redes neuronales también se han aplicado a diversos problemas en el diseño y desarrollo del sistema de energía desde la década de 1990. El análisis de fallas de ingeniería en alabes de turbinas de vapor es, en general, bastante complejo, debido a la complejidad de resolver la ecuación que involucra las variables operaciones como: presión, flujo de masa, amortiguamiento, frecuencia, vibración, entalpia, temperatura y densidad de vapor. Este trabajo de tesis de Ingeniería Mecatrónica confirma que el modelado de RNA es un enfoque efectivo y simple para describir con éxito el comportamiento de estos procesos complejos, en los que las variables operacionales muestran un efecto combinado, dentro del rango experimental de condiciones de operaciones investigadas. Las RNA son capaces de simular las complejas relaciones existentes entre las variables de proceso de entrada y salida en el análisis de fallas de ingeniería en alabes de turbinas de vapor.

Por lo tanto, el parámetro de vida útil ha sido predicho exitosamente, mediante redes neuronales de tres capas, una capa de entrada de 08 variables, capa oculta de 40 neuronas y capa de salida de una sola neurona, y usando diferentes algoritmos de aprendizaje de tipo retropropagación (backpropagation), lo cual el mejor fue el algoritmo de Levenberg Marquardt. Se realizaron simulaciones basadas en el modelo RNA para estimar el comportamiento del sistema en diferentes condiciones. Los resultados obtenidos por el modelo neuronal (RNA) muestran un alto acuerdo con los resultados experimentales: muy buena correlación (R^2= 0.97) y pequeño error ({RMSE = 0.000255}).

En general, a medida que aumenta el número de componentes con fallas simultáneas, disminuye la confiabilidad de la red para evaluar con precisión la falla. Una forma de mejorar esta fiabilidad sería el aumento de la información de sensores al considerar los datos en diferentes puntos de operación en las turbinas de vapor, también conocido como análisis de múltiples puntos de operación. Sin embargo, la metodología descrita se ha probado con datos no utilizados para la generalización. Además, se confirmó un nivel muy alto de confianza para el modelo neuronal con la prueba estadística de intercepción y pendiente (99%). Según el análisis de sensibilidad, encontramos que la presión del vapor es el parámetro más influyente. Brevemente, en esta tesis de licenciatura del programa educativo de ingeniero mecatrónica, de la facultad de ingeniería de la Universidad Autónoma del Carmen, hemos logrado que las redes neuronales artificiales representan una metodología relativamente nueva para el modelado predictivo en turbinas de vapor de 110MW. El algoritmo de RNA es una forma de inteligencia artificial basada libremente en el cerebro, que ha demostrado la capacidad de aprender relaciones complejas y sutiles entre las variables de la turbina de vapor. A diferencia de las técnicas estadísticas tradicionales, los RNA son capaces de resolver automáticamente estas relaciones sin la necesidad de suposiciones a priori sobre la naturaleza de las interacciones entre las variables.

En este momento, la mayoría de los científicos e ingenieros de todo el mundo estaban dispuestos a aceptar la red neuronal artificial, como una herramienta poderosa de modelar fenómenos complejos y caóticos, porque (RNA) ha sido perfectamente de acuerdo con el experimento.

A pesar del importante papel que desempeñan las redes neuronales. Sin embargo, los RNA tienen debilidades como:

- La estructura de red óptima para un problema dado generalmente no se conoce.
- El criterio para la selección de los mejores algoritmos de entrenamiento para la convergencia rápida de los nuevos patrones dados no es entendido tampoco trivial.
- Las reglas para seleccionar la cantidad y el tipo de datos para la generalización a fin de mejorar la calidad de la red son mínimas.
- La convergencia de los algoritmos de entrenamiento no está garantizada
- Largos tiempos de entrenamiento / adaptación, incluido simulaciones

Referencias

[1] Stultz SC, Kitto JB. Steam, its generation and use. 40th ed. Barberton: The Babcock & Wilcox; 1992.

[2] Mazur Zdzislaw, Garcia-Illescas Rafael, Aguirre-Romano Jorge, Perez-Rodriguez Norberto. Steam turbine blade failure analysis. Eng Fail Anal 2008;15:129–41.

[3] Dorfman LS, Trubelja M. Torsional monitoring of turbine-generators for incipient failure detection. In: Proceedings of the 6th EPRI steam turbine/generator workshop, St. Luis, Missouri; 1999.

[4] Rosario DA. L-0 failure investigation at south Texas project. In: Proceedings of the 8th EPRI turbine-generator conference, Nashville, Tennesee; 2003.

[5] Trumpler WE, Owens HM. Turbine-blade vibration and strength. Trans ASME 1955;77:337–41.

[6] Garcia JC. Determination of induced forces by steam flow in turbines. Doctoral thesis, CIICAp, Cuernavaca, Morelos; 2008 [in Spanish].

[7] Vyas NS, Rao JS. Fatigue life estimation procedure for a turbine blade under transient loads. J Eng Gas Turb Power 1994;116:198–206.

[8] Smith SM. Vibration of turbine blades in packets. In: Proceedings of the 7th international congress for applied mechanics, London; 1948.

[9] Prohl MA. A method for calculating vibration frequency and stress of banded group of turbine buckets. Trans ASME 1958;80:169–80.

[10] Rao JS. Turbomachine blade vibration. 1st ed. New Delhi: V.K. Printers; 1991.

[11] Kubiak J. Diagnostic of fracture of the blade of the steam turbine. Internal report of EM-CIICAp, No 6P/DM CIICAp. University of the State of Morelos; 2002 [in Spanish].

[12] Logan E, Roy R. Handbook of turbomachinery. 2nd ed. Tempe, Arizona: Taylor & Francis Group; 2003.

[13] Talib A, Hasan YA, Rahman NNA. Predicting biochemical oxygen demand as indicator of river pollution using artificial neural networks. In: Proceedings of the 18th world IMACS/MODSIM congress, Cairns, Australia; 2010.

[14] McCulloch WW, Pitts WA. A logical calculus of ideas imminent in nervous activity. Bull Math Biophys 1943;5:115–33.

[15] Abad A, Hahn M, Es-Said OS. Corrosion of 15-5PH H1025 stainless steel due to environmental conditions. Eng Fail Anal 2010;17:208–12.

[16] Azevedo CRF, Sinátora A. Erosion-fatigue of steam turbine blades. Eng Fail Anal 2009;16:2293–303.

[17] Kubiak J, Segura JA, Gonzalez G, García JC, Sierra F, Nebradt JG, et al. Failure analysis of the 350 MW steam turbine blade root. Eng Fail Anal 2009;16:1270–81.

[18] Kubiak J, Urquiza G, Rodriguez JA, González G, Rosales I, Castillo G, et al. Failure analysis of the 150 MW gas turbine blades. Eng Fail Anal 2009;16:1794–804.

[19] Otegui JL, Kunert H, Booman J, Barcia P, Guidi G. Two competing crack growth mechanisms in very high pressures tubes. Eng Fail Anal 2011;18:564–71.

.

Título en Times New Roman y Negritas No. 14 en Español e Inglés]

Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 1er Autor†*, Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 1er Coautor, Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 2do Coautor y Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 3er Coautor

Institución de Afiliación del Autor incluyendo dependencia (en Times New Roman No.10 y Cursiva)

International Identification of Science - Technology and Innovation

ID 1st author: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Author ID - Open ID) and CVU 1st author: (Scholar-PNPC or SNI-CONACYT) (No.10 Times New Roman)

ID 1st coauthor: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Author ID - Open ID) and CVU 1st coauthor: (Scholar or SNI) (No.10 Times New Roman)

ID 2nd coauthor: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Author ID - Open ID) and CVU 2nd coauthor: (Scholar or SNI) (No.10 Times New Roman)

ID 3rd coauthor: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Author ID - Open ID) and CVU 3rd coauthor: (Scholar or SNI) (No.10 Times New Roman)

(Report Submission Date: Month, Day, and Year); Accepted (Insert date of Acceptance: Use Only ECORFAN)

Citación: Primer letra (EN MAYUSCULAS) del Nombre del 1er Autor. Apellido, Primer letra (EN MAYUSCULAS) del Nombre del 1er Coautor. Apellido, Primer letra (EN MAYUSCULAS) del Nombre del 2do Coautor. Apellido, Primer letra (EN MAYUSCULAS) del Nombre del 3er Coautor. Apellido

Correo institucional [Times New Roman No.10]

Primera letra (EN MAYUSCULAS) del Nombre Editores. Apellidos (Dir.) *Título del Handbook [Times New Roman No.10]*, Temas Selectos del área que corresponde ©ECORFAN- Filial, Año.

Abstract

Texto redactado en Times New Roman No.12, espacio sencillo, en inglés.

Indicar (3-5) palabras clave en Times New Roman y Negritas No.12

1 Introducción

Texto redactado en Times New Roman No.12, espacio sencillo.

Explicación del tema en general y explicar porque es importante.

¿Cuál es su valor agregado respecto de las demás técnicas?.

Enfocar claramente cada una de sus características.

Explicar con claridad el problema a solucionar y la hipótesis central.

Explicación de las secciones del Capítulo.

Desarrollo de Secciones y Apartados del Capítulo con numeración subsecuente

[Título en Times New Roman No.12, espacio sencillo y Negrita]

Desarrollo de Capítulos en Times New Roman No.12, espacio sencillo.

Inclusión de Gráficos, Figuras y Tablas-Editables

En el *contenido del Capítulo* todo gráfico, tabla y figura debe ser editable en formatos que permitan modificar tamaño, tipo y número de letra, a efectos de edición, estas deberán estar en alta calidad, no pixeladas y deben ser notables aun reduciendo la imagen a escala.

[Indicando el título en la parte Superior con Times New Roman No.12 y Negrita, señalando la fuente en la parte Inferior centrada con Times New Roman No. 10]

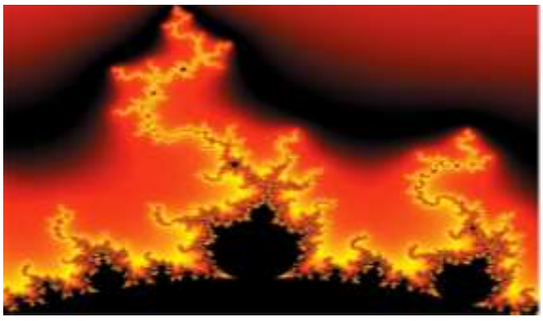
Tabla 2.1 Título

Particiones	Valores	Log
P1	7.58	0.88
P2	7.62	0.88
P3	7.58	0.88
P4	7.59	0.88
P5	7.57	0.88
P6	7.58	0.88
P7	7.57	0.88

Fuente de Consulta:
(No deberán ser imágenes, todo debe ser editable)

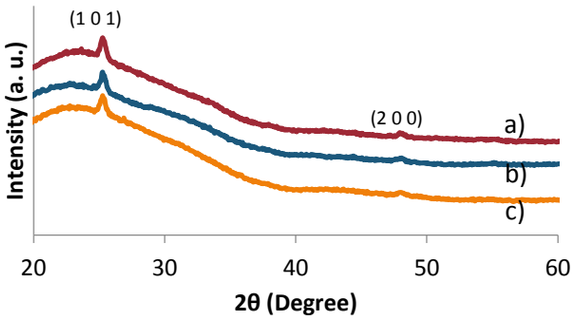
ECORFAN® Todos los derechos reservados-México-Bolivia-Spain-Ecuador-Cameroon-Colombia-Salvador-Guatemala-Paraguay-Nicaragua-Peru-Democratic Republic of Congo-Taiwan

Figura 1.1 Título



Fuente de Consulta:
(No deberán ser imágenes, todo debe ser editable)

Gráfico 1.1 Título



Fuente de Consulta:
(No deberán ser imágenes, todo debe ser editable)

Cada Capítulo deberá presentar de manera separada en **3 Carpetas**: a) Figuras, b) Gráficos y c) Tablas en formato .JPG, indicando el número en Negrita y el Título secuencial.

Para el uso de Ecuaciones, señalar de la siguiente forma:

$$\boldsymbol{P} = \frac{[V_V - P_V]^{1/2}}{V_O - P^{Uh}} + \frac{3}{4}\left[\frac{(P^{VL})}{(P_u)}\right] \rightarrow \int_{V^{La}}^{U_a} \quad (1)$$

Deberán ser editables y con numeración alineada en el extremo derecho.

Metodología a desarrollar

Dar el significado de las variables en redacción lineal y es importante la comparación de los criterios usados.

Resultados

Los resultados deberán ser por sección del Capítulo.

Anexos

Tablas y fuentes adecuadas.

Agradecimiento

Indicar si fueron financiados por alguna Institución, Universidad o Empresa.

ECORFAN® Todos los derechos reservados-México-Bolivia-Spain-Ecuador-Cameroon-Colombia-Salvador-Guatemala-Paraguay-Nicaragua-Peru-Democratic Republic of Congo-Taiwan

Conclusiones

Explicar con claridad los resultados obtenidos y las posibilidades de mejora.

Referencias

Utilizar sistema APA. **No** deben estar numerados, tampoco con viñetas, sin embargo, en caso necesario de numerar será porque se hace referencia o mención en alguna parte del Capítulo.

Ficha Técnica

Cada Capítulo deberá presentar en un documento Word (.docx):

Nombre del Handbook
Título del Capítulo
Abstract
Keywords
Secciones del Capítulo, por ejemplo:

1. *Introducción*
2. *Descripción del método*
3. *Análisis a partir de la regresión por curva de demanda*
4. *Resultados*
5. *Agradecimiento*
6. *Conclusiones*
7. *Referencias*

Nombre de Autor (es)
Correo Electrónico de Correspondencia al Autor
Referencias

Requerimientos de Propiedad Intelectual para su edición:

-Firma Autógrafa en Color Azul del Formato de Originalidad del Autor y Coautores
-Firma Autógrafa en Color Azul del Formato de Aceptación del Autor y Coautores

ECORFAN® Todos los derechos reservados-México-Bolivia-Spain-Ecuador-Cameroon-Colombia-Salvador-Guatemala-Paraguay-Nicaragua-Peru-Democratic Republic of Congo-Taiwan

Reserva a la Política Editorial

ECORFAN Handbooks se reserva el derecho de hacer los cambios editoriales requeridos para adecuar la Obra Científica a la Política Editorial del ECORFAN Handbooks. Una vez aceptada la Obra Científica en su versión final, el ECORFAN Handbooks enviará al autor las pruebas para su revisión. ECORFAN® únicamente aceptará la corrección de erratas y errores u omisiones provenientes del proceso de edición de la revista reservándose en su totalidad los derechos de autor y difusión de contenido. No se aceptarán supresiones, sustituciones o añadidos que alteren la formación de la Obra Científica.

Código de Ética – Buenas Prácticas y Declaratoria de Solución a Conflictos Editoriales

Declaración de Originalidad y carácter inédito de la Obra Científica, de Autoría, sobre la obtención de datos e interpretación de resultados, Agradecimientos, Conflicto de intereses, Cesión de derechos y distribución

La Dirección de ECORFAN-México, S.C reivindica a los Autores de la Obra Científica que su contenido debe ser original, inédito y de contenido Científico, Tecnológico y de Innovación para someterlo a evaluación.

Los Autores firmantes de la Obra Científica deben ser los mismos que han contribuido a su concepción, realización y desarrollo, así como a la obtención de los datos, la interpretación de los resultados, su redacción y revisión. El Autor de correspondencia de la Obra Científica propuesto requisitara el formulario que sigue a continuación.

Título de la Obra Científica:

- El envío de una Obra Científica a ECORFAN Handbooks emana el compromiso del autor de no someterlo de manera simultánea a la consideración de otras publicaciones seriadas para ello deberá complementar el Formato de Originalidad para su Obra Científica, salvo que sea rechazado por el Comité de Arbitraje, podrá ser retirado.

- Ninguno de los datos presentados en esta Obra Científica ha sido plagiado ó inventado. Los datos originales se distinguen claramente de los ya publicados. Y se tiene conocimiento del testeo en PLAGSCAN si se detecta un nivel de plagio Positivo no se procederá a arbitrar.

- Se citan las referencias en las que se basa la información contenida en la Obra Científica, así como las teorías y los datos procedentes de otras Obras Científicas previamente publicados.

- Los autores firman el Formato de Autorización para que su Obra Científica se difunda por los medios que ECORFAN-México, S.C. en su Holding México considere pertinentes para divulgación y difusión de su Obra Científica cediendo sus Derechos de Obra Científica.

- Se ha obtenido el consentimiento de quienes han aportado datos no publicados obtenidos mediante comunicación verbal o escrita, y se identifican adecuadamente dicha comunicación y autoría.

- El Autor y Co-Autores que firman este trabajo han participado en su planificación, diseño y ejecución, así como en la interpretación de los resultados. Asimismo, revisaron críticamente el trabajo, aprobaron su versión final y están de acuerdo con su publicación.

- No se ha omitido ninguna firma responsable del trabajo y se satisfacen los criterios de Autoría Científica.

- Los resultados de esta Obra Científica se han interpretado objetivamente. Cualquier resultado contrario al punto de vista de quienes firman se expone y discute en la Obra Científica.

Copyright y Accesso

La publicación de esta Obra Científica supone la cesión del copyright a ECORFAN-Mexico, S.C en su Holding México para su ECORFAN Handbooks, que se reserva el derecho a distribuir en la Web la versión publicada de la Obra Científica y la puesta a disposición de la Obra Científica en este formato supone para sus Autores el cumplimiento de lo establecido en la Ley de Ciencia y Tecnología de los Estados Unidos Mexicanos, en lo relativo a la obligatoriedad de permitir el acceso a los resultados de Investigaciones Científicas.

Título de la Obra Científica:

Nombre y apellidos del Autor de contacto y de los Coautores	Firma
1.	
2.	
3.	
4.	

Principios de Ética y Declaratoria de Solución a Conflictos Editoriales

Responsabilidades del Editor

El Editor se compromete a garantizar la confidencialidad del proceso de evaluación, no podrá revelar a los Árbitros la identidad de los Autores, tampoco podrá revelar la identidad de los Árbitros en ningún momento.

El Editor asume la responsabilidad de informar debidamente al Autor la fase del proceso editorial en que se encuentra el texto enviado, así como de las resoluciones del arbitraje a Doble Ciego.

El Editor debe evaluar los manuscritos y su contenido intelectual sin distinción de raza, género, orientación sexual, creencias religiosas, origen étnico, nacionalidad, o la filosofía política de los Autores.

El Editor y su equipo de edición de los Holdings de ECORFAN® no divulgarán ninguna información sobre la Obra Científica enviado a cualquier persona que no sea el Autor correspondiente.

El Editor debe tomar decisiones justas e imparciales y garantizar un proceso de arbitraje por pares justa.

Responsabilidades del Consejo Editorial

La descripción de los procesos de revisión por pares es dado a conocer por el Consejo Editorial con el fin de que los Autores conozcan cuáles son los criterios de evaluación y estará siempre dispuesto a justificar cualquier controversia en el proceso de evaluación. En caso de Detección de Plagio a la Obra Científica el Comité notifica a los Autores por Violación al Derecho de Autoría Científica, Tecnológica y de Innovación.

Responsabilidades del Comité Arbitral

Los Árbitros se comprometen a notificar sobre cualquier conducta no ética por parte de los Autores y señalar toda la información que pueda ser motivo para rechazar la publicación de la Obra Científica. Además, deben comprometerse a mantener de manera confidencial la información relacionada con la Obra Científica que evalúan.

Cualquier manuscrito recibido para su arbitraje debe ser tratado como documento confidencial, no se debe mostrar o discutir con otros expertos, excepto con autorización del Editor.

Los Árbitros se deben conducir de manera objetiva, toda crítica personal al Autor es inapropiada.

Los Árbitros deben expresar sus puntos de vista con claridad y con argumentos válidos que contribuyan al que hacer Científico, Tecnológica y de Innovación del Autor.

Los Árbitros no deben evaluar los manuscritos en los que tienen conflictos de intereses y que se hayan notificado al Editor antes de someter la Obra Científica a evaluación.

Responsabilidades de los Autores

Los Autores deben garantizar que sus Obras Científicas son producto de su trabajo original y que los datos han sido obtenidos de manera ética.

Los Autores deben garantizar no han sido previamente publicados o que no estén siendo considerados en otra publicación seriada.

Los Autores deben seguir estrictamente las normas para la publicación de Obra Científica definidas por el Consejo Editorial.

Los Autores deben considerar que el plagio en todas sus formas constituye una conducta no ética editorial y es inaceptable, en consecuencia, cualquier manuscrito que incurra en plagio será eliminado y no considerado para su publicación.

Los Autores deben citar las publicaciones que han sido influyentes en la naturaleza de la Obra Científica presentado a arbitraje.

Servicios de Información

Indización - Bases y Repositorios

RESEARCH GATE	For international bibliographer's manager
MENDELEY	For basification of data from scientific journals
GOOGLE SCHOLAR	For your international search specialized in retrieving scientific documents
REDIB	Ibero-American Network of Innovation and scientific knowledge-CSIC

Servicios Editoriales:

Identificación de Citación e Índice H.
Administración del Formato de Originalidad y Autorización.
Testeo del Chapter con PLAGSCAN.
Evaluación de Obra Científica.
Emisión de Certificado de Arbitraje.
Edición de Obra Científica.
Maquetación Web.
Indización y Repositorio
Publicación de Obra Científica.
Certificado de Obra Científica.
Facturación por Servicio de Edición.

Política Editorial y Administración

143 - 50 Itzopan, Ecatepec de Morelos – México. Tel: +52 1 55 6159 2296, +52 1 55 1260 0355, +52 1 55 6034 9181; Correo electrónico: contact@ecorfan.org www.ecorfan.org

ECORFAN®

Editor en Jefe
VARGAS-DELGADO, Oscar. PhD

Directora Ejecutiva
RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD

Director Editorial
PERALTA-CASTRO, Enrique. MsC

Diseñador Web
ESCAMILLA-BOUCHAN, Imelda. PhD

Diagramador Web
LUNA-SOTO, Vladimir. PhD

Asistentes Editoriales
SORIANO-VELASCO, Jesus. BsC

Traductor
DÍAZ-OCAMPO, Javier. BsC

Filóloga
RAMOS-ARANCIBIA, Alejandra. BsC

Publicidad y Patrocinio
(ECORFAN®- Mexico- Bolivia- Spain- Ecuador- Cameroon- Colombia- El Salvador- Guatemala- Nicaragua- Peru- Paraguay- Democratic Republic of The Congo- Taiwan),sponsorships@ecorfan.org

Oficinas de Gestión
143 - 50 Itzopan, Ecatepec de Morelos–México.
21 Santa Lucía, CP-5220. Libertadores -Sucre–Bolivia.
38 Matacerquillas, CP-28411. Moralzarzal –Madrid-España.
18 Marcial Romero, CP-241550. Avenue, Salinas l - Santa Elena-Ecuador.
1047 La Raza Avenue -Santa Ana, Cusco-Peru.
Boulevard de la Liberté, Immeuble Kassap, CP-5963.Akwa- Douala-Cameroon.
Southwest Avenue, San Sebastian – León-Nicaragua.
6593 Kinshasa 31 – Republique Démocratique du Congo.
San Quentin Avenue, R 1-17 Miralvalle - San Salvador-El Salvador.
16 Kilometro, American Highway, House Terra Alta, D7 Mixco Zona 1-Guatemala.
105 Alberdi Rivarola Captain, CP-2060. Luque City- Paraguay.
Distrito YongHe, Zhongxin, calle 69. Taipei-Taiwán.
43 Calle # 30 -90 B. El Triunfo CP.50001. Bogotá-Colombia.

9 786078 695713
ISBN 978-607-8695-71-3

www.ecorfan.org