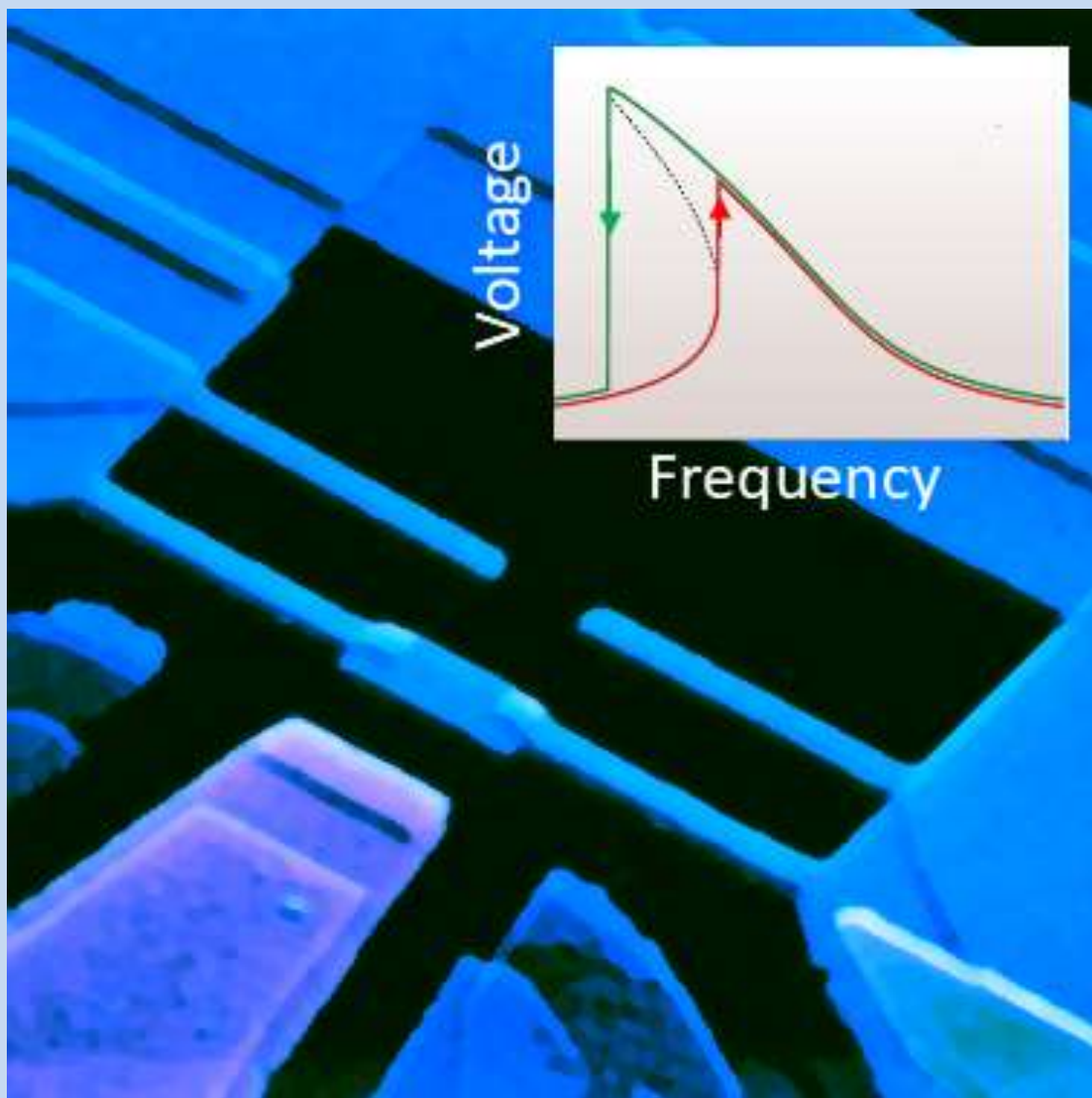


FÍSICA

REVISTA CUBANA DE FÍSICA

Sociedad Cubana de Física
y Facultad de Física,
Universidad de La Habana

Vol. 42 No. 2
DIC. 15, 2025



**PREPARANDO EL CAMINO
A LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA**

Portada: One output of the Physics Nobel prize 2025.
Artist's view inspired in graphs published by Clarke and Willhem; Nature 453, 1031 (2008)

EDITOR JEFE
E. ALTSHULER
Facultad de Física, Universidad de La Habana, La Habana, Cuba
ealtshuler@fisica.uh.cu

EDITOR EJECUTIVO
E. RAMIREZ-MIQUET
ermiquet@gmx.com

EDITOR ASOCIADO & SUPERVISOR DE PRODUCCIÓN
O. ALMORA
Universitat Rovira i Virgili, Tarragona, España
osbel.almora@urv.cat

EDITOR DE PRODUCCIÓN
R. SANTOS
InSTEC, Universidad de La Habana, La Habana, Cuba
renier.santos@instec.uh.cu

EDITORES ASOCIADOS
A. J. BATISTA-LEYVA
InSTEC, La Habana
abatista@instec.cu

W. BIETENHOLTZ
UNAM, México
wolbj@nucleares.unam.mx

J. O. FOSSUM
NTNU, Noruega
Jon.fossum@ntnu.no

J. P. GALAUP
Lab. A. Cotton (CNRS) & Univ. Paris-Sud
Jean-pierre.galaup@lac.u-psud.fr

L. H. GREENE
National Magnetic Lab, U.S.A.
lhgreene@magnet.fsu.edu

J. LLOVERA
CUJAE, La Habana, Cuba
llovera@electronica.cujae.edu.cu

O. de MELO
Facultad de Física, Universidad de La Habana, La Habana, Cuba
omelo@fisica.uh.cu

O. MULET
Facultad de Física, Universidad de La Habana
mulet@fisica.uh.cu

P. MUNÉ
Facultad de Ciencias, Universidad de Oriente
mune@cmt.uo.edu.cu

A. PETROFF
Clark University
APetroff@clarku.edu

T. POESCHEL
University Erlangen-Nuremberg
thorsten.poeschel@fau.de

G. ROJAS-LORENZO
Instec, La Habana
german@instec.cu

T. SHINBROT
Rutgers University
shinbrot@soemail.rutgers.edu

C. A. ZEN-VASCONCELOS
Univ. Federal Rio Grande do Sul
cesarzen@cesarzen.com

COORDENADAS

78 PAVING THE WAY FOR QUANTUM COMPUTING: THE NOBEL PRIZE OF PHYSICS 2025
[CREANDO EL CAMINO PARA LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA: EL PREMIO NOBEL DE FÍSICA 2025]
Y. GALPERIN

ARTÍCULOS ORIGINALES

80 LZCOMPLEXITY: BIBLIOTECA PARA EL CÁLCULO DE MEDIDAS ENTRÓPICAS
[LZCOMPLEXITY: ENTROPY MEASURES LIBRARY]
E. ARAGÓN PÉREZ, E. ESTÉVEZ-RAMS

87 PROBLEM-BASED LEARNING WITH VIDEO ANALYSIS: THE CASE OF THE VARIABLE MASS ATWOOD MACHINE.
[APRENDIZAJE BASADO EN PROBLEMAS CON ANÁLISIS DE VIDEO: EL CASO DE DE ATWOOD DE MASA VARIABLE]
L. Saquinaula-Brito, J. J. Plaza-Santillán, J. D. Ortiz-Mata, E. A. Lamilla-Rubio

96 EFFECTS OF COHERENCE AND DOMAIN WALLS ON DIFFRACTION PROFILES IN RARE-EARTH DOPED PbTiO₃
[EFECTOS DE LA COHERENCIA Y LAS PAREDES DE DOMINIO EN LOS PERFILES DE DIFRACCIÓN EN PbTiO₃ DOPADO CON TIERRAS RARAS.]
D. CAMEJO-GONZÁLEZ, A. PENTÓN-MADRIGAL, A. PELÁIZ-BARRANCO

103 EXPERIMENTO DOCENTE DEMOSTRATIVO PARA MOTIVAR EL ESTUDIO DE LA RADIOACTIVIDAD CON ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN
[DEMONSTRATIVE TEACHING EXPERIMENT TO MOTIVATE THE STUDY OF RADIOACTIVITY WITH A DEMONSTRATIVE APPROACH]
J. B. CRUZ-ARENCIBIA, J. J. LLOVERA-GONZÁLEZ, A. D. RODRÍGUEZ-LLERENA

109 HIGH-POWER LASER PROTOTYPE FOR SOFT TISSUE SURGERY IN DENTISTRY
[PROTOTIPO LÁSER DE ALTA POTENCIA PARA CIRUGÍA DE TEJIDOS BLANDOS EN ODONTO-ESTOMATOLOGÍA]
O. MORALES-VALDÉS, P. J. LARREA-COX, S. FERNÁNDEZ-YANES, L. HERNÁNDEZ-TABARES, G. MESA-PÉREZ, A. RODRÍGUEZ-ÁLVAREZ, D. OJEDA-DÍAZ

113 M_w – M_L AND M_w – M_c SEISMIC MAGNITUDE SCALING RELATIONSHIPS FOR CUBA
[RELACIONES DE ESCALA DE MAGNITUD SÍSMICA M_w – M_L Y M_w – M_c]
J. L. NOAS-HERNÁNDEZ, M. N. VEGA-GARRIGA Y E. D. ARANGO-ARIAS

120 TESTING THE THIN CAPILLARY MODEL
[PROBANDO EL MODELO DE CAPILAR DELGADO]
V. IVCHENKO

124 ROLE OF RADIOFREQUENCY POWER ON THE CRYSTALLOGRAPHIC, MORPHOLOGICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF SPUTTERED ALUMINIUM THIN FILMS
[PAPEL DE LA POTENCIA DE LA RADIOFRECUENCIA EN LAS PROPIEDADES CRISTALOGRÁFICAS, MORFOLÓGICAS Y ÓPTICAS DE LAS CAPAS DELGADAS DE ALUMINIO DEPOSITADAS MEDIANTE «SPUTTERING»]
R. RAMOS-BLAZQUEZ, F. SOLIS-POMAR, A. FUNDORA CRUZ, A. COLLADO-HERNANDEZ, C. GARCIA RODRIGUEZ, MJ MARTÍNEZ-CARREÓN, AMILKAR FRAGIEL, A MARTINEZ-HUERTA, E. PEREZ-TIJERINA

PARA FÍSICOS Y NO FÍSICOS

131 IVAR GIAEVER: AN UNLIKELY HERO OF QUANTUM TIMES
[IVAR GIAEVER: UN HÉROE IMPROBABLE DE LOS TIEMPOS CUÁNTICOS]
E. ALTSHULER

133 ESCRUTANDO CON LA ANTIMATERIA

[SCRUTINIZING WITH ANTIMATTER]

A. IRIBARREN

MOMENTOS DE LA FÍSICA EN CUBA

138 EL INSTITUTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE MATERIALES (IMRE) DE LA UNIVERSIDAD DE LA HABANA: ANIVERSARIO XL

[THE INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY (IMRE) OF THE UNIVERSITY OF HAVANA: 40TH ANNIVERSARY]

J. A. MARTÍNEZ, K. VALDIVÍES-CRUZ, C. R. MILIÁN-PILA

145 NUESTRA FÍSICA EN NOTICIAS

OBITUARIOS

148 FEDERICO GARCÍA MOLINER (4 DE MARZO DE 1930-15 DE AGOSTO DE 2025)

150 IRMA GLADYS GONZÁLEZ CARMENATE (16 DE JUNIO DE 1945-14 DE JULIO DE 2025)

PAVING THE WAY FOR QUANTUM COMPUTING: THE NOBEL PRIZE OF PHYSICS 2025

CREANDO EL CAMINO PARA LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA: EL PREMIO NOBEL DE FÍSICA 2025

Y. GALPERIN 

Physics Department, University of Oslo, N-0316 Oslo, Norway.

The foundations of quantum mechanics were laid down about 100 years ago. However, many of its non-trivial implications have taken decades to unravel.

One is the phenomenon of quantum tunneling — the ability of particles to pass straight through a barrier that should not be possible according to classical physics, given its energy. Tunneling explains radioactive decay, in which, despite being confined inside an atom, an alpha particle still has a small probability of escaping the nucleus. Another is quantum superposition, in which an object can exist simultaneously in two states. This property is crucially important for performing algorithms required for quantum computation. Both tunneling and superposition were known at the atomic scale but had not been experimentally observed in macroscopic systems. In the late 1970s, Anthony Leggett, who won the 2003 Nobel Prize in Physics for his theoretical work on superconductors, asked whether the phenomena would be observable at the macroscopic scale using superconducting circuits — loops of wire which, when chilled to a fraction of a degree above absolute zero, can conduct electricity without resistance.

The fundamental question was: would quantum mechanics be obeyed by these large systems? In the 1980s, John Clarke, Michel H. Devoret and John M. Martinis, working at the University of California (Berkeley), were among those exploring quantum effects in superconducting loops. The trio set up an experiment in which two superconductors were separated by a thin barrier, known as a Josephson junction. In this state, a supercurrent can flow with zero resistance, like a river that runs without friction — but also with zero voltage, i.e., without a downhill gradient that gives the current a push. In classical physics, the system would stay stuck like this, unless given enough energy to escape. A crude picture illustrating the electrical transport through a superconductor could be formulated like the following. Suppose that you visit a dance party. Music is playing and you are located close to a corner of the room. Starting at the corner, you cannot reach another corner without being scattered. Therefore, to stimulate conductance one should provide energy (i.e. apply finite voltage in the case of a normal conductor). The situation is different if the dancer finds a partner and dance following the music. To start, they cannot be scattered by each other. Furthermore, if all couples of dancers are synchronized to the movements of the first couple, you get a coherent system where all couples can effortlessly move around the arena — they behave similar to a superconductor!

But let us get back to actual superconducting experiments. By carefully monitoring the system, and slowly increasing the current, Clarke, Devoret and Martinis showed that the entire tiny circuit could break out into a higher energy state — by quantum tunneling, which they observed by measuring a voltage spike. This device served as a prototype of a superconducting quantum bit or ‘qubit’. The fact that such large-scale objects can behave quantum mechanically is the starting point for a lot of fruitful scientific exploration in the decades since, and we are now living in an exciting era where people are starting to build quantum processors out of superconducting circuits.

Tunneling converts quantum effects into a measurable classical signal that can be used to determine a system’s quantum state at the macroscopic scale. It also shows that electrical circuits, made up of trillions of electrons, could behave as single quantum object that could be manipulated by classical fields. So perhaps it is not strange that Clarke (University of California, Berkeley), Devoret (currently at Yale University in New Haven, Connecticut, and the University of California, Santa Barbara, UCSB), and Martinis (currently at UCSB) shared the Nobel Prize announced by the Royal Swedish Academy of Sciences in Stockholm on 7 October, 2025. They experimentally discovered quantum physics on a macroscopic scale, paving the way for quantum computing. Their work was a milestone for the development of superconducting quantum circuits. The research, including both the highly non-trivial phenomena of quantum tunneling and quantum superposition, has helped to underpin some of today’s most advanced quantum computers.

The laureates were modest while evaluating their discovery. “I am completely stunned; it had never occurred to me in any way that this might be the basis for a Nobel Prize,” said Clarke, speaking to journalists gathered for the announcement. “I think that our discovery in some ways is the basis of quantum computing” he said, adding that although he led the trio’s work in the 1980s, the contributions of the other two were “overwhelming”.

Today, harnessing the ability to store information in a superposition of macroscopic quantum states shows promise as a platform to create quantum computers, which could someday perform certain otherwise intractable calculations. Both Martinis and Devoret have worked at Google, the firm based in Mountain View, California, which has pioneered

quantum computers using superconducting qubits. Martinis says he was very pleased by the attention the Prize has attracted. "The real reward is to write a paper that lots of people read and refer to — and even better, that it's generated this large scientific endeavor with thousands of people working on superconducting qubits".

The work conducting to the 2025 Nobel Prize in Physics has

also a clear connection to the Nobel physics prize of 1973, where Brian Josephson, Leo Esaki and Ivar Giaever predicted and demonstrated that supercurrents can tunnel through a barrier between two superconductors. Giaever —who was directly responsible for the experimental part of the work— passed away earlier this year, and is the subject of an article later in this issue.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) license.



LZCOMPLEXITY: BIBLIOTECA PARA EL CÁLCULO DE MEDIDAS ENTRÓPICAS

LZCOMPLEXITY: ENTROPY MEASURING LIBRARY

E. ARAGÓN-PÉREZ^a, E. ESTÉVEZ-RAMS^{b,c,†}

a) Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, 54830 Santa Clara, Villa Clara, Cuba

b) Facultad de Física, Universidad de La Habana, 10400 La Habana, Cuba; estevez@fisica.uh.cu[†]

c) Instituto de Ciencias y Tecnología de Materiales (IMRE), Universidad de La Habana, 10400 La Habana, Cuba

†para la correspondencia

Recibido 3/10/2024; Aceptado 26/5/2025

Se presenta la biblioteca *lzcomplexity*, desarrollada para el análisis de complejidad utilizando métricas entrópicas. Se describen los algoritmos utilizados para estimar las métricas empleando la factorización de Lempel-Ziv. Para enfrentar los retos computacionales asociados al análisis de grandes volúmenes de datos, *lzcomplexity* implementa algoritmos que permiten un procesamiento paralelo de las secuencias. Los experimentos realizados y su uso prácticos demuestran que *lzcomplexity* puede analizar secuencias extensas en tiempos razonables y que las medidas entrópicas incluidas son un indicador confiable para describir los sistemas complejos.

The library *lzcomplexity* is presented, developed for complexity analysis using entropic metrics. The algorithms used to estimate the metrics by means of Lempel-Ziv factorization are described. To face the computational challenges associated with the analysis of large volumes of data, *lzcomplexity* implements algorithms that enable parallel processing of the sequences. The experiments carried out and its practical use demonstrate that *lzcomplexity* can analyze long sequences in reasonable times and that the included entropic measures are reliable indicators for describing complex systems.

Keywords: complexity (complejidad), entropy (entropía), Lempel-Ziv.

I. INTRODUCCIÓN

Capturar de manera cuantitativa el elusivo término de complejidad en una pocas magnitudes es un reto sin solución general hasta el momento. La tarea bien puede ser imposible, por definición complejidad implica, en su generalidad, comportamientos que no pueden ser reducidos a la suma de sus partes y en ellos, la emergencia de dinámicas nuevas es una característica ubicua. Teniendo eso en cuenta, no obstante, caracterizar tales sistemas con herramientas robustas pero generales ha sido y sigue siendo un objetivo de la investigación y para ello se busca en cuerpos matemáticos de aplicabilidad amplia bajo pocos axiomas como estacionaridad y ergodicidad. Teoría de la información [1,2] es uno de esos cuerpos matemáticos que mejor cumplen con tales condiciones y por ello, han sido utilizados extensivamente en el estudio de sistemas complejos [3-8].

Aunque definido de manera clara y matemáticamente preciso, la estimación de la entropía de Shannon, la magnitud esencial en la teoría de la información, está lejos de ser trivial. Su definición matemática se hace sobre ensembles infinitos o secuencias bi-infinitas, cuando en todos los casos de importancia práctica, la finitud de la data es inevitable.

Otro cuerpo matemático cuya generalidad lo hace, al menos teóricamente, adecuado para la misma tarea, es la complejidad de Kolmogorov o complejidad algorítmica que tiene una fuente importante en los estudios de computabilidad de Turing y la definición de la Máquina Universal de Turing [9].

El decir que la complejidad algorítmica es de utilidad teórica descansa en el hecho de que su uso práctico está impedido, en toda su generalidad, por el teorema de la parada de Turing. Eso implica la necesidad de buscar realizaciones prácticas de contexto más limitado.

Los comentarios anteriores implican que la estimación de las magnitudes descritas es un tema de investigación tanto desde el punto de vista teórico como práctico en la búsqueda de herramientas utilizables para estudiar sistemas complejos concretos, escapando de la frontera de los desarrollos puramente formales o teóricos. En esa dirección, en 1976, Lempel y Ziv, introdujeron una factorización, llamada exhaustiva, de cadenas finitas que conduce de manera natural a definir como una magnitud de interés el número de factores como medida de complejidad de una secuencia [10]. Introducida en el contexto de la compresión de la información, un teorema posterior [11] demuestra que la hoy conocida como complejidad de Lempel-Ziv, es, en el límite superior, igual a la tasa de entropía de Shannon, a la entropía de Shannon por símbolo. El teorema de Ziv, por tanto, establece el puente entre el uso teórico y práctico de las magnitudes entrópicas y de ahí, permite también definir una variante restringida pero útil de distancia informacional que descansa en la complejidad de Kolmogorov [12].

La implementación eficiente de un algoritmo que realice la factorización de Lempel-Ziv es un reto abordado por un número de autores y se reportan sistemáticamente mejoras en las heurísticas. En la actualidad existen distintas bibliotecas de programación orientadas al análisis de complejidad

utilizando medidas entrópicas como [13–16]. En la práctica, muchos sistemas de interés pueden implicar una cantidad masiva de datos que incluso pueden llegar a 10^9 símbolos como en el análisis de material genético o el monitoreo en tiempo real de sensores o los flujos financieros. Esto implica un desafío para el cómputo y la memoria utilizada, lo que se requiere de algoritmos eficientes que puedan aprovechar la arquitectura de hardware moderno para reducir el tiempo de procesamiento y manejar la complejidad computacional.

En esta contribución reportamos una biblioteca que llamaremos *lzcomplexity* como una solución a estas demandas extremas. En la biblioteca se integran algoritmos optimizados para el análisis de secuencias mediante el uso de procesamiento paralelo. Optimización necesaria debido a que el procesamiento secuencial de grandes volúmenes de datos es insostenible en términos de tiempo y recursos. En la solución propuesta se paraleliza el algoritmo descrito en [17]. A diferencia de otras bibliotecas, que se limitan al cálculo de la densidad de entropía, *lzcomplexity* incluye otras métricas entrópicas como la medida efectiva de complejidad [18] para analizar la transferencia de información en los sistemas y la distancia informacional [12] para realizar comparaciones entre sistemas.

II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

II.1. Medidas entrópicas

La entropía de Shannon [1,2], magnitud central de la teoría de la información, permite determinar el nivel de incertidumbre de un sistema. La ocurrencia de los eventos en el sistema se consideran una variable aleatoria X y cada evento se emite con una probabilidad p_i [19]:

$$H(X) = - \sum_i p_i \log p_i. \quad (1)$$

La información mutua, por otro lado, mide cuanto de común, en términos de información, tiene la variable X , respecto a la variable Y :

$$I(X : Y) = H(X) + H(Y) - H(XY). \quad (2)$$

Cuando el sistema es descrito por una secuencia de símbolos, las magnitudes anteriores se adaptan para medirse sobre la ocurrencia de subcadenas en la secuencia que se asume bi-infinita. Una condición necesaria para que estas definiciones tengan sentido es considerar que el proceso es ergódico, lo que implica que para una longitud suficientemente larga, toda subcadena mayor o igual a dicha longitud es representativa del sistema como un todo, permitiendo pasar del promedio sobre ensembles al promedio sobre cadenas.

La entropía de bloque de Shannon se define como

$$H_n = - \sum_{\{X_n\}} p_i^n \log p_i^n, \quad (3)$$

donde $\{X_n\}$ es el conjunto de cadenas de longitud n extraíbles de la cadena bi-infinita que describe al sistema, p_i^n es la

probabilidad de ocurrencia de una cadena particular de longitud n .

Utilizando la entropía de bloque es posible obtener la densidad de entropía del sistema o el nivel de desorden irreducible del mismo

$$h = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{H_n}{n} \quad (4)$$

La densidad de entropía está estrechamente relacionada con la compresión máxima que es posible alcanzar con una codificación optima de la secuencia [11].

Otra medida entrópica de utilidad es la medida efectiva de complejidad (exceso de entropía) o E , que se puede definir como la información mutua entre las dos mitades infinitas de la secuencia [18]:

$$E(X) = \sum_{n=1}^{\infty} [h_n(X) - h(X)], \quad (5)$$

con $h_n(X) = H_n - H_{n-1}$ como la ganancia de entropía al pasar de considerar bloques de longitud $n - 1$ a bloques de longitud n . Teniendo h y E es posible construir mapas de complejidad-entropía [20,21]. Los mapas o diagramas de complejidad-entropía muestran el balance alcanzado por el sistema entre las medidas de desorden y almacenamiento de la información.

La distancia informacional normalizada [12] compara dos sistemas desde un punto de vista algorítmico utilizando la complejidad de Kolmogorov [19]. La complejidad de Kolmogorov $K(X)$ se define como el algoritmo más pequeño capaz de producir una secuencia X en una Máquina Universal de Turing. La complejidad de Kolmogorov es no computable debido al teorema del problema de parada de Turing [9]. Si se tienen dos sistemas, y uno de ellos es posible derivarlo a partir del otro por medio de un algoritmo corto la distancia entre estos dos sistemas sería muy cercana a cero. Lo contrario pasaría si las secuencias no tienen ningún tipo de correlación algorítmica, la distancia en ese caso es cercana a 1, por la necesidad de un algoritmo tan largo como las secuencia misma para transformar una secuencia en la otra. La distancia informacional se define como:

$$d_K(X, Y) = \frac{K(XY) - \min(K(X), K(Y))}{\max(K(X), K(Y))}, \quad (6)$$

donde XY significa la concatenación de las cadenas X y Y .

Como se ha mencionado, las medidas para el análisis de complejidad están sustentadas teóricamente sobre la premisa de que las secuencias son bi-infinitas, en la práctica tenemos que lidiar con secuencias finitas y formas de estimación se hacen necesarios.

II.2. La factorización de Lempel-Ziv

Una historia de $S = s_1 s_2 \dots s_n$ es una serie de subcadenas o factores $s(i, j)$ con $1 \leq i, j \leq n$ que concatenados producen como resultado a $S = s(1, l_1) s(l_1 + 1, l_2) \dots s(l_{k-1} + 1, l_k)$.

Para que una historia sea exhaustiva es necesario que cada factor $s(l_{i-1} + 1, l_i)$ no sea una subcadena del prefijo $s(1, l_i - 1)$. Por ejemplo, para la secuencia binaria $S = 0010101110$ la descomposición nos quedaría 0.01.01011.10 donde cada factor está delimitado por un punto. Cada secuencia tiene una historia exhaustiva única.

La complejidad de Lempel-Ziv (C_{Lz}) es el número de factores de la historia exhaustiva [10]. Para el ejemplo anterior, la $C_{Lz}(S) = 4$.

En el límite $n \rightarrow \infty$ se cumple [10]

$$C_{Lz} \leq \frac{n}{\log n}. \quad (7)$$

Definiendo a $c_{Lz}(S)$ como:

$$c_{Lz}(S) = \frac{C_{Lz}(S)}{n / \log n}. \quad (8)$$

En [11], se demuestra que para todas las secuencias S generadas por una fuente ergódica se cumple

$$\limsup_{N \rightarrow \infty} c_{Lz}(S) = h(S). \quad (9)$$

En la práctica para obtener un valor estimado de la densidad de entropía se emplea la ecuación (8) para una secuencia de longitud n representativa (en el sentido del Teorema de la Propiedad Asimptótico de Equipartición) del sistema.

Para la estimación de E se utiliza la expresión:

$$E_{Lz}(S) = \sum_{m=1}^M (c_{Lz}(S^m) - c_{Lz}(S)) \quad (10)$$

donde S^m es el resultado de dividir la secuencia S en bloques disjuntos de tamaño m y realizar un reordenamiento aleatorio de los bloques. De esta forma se rompen las correlaciones entre los conjuntos de valores mayores a m pero se mantiene la frecuencia de los símbolos. En [22] se muestra como a pesar de que E_{Lz} no es estrictamente E , se comporta de manera similar.

Para estimar la distancia informacional, se utilizará:

$$d_{Lz}(S, P) = \frac{c_{Lz}(SP) - \min(c_{Lz}(S), c_{Lz}(P))}{\max(c_{Lz}(S), c_{Lz}(P))} \quad (11)$$

Para obtener buenas estimaciones de h y E es necesario procesar cadenas lo suficientemente largas para lograr captar el comportamiento del sistema. Para esto es necesario tener algoritmos eficientes que permitan obtener C_{Lz} en períodos relativamente cortos de tiempo. En *lzcomplexity* se modifica el algoritmo presentado en [17] para calcular C_{Lz} de forma paralela, los detalles de la biblioteca se exponen en la siguiente sección.

III. IMPLEMENTACIÓN Y ARQUITECTURA DEL SOFTWARE

La biblioteca *lzcomplexity* está orientada al análisis entrópico de secuencias temporales. La biblioteca permite calcular las

métricas definidas en la sección anterior. La factorización de Lempel-Ziv (LZ76) es la base fundamental para estimar la densidad de entropía, la medida efectiva de complejidad y la distancia informacional (figura 1). Una vez calculada la densidad de entropía, es posible el cálculo de las demás magnitudes. Cada método está implementado aprovechando las funcionalidades de la biblioteca *oneTBB* [23] para que puedan ser ejecutados de forma paralela.

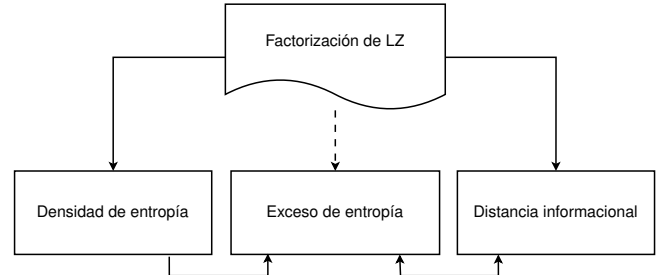


Figura 1. Se muestra la relación entre las distintas métricas calculadas por la biblioteca. La factorización de Lempel-Ziv es la base para obtener la densidad de entropía, la medida efectiva de complejidad y la distancia informacional.

Para el desarrollo de la biblioteca se utilizó el lenguaje de programación C/C++ [24], aprovechando la eficiencia del código que genera y la madurez de las optimizaciones existentes en los compiladores correspondientes. Además de la implementación base de *lzcomplexity*, se desarrolló un enlace para extender el uso de las funciones incluidas en la biblioteca al lenguaje de programación Python [25]. En la construcción de estos enlaces se utiliza *pybind11* [26] que es una biblioteca ligera implementada sobre C++.

Para obtener el valor C_{Lz} de una secuencia, la biblioteca brinda la función *lz76Factorization*. El algoritmo implementado en esta función consta de tres fases [17].

La fase inicial ordena ascendentemente todos los sufijos de la secuencia de entrada S . Un sufijo es la subsecuencia formada por los símbolos a partir del índice i hasta el final de la secuencia ($s(i, n)$). Luego de obtener el arreglo de todos los sufijos ordenados (SA) se hallan las longitudes de los prefijos más largos (LCP) entre sufijos consecutivos.

Existen varios algoritmos secuenciales de complejidad lineal como [27–31] que permiten obtener los SA y LCP . De igual forma se han creado algoritmos paralelos como [32–34]. En la biblioteca se implementó el algoritmo CaPS-SA que muestra mejor tiempo de ejecución que otros algoritmos paralelos [34] y que utiliza el principio detrás del algoritmo *samplesort* [35], con el empleo de un número de particiones y un conjunto de pivotes para lograr ordenar paralelamente el conjunto de sufijos. En el peor de los casos el algoritmo se comporta con una complejidad computacional de $O(n^2 \log(\frac{n}{p}))$ y una complejidad espacial de $4\omega N$, con $\omega = \{4, 8\}$ el número de bytes del tipo de dato utilizado para almacenar los valores de la secuencia.

Con los SA y los LCP se calcula el mayor factor anterior (LPF) para cada posición i de S . El vector LPF contiene la longitud del mayor factor comenzando en la posición i -ésima y tiene una ocurrencia anterior en S . Es decir, para cada uno de los valores de i , $LPF[i] = \max(l)$ tal que $s(i, i + l - 1)$ es un factor en

$s(1, i + l - 2)$. Para obtener los valores de LPF se implementó el algoritmo propuesto en [17] que tiene una complejidad computacional de $O(n)$ independientemente del alfabeto de la secuencia. Finalmente se obtiene la factorización de LZ76 por medio de los LPF (Algoritmo 1). El algoritmo genera como resultado un vector lzf que contiene los índices, en relación con la secuencia original, donde comienzan cada uno de los factores de LZ76. Por lo tanto $C_{lz}(S) = size(lzf)$

Entrada: LPF
Salida : arreglo lzf con la posición de los factores

```

1  $lzf[0] = 0, lzf[1] = 1;$ 
2  $i = 1;$ 
3 while  $lzf[i] \leq size(LPf)$  do
4    $lzf[i + 1] = lzf[i] + LPF[lzf[i]] + 1;$ 
5    $i = i + 1;$ 
6 end
7 return  $lzf;$ 

```

Algoritmo 1. Algoritmo para obtener la factorización de LZ76 a partir de los valores de LPF . Se calcula el vector lzf que contiene los índices donde comienzan cada uno de los factores de la factorización

En caso de querer obtener, además de C_{lz} , los factores que conforman la historia exhaustiva de la secuencia, se debe utilizar la función $lzf76Factors$. Para la densidad de entropía (h_{lz}) la biblioteca brinda la función $lzf76EntropyDensity$. Procedimiento que no agrega complejidad al procedimiento anterior debido a que para obtener h_{lz} luego de tener C_{lz} se realiza una operación matemática.

La distancia informacional d_{lz} se puede obtener al realizar una llamada a la función $lzf76InformationDistance$. El método calcula la complejidad C_{lz} de las dos secuencias a comparar y la concatenación entre estas. Como cada procesamiento es independiente entre sí, es posible efectuarlos de forma paralela utilizando la función $parallel_do$ de *oneTBB*. Luego siguiendo la ecuación (11) se combinan los resultados de cada una de las funciones para obtener el valor final.

Por otro lado, para calcular la medida efectiva de complejidad se utiliza la función $lzf76RandomShuffleComplexity$. El algoritmo implementado necesita determinar las diferencias entre $c_{lz}(S^m)$ y $c_{lz}(S)$ con $m = 1 \dots M$ (véase ecuación (12)). Posteriormente, se suman todas estas diferencias para obtener el resultado final.

En la primera etapa de procedimiento, son necesarias $M + 1$ llamadas a la función de factorización $lzf76Factorization$. Similar al algoritmo de la distancia, las $M + 1$ llamadas al método son posible realizarse en su totalidad de forma paralela, combinando en este caso las funciones $parallel_do$ y $parallel_for$ de *oneTBB*. Como resultado se obtiene la factorización de la secuencia original y un vector de complejidades, donde cada posición i contiene el valor de $C_{lz}(S^i)$ con $i = 1..M$. Luego sobre este vector se aplica la técnica map-reduce, aprovechando la propiedad asociativa de la suma. Es decir, para cada elemento en el vector de

complejidades, se calcula el $c_{lz}(S^i)$ y luego la diferencia con respecto a $c_{lz}(S)$. Finalmente, se reducen los resultados sumando cada diferencia. Este procedimiento es posible hacerlo de forma paralela empleando la función *parallel_reduce* de *oneTBB*.

Una variación del algoritmo podría ser realizar el cálculo de $C_{lz}(S^m)$ dentro del proceso de map-reduce. En este caso, se aprovecha el mapeo de los valores de m para calcular la factorización de cada una de las secuencias generadas a partir de la mezcla, justo antes de realizar la resta con $c_{lz}(S)$. Esta variante reduce el uso de la memoria al no tener que generar un vector auxiliar de complejidades. En relación a la complejidad computacional ambas variantes presentan igual complejidad.

En caso de quere obtener todas las métricas entrópicas que caracterizan una secuencia dada, la biblioteca ofrece la función $lzf76$. Función que optimiza las llamadas al método que permite calcular la factorización de una secuencia. De esta forma se utiliza menos memoria y se reduce el tiempo de cálculo para extraer los valores entrópicos de la secuencia.

Todas las funciones permiten ser invocadas de dos formas. Una forma básica donde solo se necesita una cadena de caracteres de entrada. Y una segunda forma, donde además de la secuencia, las funciones permiten recibir un objeto $LZArgs$ donde el usuario va a poder controlar distintos hiperparámetros de los algoritmos. Con este objeto podemos forzar un número de símbolos en el alfabeto de las secuencias, definir una base para el cálculo de los logaritmos o poder controlar el número de particiones utilizadas por CaPS-SA.

IV. EVALUACIÓN DE RENDIMIENTO

En la figura 2 se muestra el promedio del tiempos de ejecución del algoritmo CaPS-SA y el SA-IS [36] sobre 20 secuencias binarias generadas de forma aleatoria para longitudes de 10^8 y 10^9 . Los algoritmos se ejecutaron en el cluster de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas en un nodo con 16 CPUs. Se puede apreciar como el algoritmo paralelo, al igual que en los resultado de [34], muestra una ejecución eficiente al procesar secuencia de 10^9 símbolos en menos de 80 segundos.

Con el fin de evaluar el desempeño del método utilizado para obtener LZ76, la figura 3 muestra los tiempos de ejecución obtenidos para la factorización de secuencias de distintas longitudes. La comparación se realizó con otras dos implementaciones pertenecientes a las bibliotecas de código abierto, Complexity¹ y antropy². Ambas implementaciones corresponden al algoritmo clásico propuesto por Lempel y Ziv en 1976 [10], algoritmo que computacionalmente se comporta en el orden de $O(n)$. Una de las implementaciones está hecha sobre el lenguaje de programación C/C++ y la otra emplea el lenguaje Python con optimizaciones brindadas por el compilador numba [37].

¹<https://github.com/kyralianaka/Complexity>

²<https://github.com/raphaelvallat/antropy>

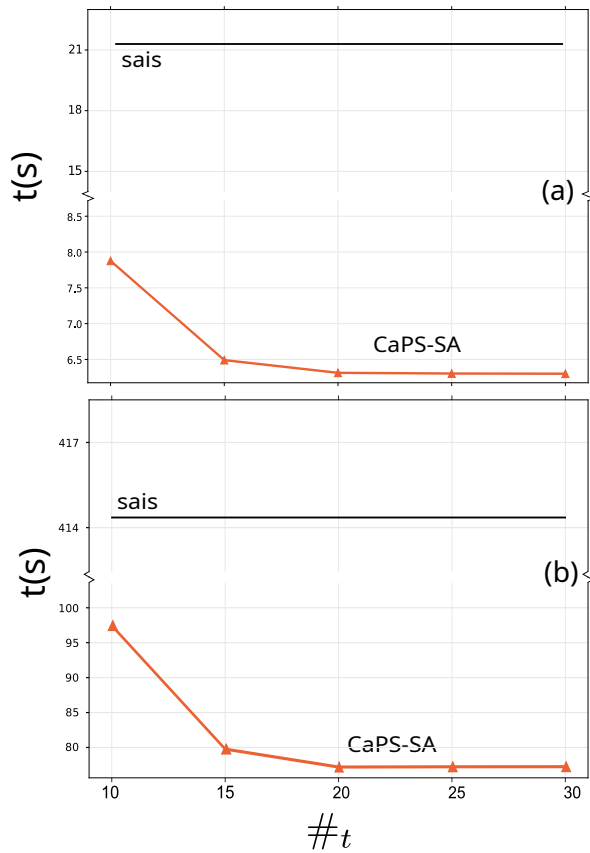


Figura 2. Comparación entre el tiempo de ejecución promedio como función del número de hilos $\#t$, del algoritmo secuencial *saís* y el algoritmo paralelo *CaPS-SA* para la construcción del SA: (a) secuencias de longitud 10^8 y (b) longitudes de 10^9 . En la medida que el número de hilos aumenta, el algoritmo paralelo mejora su rendimiento respecto al algoritmo secuencial.

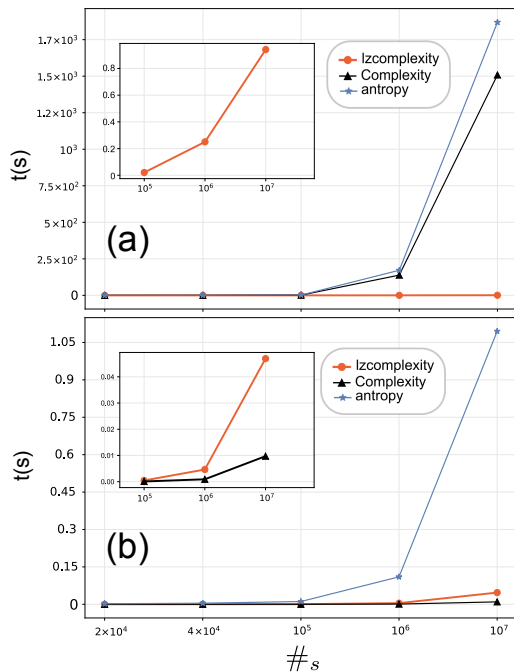


Figura 3. Comparación entre el tiempo de ejecución promedio como función del número de símbolos $\#s$ para (a) secuencias aleatorias y (b) secuencias periódicas. Los tiempos se corresponden con la función *lz76Facotrization* de *lzcomplexity*, la implementación en C/C++ de *Complexity* y la implementación en Python de *antropy*.

Las pruebas se realizaron sobre secuencias que varían el

número de símbolos entre 2×10^4 y 10^7 . Se emplearon secuencias periódicas y secuencias totalmente aleatorias para de esta forma comparar el rendimiento de las implementaciones sobre cadenas de complejidad mínima y con entropía máxima. Los resultados alcanzados se corresponden con el promedio de 10 ejecuciones por cada tipo de secuencia, realizadas en una MacBook Pro con el chip M2 Pro de 10 CPU y 16Gb de memoria RAM.

Las pruebas muestran como el procedimiento expuesto en este trabajo se mantiene de forma estable por debajo del segundo de duración para todas las longitudes del experimento. En el caso de secuencias periódicas (figura 3b) la implementación de *Complexity* logra alcanzar mejores tiempos de ejecución. Esto se debe a que el número de comparaciones que se realizan sobre cada símbolo es mínimo debido a la periodicidad de las secuencias. Aún así, la diferencia del tiempo de ejecución con respecto a la implementación de *lzcomplexity* se puede considerar irrelevante estando en el orden de 10^{-2} .

Muy diferente ocurre con las secuencias de máxima entropía (figura 3a) donde existen un alto número de factores. Los tiempos de ejecución de las otras librerías utilizadas sobrepasan los 20 s cuando las secuencias alcanzan los 10^6 símbolos, llegando a sobrepasar los 1.5×10^3 segundos aproximadamente para cadenas de longitud 10^7 . En contraste nuestro procedimiento de queda por debajo de los 0.8 s, lo que atestigua la eficiencia estable del algoritmo implementado a medida que las secuencias crecen en longitud y en complejidad.

V. APLICACIONES

Para ejemplificar el uso de *lzcomplexity* se utilizaron las magnitudes entrópicas para clasificar diferentes idiomas en familias lingüísticas. El lenguaje humano ha sido caso de estudio por su diversidad y complejidad [8, 38]. Visto como resultado de un sistema emisor de símbolos, el lenguaje natural es un sistema que tiene un nivel de estructura dado por las reglas gramaticales y semánticas, así como la lógica temporal que le confiere su comprensibilidad. A la vez, un texto en lenguaje natural tiene un nivel de impredecibilidad resultado de la creatividad del autor y su libre albedrío. Se utilizó la biblia por ser el texto traducido a más idiomas. La biblia tiene varias características importantes. Es un texto escrito por varios autores en diferentes momentos, algunas partes diferenciándose por más de un siglo. Esto apunta a una diversidad de estilos dentro del propio texto. Por otro lado, la biblia tiene un número grande de nombres propios que se mantienen, en muchos casos para diferentes idiomas [39].

Antes de la estimación de las magnitudes entrópicas, se tomaron de cada texto traducido una porción de texto común de 7.4×10^4 caracteres. Las magnitudes entrópicas se calcularon con el texto sin cambiar y con el texto aleatorizado a nivel de palabras para romper las correlaciones existentes fuera del nivel de una palabra. Se procesaron 37 idiomas.

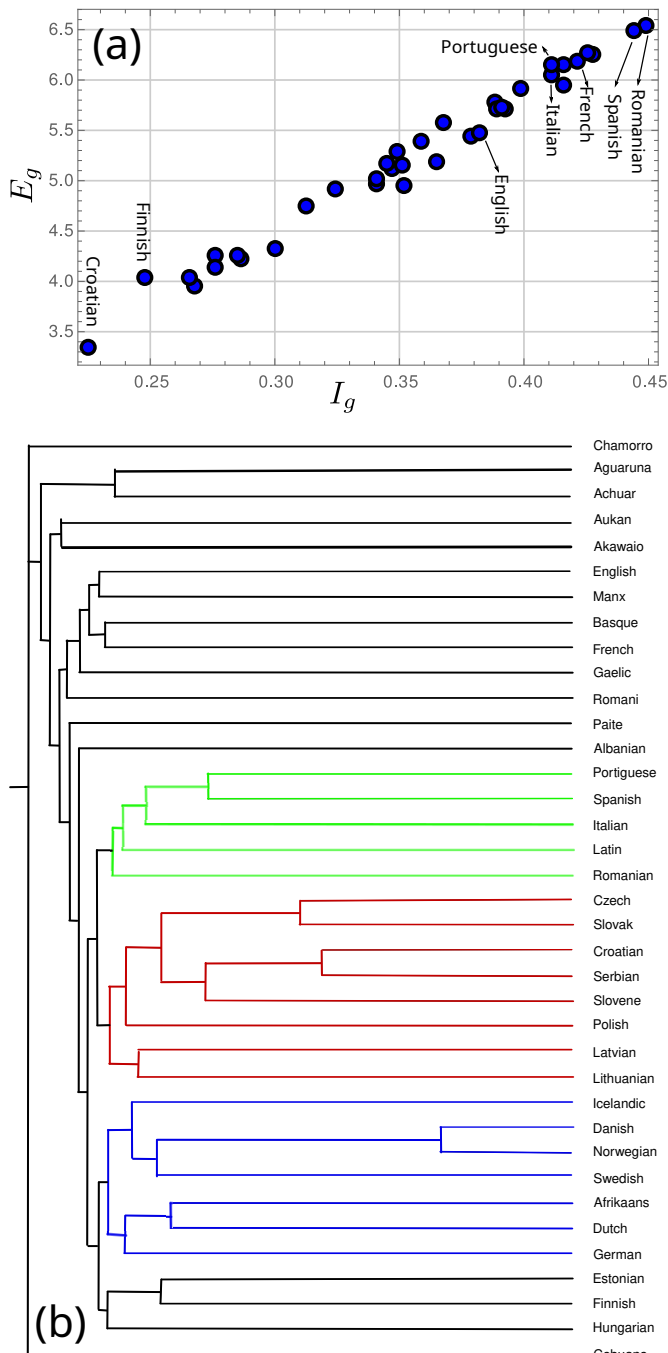


Figura 4. (a) Mapa de complejidad-entropía y (b) dendrograma basado en distancias informacionales entre traducciones bíblicas. Idiomas que pertenecen a una misma familia, aparecen agrupados correspondientemente. En verde los idiomas romances, en rojo los idiomas eslavos y en azul, los idiomas germánicos.

El mapa de complejidad-entropía se contruyó con h_g vs E_g :

$$\begin{aligned} h_g &= h_{I_z}^r - h_{I_z} \\ E_g &= E_{I_z} - E_{I_z}^r \end{aligned} \quad (12)$$

donde $h_{I_z}^r$ y $E_{I_z}^r$ es la densidad de entropía y el exceso de entropía estimados del texto aleatorizado. h_g es la ganancia de información o la cantidad de información necesaria para reorganizar las palabras hasta obtener nuevamente el texto original, E_g es el exceso de ganancia de entropía que implica reorganizar las palabras.

En la figura 4a el mapa de complejidad-entropía logra diferenciar distintos grupos de lenguajes. Por ejemplo aparecen agrupados los idiomas Español, Rumano, Francés, Portugués e Italiano que son lenguas romances, y en consecuencia tienen características gramaticales comunes. El cálculo nos indica que las lenguas romances tienen un alto valor de h_g , alrededor de 0.43 bit/caracter, y de E_g con un promedio de 6.2 bit/caracter. En el otro extremo del mapa las lenguas eslavas y nórdicas muestran una baja tasa de h_g y E_g indicando lenguas con menor nivel de coyundas gramaticales.

El cálculo de las distancias mutuas entre todos los idiomas, permitió calcular una matriz de distancia de donde un dendrograma fue generado (figura 4b). El dendrograma logra captar la relación entre distintos grupos lingüísticos con mayor claridad. Los idiomas de origen latino aparecen agrupados en una misma rama del árbol hasta el nivel de las hojas. Obsérvese como el español y el portugués, idiomas muy cercanos, aparecen como "hermanos" y a su vez ambos emparentados a un nivel más arriba al italiano. Los tres idiomas aparecen emparentados al latín. El rumano es un idioma romance derivado del latín pero algo más alejado del español, el portugués y el italiano. Este nivel de relación jerárquica entre los idiomas es destacable si consideramos las características señaladas del texto analizado.

Un análisis similar puede hacerse con las lenguas eslavas y las germánicas. En los tres casos el dendrograma indica su pertenencia a una familia común, y determinados detalles de su relación pueden ser señalados entre ellos. Por ejemplo, el afrikaner y el holandés tiene un origen común, siendo el primero una derivación del segundo, creado durante la dominación colonial de Sudáfrica. A su vez estos dos idiomas están emparentados cercanamente al alemán.

VI. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó la biblioteca *Izcomplexity* con las funciones para calcular magnitudes entrópicas sobre secuencias de símbolos. La implementación paralela del algoritmo de factorización permite procesar sistemas con longitudes al menos de 10^9 símbolos en un tiempo razonable. Esta longitud de secuencia es relevante en distintos escenarios, en particular en el análisis del código ADN de organismos vivos. Estos resultados serán publicados en otra contribución.

Para ejemplificar el uso del algoritmo se analizó la biblia traducida a una treintena de idiomas para determinar familias lingüísticas. El análisis entrópico permite clasificar los lenguajes en sus respectivos grupos lingüísticos.

VII. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos los intercambios fructíferos con MC Ania Mesa Rodríguez que han permitido detectar errores en la implementación de los algoritmos. La data de la biblia fue curada por Ania Mesa.

Esta contribución se realizó en el marco del proyecto CARDENT (PNCB PN223LH010) para el análisis entrópico de data cardíaca y fue financiado parcialmente por el CITMA

REFERENCIAS

- [1] C. Shannon, Bell Syst Tech J 30, 379 (1951).
- [2] C. Shannon, Bell Syst Tech J 30, 50 (1951).
- [3] R. Nagarayama, IEEE Trans Biomed Eng 49, 1371 (2002).
- [4] A. Lesne, J. I. Blanc and L. Pezard, Phys Rev E 79, 046208 (2009).
- [5] E. Estevez-Rams, R. Lora-Serrano, C. A. J. Nunes and B. Aragón-Fernández, Chaos 25, 123106 (2015).
- [6] L. M. Alonso, Chaos DOI: 10.1063/1.4984800 (2017).
- [7] H. Y. D. Sigaki, M. Perc and H. V. Ribeiro, PNAS 115, E8585 (2018).
- [8] E. Estevez-Rams, A. Mesa-Rodriguez and D. Estevez-Moya, PLoS ONE 14, e0214863 (2019).
- [9] M. Li and P. Vitányi, An Introduction to Kolmogorov Complexity and Its Applications. (Springer Verlag, 1993).
- [10] A. Lempel and J. Ziv, IEEE Trans Inf Th IT-22, 75 (1976).
- [11] J. Ziv, IEEE Trans Inf Th IT-24, 405 (1978).
- [12] M. Li, X. Chen, X. Li, B. Ma and P. M. B. Vitanyi, IEEE Trans Inf Th 50, 3250 (2004).
- [13] P. Li, BioMed Eng OnLine 18, 30 (2019).
- [14] L. E. V. Silva, R. Fazan and J. A. Marin-Neto, Computer Methods and Programs in Biomedicine 197, 105718 (2020).
- [15] M. W. Flood and B. Grimm, PLoS ONE 16, e0259448 (2021).
- [16] D. Mayor, D. Panday, H. K. Kandel, T. Steffert and D. Banks, Entropy 23, 321 (2021).
- [17] M. Crochemore, L. Ilie and W. F. Smyth, Data Compression Conference (DCC 2008), 482 (IEEE, 2008).
- [18] P. Grassberger, Int J Theor Phys 25, 907 (1986).
- [19] T. M. Cover and J. A. Thomas, Elements of information theory. Second edition (Wiley Interscience, New Jersey, 2006).
- [20] J. P. Crutchfield and K. Young, Phys Rev Lett 63, 105 (1989).
- [21] J. P. Crutchfield, Nature 8, 17 (2012).
- [22] O. Melchert and A. K. Hartmann, Phys Rev E 91, 023306 (2015).
- [23] I. Corporation, Intel® oneapi threading building blocks (onetbb) (2024).
- [24] B. Stroustrup, The C++ Programming Language (Addison-Wesley, Reading, Mass, 2000), special ed edition.
- [25] Welcome to Python.org (2025). URL <https://www.python.org/>.
- [26] Pybind11 documentation (2025). URL <https://pybind11.readthedocs.io/en/stable/index.html>.
- [27] D. K. Kim, J. S. Sim, H. Park and K. Park, J of Discrete Algorithms 3, 126 (2005).
- [28] J. Kärkkäinen, P. Sanders and S. Burkhardt, J ACM 53, 918 (2006).
- [29] M. Salson, T. Lecroq, M. Léonard and L. Mouchard, J of Discrete Algorithms 8, 241 (2010).
- [30] G. Nong, S. Zhang and W. H. Chan, IEEE Trans Comput 60, 1471 (2011).
- [31] U. Baier, 27th Annual Symposium on Combinatorial Pattern Matching, 12 (Dagstuhl Publishing, 2016).
- [32] F. Kulla and P. Sanders, Parallel Computing 33, 605–612 (2007).
- [33] J. Labeit, J. Shun and G. E. Blelloch, Journal of Discrete Algorithms 43, 2 (2017).
- [34] J. Khan, T. Rubel, E. Molloy, L. Dhulipala and R. Patro, Algorithms for Molecular Biology 19, 16 (2024).
- [35] W. D. Frazer and A. C. McKellar, J ACM 17, 496 (1970), ISSN 0004-5411, 1557-735X.
- [36] G. Nong, S. Zhang and W. H. Chan, 2009 data compression conference, 193–202 (IEEE, 2009).
- [37] Numba: A high performance python compiler (2025). URL <https://numba.pydata.org/>.
- [38] M. A. Montemurro and D. H. Zanette, PLoS One 6, e19875 (2011).
- [39] C. Christodouloupoulos and M. Steedman, Lang Resources and Evaluation 49, 375 (2015).

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) license.



PROBLEM-BASED LEARNING WITH VIDEO ANALYSIS: THE CASE OF THE VARIABLE-MASS ATWOOD MACHINE

APRENDIZAJE BASADO EN PROBLEMAS CON ANÁLISIS DE VIDEO: EL CASO DE LA MÁQUINA DE ATWOOD DE MASA VARIABLE

J. L. SAQUINAULA-BRITO ^{a†}, J. J. PLAZA-SANTILLÁN ^a, J. D. ORTIZ-MATA ^a, E. A. LAMILLA-RUBIO ^{a,b}

a) Universidad Estatal de Milagro, 091050 Milagro, Ecuador, jsaquinaulab@unemi.edu.ec[†]

b) Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2025 Guayaquil, Ecuador, ealamill@espol.edu.ec

† corresponding author

Recibido 21/7/2025; Aceptado 16/10/2025

This study applies Problem-Based Learning (PBL) to teaching advanced mechanics in undergraduate physics, focusing on variable mass systems through the Atwood machine with chains. Using the Hmelo-Silver PBL model, a structured sequence guided students in problem analysis, hypothesis generation, self-directed study, experimentation, and reflection. The case study combined Newtonian and Lagrangian modeling with experimental validation via Tracker video analysis, enabling students to connect theoretical derivations with accessible empirical data. Results showed strong consistency between theoretical predictions and experimental measurements, despite minor discrepancies from chain oscillations, link impacts, and video resolution limitations. The approach demonstrated how low-cost tools can effectively support experimental inquiry in physics education. Beyond content knowledge, PBL fostered research-oriented skills such as autonomous planning, problem-solving, and collaborative inquiry. The proposed framework provides a replicable model for integrating abstract theory with experimental practice, strengthening active learning and advancing the role of inquiry-based methodologies in STEM curricula.

Este estudio aplica el Aprendizaje Basado en Problemas (ABP) a la enseñanza de mecánica avanzada en la física universitaria, centrándose en sistemas de masa variable a través de la máquina de Atwood con cadenas. Utilizando el modelo ABP de Hmelo-Silver, se guió a los estudiantes mediante una secuencia estructurada de análisis del problema, generación de hipótesis, estudio autodirigido, experimentación y reflexión. El estudio de caso combinó el modelado newtoniano y lagrangiano con una validación experimental mediante análisis de video con Tracker. Los resultados mostraron una consistencia entre las predicciones teóricas y las mediciones experimentales, a pesar de pequeñas discrepancias debidas a las oscilaciones de la cadena, impactos entre eslabones y limitaciones en la resolución del video. El enfoque demostró como herramientas de bajo costo pueden apoyar eficazmente la indagación experimental en la enseñanza de la física. Mas allá del conocimiento de contenido, el ABP fomentó habilidades orientadas a la investigación, como la planificación autónoma, la resolución de problemas y la indagación colaborativa. El marco propuesto ofrece un modelo replicable para integrar la teoría abstracta con la práctica experimental, fortaleciendo el aprendizaje activo y promoviendo el papel de las metodologías basadas en la indagación en los programas STEM.

Keywords: Teaching methods and strategies (métodos y estrategias de enseñanza), Research in physics education (Investigación en la educación en física), Formalisms in classical mechanics (Formalismos en la mecánica clásica), Problem-based Learning (Aprendizaje basado en problemas); Variable mass systems (Sistemas de masa variable).

I. INTRODUCTION

In the field of educational innovation, Problem-Based Learning (PBL) has become one of the most influential active learning methodologies due to its student-centered design, which fosters meaningful learning through the resolution of real-world problems [1, 2]. PBL promotes the active construction of knowledge, critical thinking, autonomy, and the ability to solve complex challenges in authentic contexts [3, 4]. However, its application has rarely extended to unconventional and demanding topics such as variable mass systems in Physics, which combine theoretical depth with experimental complexity [5, 6]. This gap underscores the potential of PBL to expand its scope into areas of high theoretical significance yet limited classroom use [7, 8].

In recent years, PBL has shifted higher education from lecture-based instruction to collaborative and reflective practices that position students as active agents [9]. It has

addressed motivational barriers by integrating gamification into disciplines such as computing and design [10] and has proven especially suitable for STEM fields, where it strengthens engagement, knowledge integration, and soft skills including metacognitive reasoning [11], intrinsically motivated collaboration [12], and real-world problem-solving [13]. In the natural sciences, PBL has been applied to Physics and Mathematics through methods such as PODS (Prediction, Observation, Discussion, and Synthesis), supporting experimental topics like fluid mechanics and electromagnetism [14–16] and cognitive development in mathematical problem-solving [17, 18].

Despite its effectiveness, PBL integration with other emerging methodologies remains limited [19–21]. Challenges include the absence of concrete interdisciplinary STEM models, insufficient teacher training [22], a scarcity of resources for experimental contexts [23], and weak evaluation criteria for

learning outcomes [23]. These limitations are particularly evident in Physics and Chemistry, where experimentation is central yet PBL adoption is sporadic. The lack of structured models complicates the design of activities that connect theoretical concepts with laboratory practice, reducing the transformative potential of PBL in these fields [14–16].

The Tracker software has become a powerful and accessible tool for teaching physics, enabling video analysis to obtain precise and low-cost experimental data [24]. In this study, Tracker is employed in the analysis of a variable mass system using an Atwood machine with chains, allowing Newtonian and Lagrangian models to be contrasted with experimentation. This integration promotes active learning and strengthens research competencies in university contexts [25].

This study addresses these limitations by applying a Hmlo-Silver PBL model tailored to university science educators, focusing on variable mass systems. Using the Atwood machine with chains—a low-cost but powerful apparatus—the framework integrates Newtonian and Lagrangian modeling with direct experimentation. Unlike conventional PBL applications, this proposal offers a systematic teaching guide that links rigorous theory with empirical validation.

Students explore how Newton’s and Lagrange’s formulations complement one another, while experimental verification reinforces critical thinking and research-oriented skills [26,27]. The main contribution is an integrative PBL-based case study that demonstrates how complex mechanics topic’s can become accessible and engaging when theory and experimentation are coherently combined. The paper presents the PBL framework (Section II), the case study design (Section III), implementation results (Section IV), discussion (Section V), and conclusions (Section VI).

II. PROBLEM-BASED LEARNING METHODOLOGY

Problem-Based Learning is a student-centered educational methodology in which participants acquire knowledge on a given topic through collaborative group work aimed at solving an open-ended problem. This problem serves as the driving force behind both the motivation and the learning process [28, 29]. According to Norman and Schmidt, PBL is rooted in experiential learning theory, which emphasizes practical experiences during the learning process [30]. Given the nature of the problem-based scenario proposed in this study, the Hmelo-Silver model [27] is an appropriate choice. This model provides a structured framework that enables students not only to investigate and understand a problem but also to apply their knowledge in an experimental context and critically reflect on the outcomes. Table 1 outlines the details of the selected methodology.

Stage	Step	Description
Formulate and Analyze the Problem	Step 1: Problem Scenario	Students face a contextualized problematic situation supervised by a tutor, within a group setting, fostering an initial approach to analysis and understanding.
	Step 2: Identify Facts	Students examine the information provided in the scenario to identify relevant data that can help them better understand the problem.
	Step 3: Generate Hypotheses	Based on identified facts, students propose possible explanations or preliminary solutions that will guide the direction of the investigation.
	Step 4: Identify Deficiencies	The group determines areas of knowledge that need reinforcement to advance in solving the problem, identifying gaps in their understanding
Self-Directed Study	Step 5: Search for New Information	Students conduct independent research to gather the additional information needed to address the problem in a well-founded manner.
	Step 6: Define Strategies	Using the collected information, the group plans specific strategies and organizes to apply the knowledge in solving the problem.
Application and Evaluation	Step 7: Apply Knowledge	Students implement strategies and apply the acquired knowledge to solve the problem, integrating theory and practice.
	Step 8: Discussion and Evaluation	The group analyzes the obtained results, assesses the effectiveness of strategies, and reflects on the process to identify learning and improvement opportunities.
	Step 9: Conclusion	Students summarize their findings, document conclusions, and present their work.

Table 1. Structure of Problem-Based Learning.

III. CASE STUDY

Health Prof. Educ. This case study addresses a realistic and contextualized problem within the framework of analyzing physical systems with variable mass. The situation is designed as a didactic scenario that fosters the development of critical thinking and problem-solving skills, while simultaneously promoting collaborative work and evidence-based decision-making. Furthermore, it encourages

active inquiry through the application of the Problem-Based Learning (PBL) methodology, thereby consolidating a formative environment that integrates theory and practice in the construction of scientific knowledge.

III.1. Formulate and Analyze the Problem

III.1.1. Step 1: Problem Scenario

Problematic situation

At one university, faculty members have identified that many upper-level students lack the necessary skills to investigate and plan autonomously when confronted with real-world problems, which limits their ability to apply knowledge in practical contexts. To address these deficiencies from the early semesters, they consider Problem-Based Learning (PBL) as a promising methodology to strengthen these competencies. However, they face challenges due to the lack of detailed case studies that can serve as a guide for its implementation. In this context, you and your group are required to propose a case study that serves as a reference for both teachers and students, focused on the analysis of variable mass systems—a scarcely addressed topic—using PBL together with the Tracker video analysis tool as a pedagogical strategy.

When addressing the problem situation, interesting and challenging aspects can be identified that guide the case study approach. the case study approach can be identified.

Interesting: The application of variable mass systems in physics, since it is a topic that is not often addressed and seems to offer a direct connection with real situations such as the design of rockets or advanced mechanical systems.

Challenging: Integrating a pedagogical approach such as PBL with a technical subject, as it requires understanding both physical concepts and designing a case study that is effective for other students

III.1.2. Step 2: Identify the facts

In this stage, a preliminary search for information relevant to the problem scenario is conducted, with the purpose of establishing a theoretical and contextual framework to support the subsequent analysis.

The objective is to identify relevant data that will serve as a basis for a deeper and more accurate understanding of the situation presented. This process allows distinguishing between hard facts and assumptions, thus facilitating the formulation of key general and specific questions and the identification of areas that require further investigation.

Guiding Questions for the Initial Exploration

1. In what real-world situations are variable mass systems studied?
2. What physical principles govern the behavior of variable mass systems?
3. What experimental system to implement to study variable mass systems using accessible resources and free software for data collection and analysis?

III.1.3. Step 3: Generate hypotheses

The following hypotheses address different aspects of the problem and seek to guide the development of the research.

Hypotheses

1. Analyzing a case study on variable mass systems using PBL will improve research and autonomous planning skills when facing real-world problems.
2. The use of the video analyzer will allow obtaining data consistent with Newtonian and Lagrangian theory applied to a variable mass system, demonstrating its viability as an educational tool.

III.1.4. Step 4: Identify deficiencies

In Table 2, knowledge gaps are identified, detailing prior knowledge and the knowledge that needs to be reinforced to address the problem.

Knowledge area	Previous knowledge	Knowledge to be reinforced
Physics	Exercises of systems with constant mass.	Exercises of systems with variable mass.
Mathematics	Fundamentals of differential and integral calculus.	Ignorance of the Lagrange equation.
Research	Basic information search.	Planned search process.
TICs in education	Use of homemade components to perform experiments.	Use a video analyzer for experimental analysis.

Table 2. Knowledge gaps: prior knowledge and knowledge to be reinforced

III.2. Self-Directed Study

III.2.1. Step 5: Search for new information

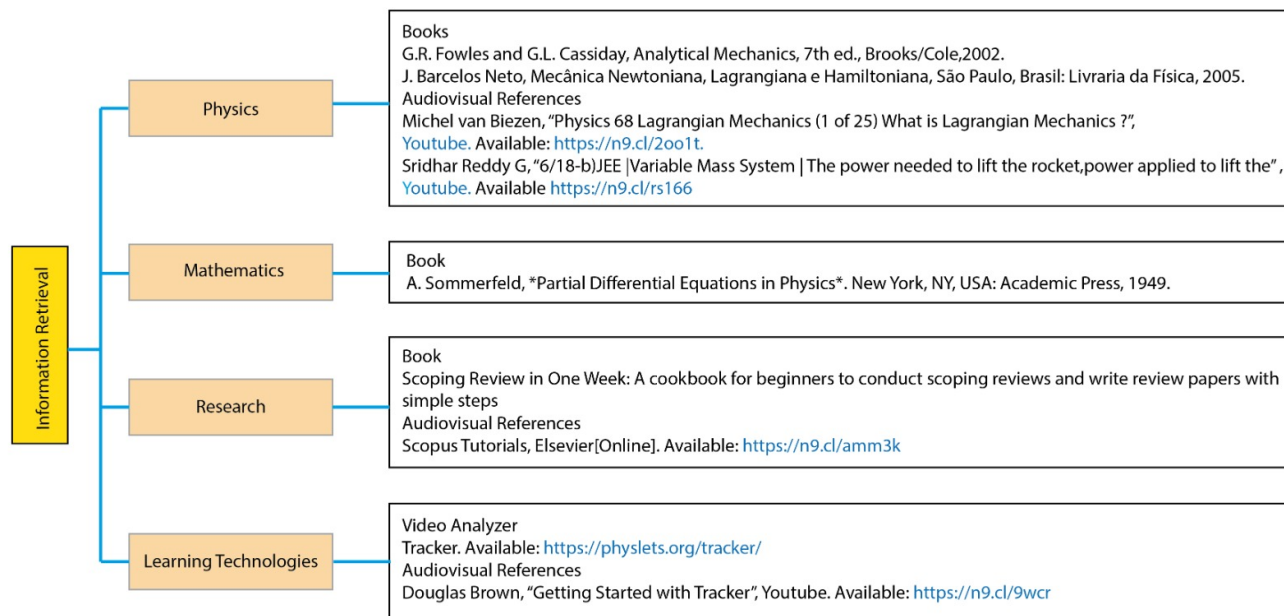


Figure 1. Resources consulted to strengthen the problem analysis.

To strengthen the problem analysis, specialized resources on Lagrangian formalism and differential calculus were consulted to address the weakness identified in step 4 of the PBL process. Additionally, an academic database search was conducted on the use of Problem-Based Learning in physics education. Finally, tutorials on the Tracker video analyzer were reviewed to enhance the acquisition and processing of position and velocity data. The organization of the most relevant resources is presented in Figure 1.

III.2.2. Step 6: Definition of strategies

At this stage, based on the information collected, the concrete strategy was planned (Figure 2). This stage is crucial, as it establishes the foundation for practical implementation.

IV. RESULTS

IV.1. Step 7: Apply New Knowledge

At this stage, we put into practice the acquisition of new knowledge gained during the planning and research process.

IV.1.1. Experimental setup

The system consists of a pulley fixed to the wall, through which an inextensible wire passes. One end of the wire holds a block m hanging vertically, while the other end is connected to a chain of mass M and length L .

Ascent of the chain: the chain is fully coiled on the ground, connected to the string at one end (Figure 3(a)). When the system is released, the block descends under the action of gravity, which causes the chain to begin to lift off the ground.

As the chain rises, the effective mass acting on the system increases progressively, modifying the dynamic conditions.

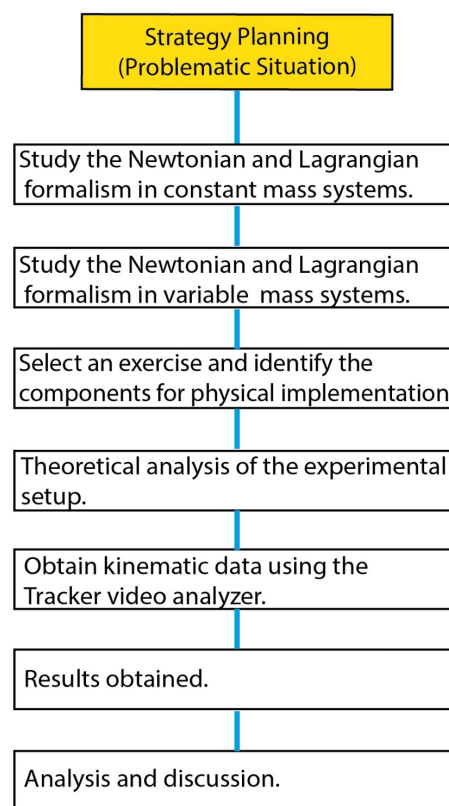


Figure 2. Strategy planning diagram.

Chain descent: initially, the chain hangs vertically from one end of the string, while the block hangs from the other end (Figure

3(b)). When the system is released, the chain begins to slide downward due to gravitational force, while the block ascends. In this case, the effective mass of the moving system varies continuously as the length of the suspended chain changes with time.

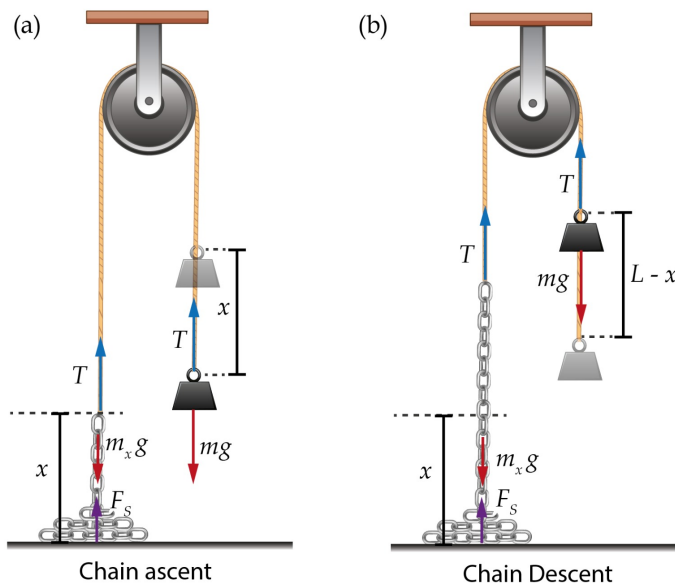


Figure 3. Illustration of the system with variable mass.

For the theoretical analysis, the system is modeled under several assumptions:

- The inertia of the pulley and the friction of its shafts are negligible.
- The mass of the yarn is negligible, and it lacks elastic properties.
- The influence of air resistance is ignored.
- Both the chain and the rope have a constant mass density along their length.
- The experiment is conducted in one dimension, meaning oscillations of the rope or the chain, as well as any effects, are not considered.

In both situations, the behavior of the kinematic quantities of one end of the chain will be studied. Instruments and materials used in the implementation of the experiment is shown in Figure 4.

1. Metal chain with a mass of 260 g and a length of 97 cm.
2. Metal cylinder with a mass of 100 g.
3. Nylon thread.
4. Plastic pulley.
5. Adhesive tape.
6. Ruler.
7. U-shaped pulley support.
8. Cellphone
9. Laptop- Software Tracker.
10. Digital scale.



Figure 4. Instruments and materials used in the implementation of the experiment.

IV.1.2. Acquisition of kinematic parameters

For data measurement, the open-source software Tracker was used, which allows for the precise analysis of the chain's position and velocity as functions of time (Figure 5).

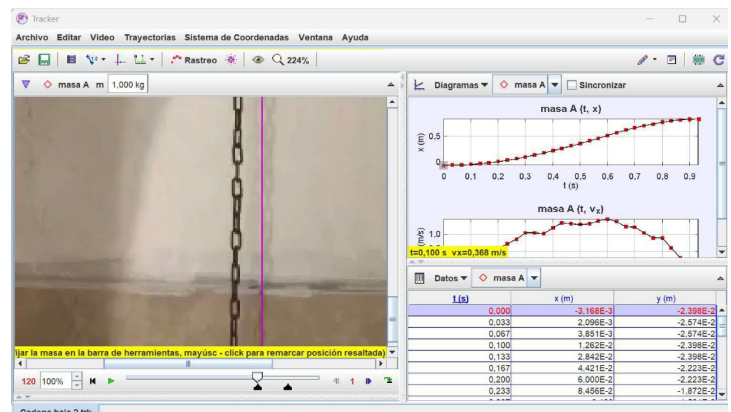


Figure 5. Tracker software interface.

IV.1.3. Theoretical analysis

At the ascent of the chain, From the free body diagram (Figure 5a) for the hanging block m , we obtain the dynamic equation:

$$mg - T = m \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

According to the momentum and quantity of motion theorem, the net force F_{net} acting on the chain is equal to the rate of change of its quantity of motion $m_x v$, where the upward mass is equal to $m_x = Mx/L$:

$$F_{net} = \frac{dp}{dt} = \frac{d(m_x v)}{dt}$$

$$T - \frac{M}{L}xg = \frac{M}{L}v^2 + \frac{M}{L}v \frac{dv}{dt}$$

Eliminating the tension T from the system of equations and expressing the nonlinear differential equation in terms of the position, we have:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{1}{\left(\frac{m}{M}L + x\right)} \left[\left(\frac{m}{M}L - x\right)g - \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 \right],$$

$$t = 0, x = 0, \frac{dx}{dt} = 0 \quad (3)$$

Equation (3) shows how the distance traveled varies as a function of time. It is possible to express the velocity as a function of chain height by rewriting (3) in terms of the velocity:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{\left(\frac{m}{M}L + x\right)} \left[\left(\frac{m}{M}L - x\right)g - (v)^2 \right] \quad (4)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dx}{dt} \frac{dv}{dx} = \frac{1}{2} \frac{dv^2}{dx}$$

$$\left(\frac{m}{M}L + x\right)^2 \frac{dv^2}{dx} + 2\left(\frac{m}{M}L + x\right)v^2 = 2\left(\frac{m}{M}L + x\right)\left(\frac{m}{M}L - x\right)g \quad (5)$$

By changing the variable $z^2 = \left(\frac{m}{M}L + x\right)^2 v^2$ and integrating, we obtain:

$$\int_0^z dz'^2 = 2g \int_0^x \left[\left(\frac{m}{M}L\right)^2 - (x')^2 \right] dx'$$

$$z^2 = 2g \left[\left(\frac{m}{M}L\right)^2 x - \frac{x^3}{3} \right]$$

$$v^2 = 2g \cdot \frac{\left(\frac{m}{M}L\right)^2 x - \frac{x^3}{3}}{\left(\frac{m}{M}L + x\right)^2} \quad (6)$$

We notice that when the block stops, the chain rises at $x = \sqrt{3} \frac{m}{M} L$.

At chain descent, as Figure 3(b), a similar analysis to the case of the ascent ($v < 0$) is performed for the block.

$$mg - T = m \frac{dv}{dt} \quad (7)$$

During the fall, the ground applies a force to stop the chain links. At a time dt , a mass dm whose velocity is v , collides

inelastically with the ground, causing a decrease in linear momentum. Therefore, the ground force will be:

$$F_s = v \frac{dm}{dt} = \frac{M}{L} v^2 \quad (8)$$

(2) The new force F_{net} acting on the chain is equal to the rate of change of its quantity of motion $m_x v$.

$$F_{net} = \frac{dp}{dt} = \frac{d(m_x v)}{dt}$$

$$T - \frac{M}{L}xg + \frac{M}{L}v^2 = \frac{M}{L}v^2 + \frac{M}{L}x \frac{dv}{dt} \quad (9)$$

Eliminating the stress T from the system of equations and expressing the differential equation in terms of the position, we have:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \left[\frac{\frac{m}{M}L - x}{\frac{m}{M}L + x} \right] g, \quad t = 0, x = L, \frac{dx}{dt} = 0 \quad (10)$$

By solving equation (9) by numerical methods we obtain the distance traveled as a function of time of the highest link in the chain. Using (4) we rewrite the equation in terms of the distance-dependent velocity.

$$\frac{dv^2}{dx} = 2 \left[\frac{\frac{m}{M}L - x}{\frac{m}{M}L + x} \right] g$$

We integrate,

$$\int_0^{v^2} dv'^2 = 2g \int_L^x \left[\frac{\frac{m}{M}L - x'}{\frac{m}{M}L + x'} \right] dx'$$

$$v^2 = 2 \left[L - x + 2 \frac{mL}{M} \ln \left(\frac{\frac{mL}{M} + x}{\frac{mL}{M} + L} \right) \right] g \quad (11)$$

From the Lagrangian perspective the dynamics of the masses is determined by equation (11), where the difference between the kinetic energy T and the potential U energy defines the Lagrangian ($\mathcal{L} = T - U$) of the system and Q_x represents the external non-conservative forces.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{x}} = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x} + Q_x \quad (12)$$

The energy and force expressions for the variable mass system are:

$$T = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{M}{L} x \right) \dot{x}^2$$

$$U = -mgx + \frac{1}{2} \left(\frac{M}{L} \right) g x^2$$

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{M}{L} x \right) \dot{x}^2 + mgx - \frac{1}{2} \left(\frac{M}{L} \right) g x^2 \quad (13)$$

Developing each term of (12), we have,

$$\begin{aligned}\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x} &= \frac{1}{2} \frac{M}{L} \dot{x}^2 + mg - \frac{M}{L} gx \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{x}} &= \left(m + \frac{M}{L} x\right) \dot{x} \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{x}} &= m\ddot{x} + \frac{M}{L} \dot{x}^2 + \frac{M}{L} x\ddot{x}\end{aligned}$$

Applying the Lagrangian for variable mass systems is not very usual and care must be taken with the analysis of Q_x to maintain the result using the Newtonian formalism. The derivative $\partial \mathcal{L} / \partial x$ contains a term that depends on $\dot{x}$, so we must consider the average linear momentum loss due to mass change. Therefore:

$$\begin{aligned}Q_x &= -\frac{1}{2} \frac{dm}{dt} \dot{x} = -\frac{1}{2} \frac{d}{dt} \left(\frac{M}{L} x \right) \dot{x} = -\frac{1}{2} \frac{M}{L} \dot{x}^2 \\ \left(m + \frac{M}{L} x\right) \dot{x} + \frac{M}{L} (\dot{x})^2 &= \frac{1}{2} \frac{M}{L} \dot{x}^2 + \left(m - \frac{M}{L} x\right) g - \frac{1}{2} \frac{M}{L} \dot{x}^2\end{aligned}\quad (14)$$

By multiplying equation (14) by Health Prof. Educ.L/M,

equation (3) is obtained. This shows that both approaches are effective in analyzing the dynamics of the problem.

IV.1.4. Experimental Results

Tracksuber software was used to record the velocity and position data as a function of time for the assembly in Figure 5. During the experiments, the variations in the velocity and position of the block while the chain was ascending (Figure 6) and during the descent (Figure 7) were analyzed. In addition, a graph of velocity as a function of position was obtained, which made it possible to observe the relationship between both magnitudes throughout the movement. To validate the experimental results, mathematical analyses were performed using the Newtonian and Lagrangian approaches, from which the corresponding theoretical equations were derived. These equations were compared with the experimentally obtained data, evidencing the consistency between the theoretical models and the measurements obtained with Tracker.

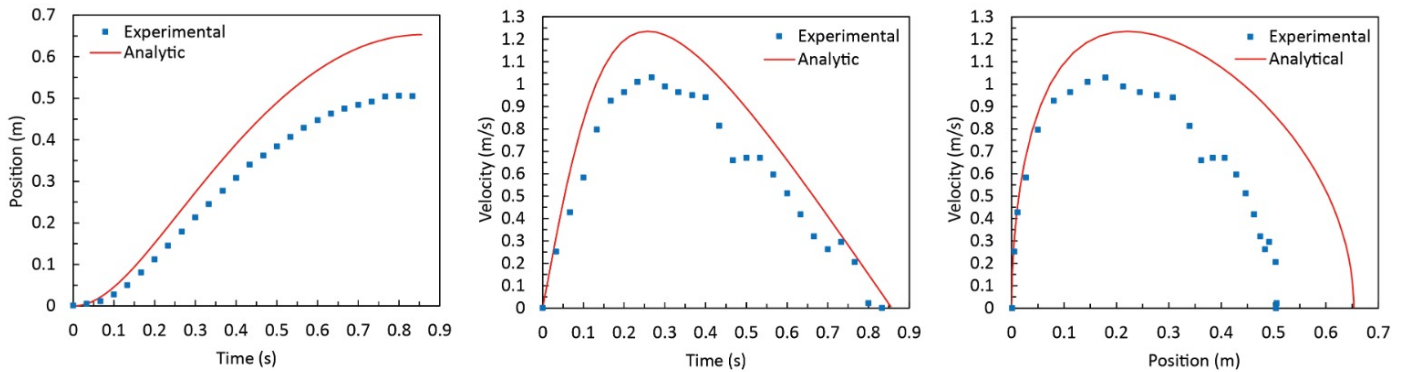


Figure 6. Experimental results obtained with Tracker (experimental) and the theoretical equations (analytical) for the motion of an Atwood's machine system with the chain in ascent.

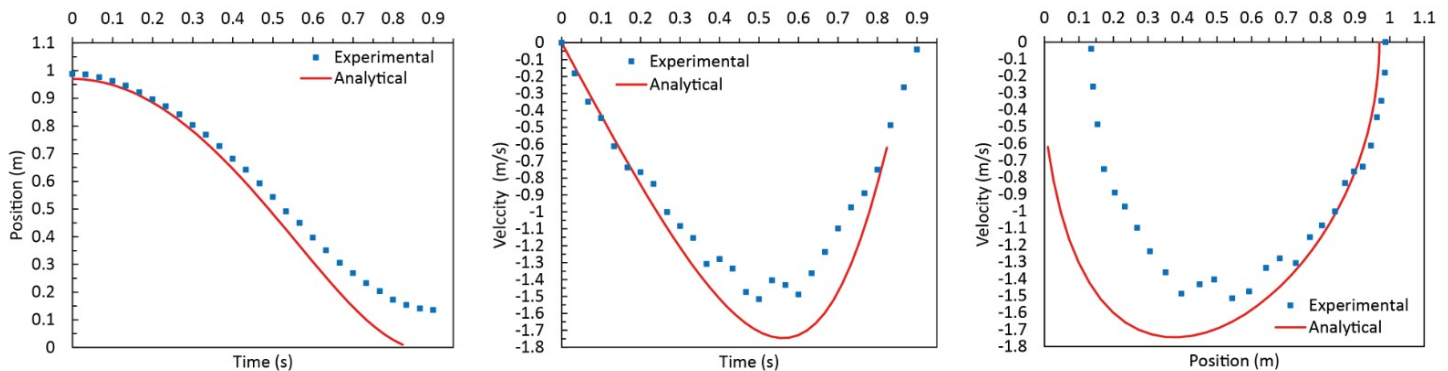


Figure 7. Experimental results obtained with Tracker (experimental) and the theoretical equations (analytical) for the motion of an Atwood machine system with the chain in descent.

V. DISCUSSION

V.1. Step 8: Discussion, evaluation and limitations

Problem-Based Learning (PBL) has been consolidated as an effective methodology to improve physics teaching [31], highlighting its ability to promote critical thinking, problem solving, and the connection between theoretical concepts and practical situations [32]. However, its implementation continues to pose a challenge for many teachers, as it requires careful preparation in designing relevant problems and facilitating learning without compromising student autonomy [33, 34]. In this context, the present article was developed with the purpose of providing a practical guide to help teachers implement PBL effectively in their courses. This guide not only assists educators in overcoming the inherent difficulties of this methodology but also offers students a clear structure of activities and deliverables for each stage of the process [35, 36]. In doing so, the aim is to optimize learning outcomes and foster a comprehensive and collaborative educational experience.

In the results for the variable mass system, a comparison between experimental measurements and theoretical predictions is observed for the ascent and descent of the chain. In the ascent (Figure 7), the position and velocity plots show a general trend that closely follows the theoretical predictions, although the experimental data show a slight discrepancy, especially in the initial phase of the motion. As time progresses, both position and velocity show a larger discrepancy compared to the theoretical, implying energy loss. The main factor for this discrepancy is that the mathematical model does not consider the undulations of the chain during the ascent, while the friction in the pulley has a negligible contribution. In the descent (Figure 7), the graphs show a better agreement between the experimental and theoretical results in terms of the shape of the curves. However, the experimental velocity presents a more pronounced deceleration than the theoretical one, which is attributed to the absence of undulations in the chain during its descent. Another influencing factor is the impact of the links during the fall, which is considered mathematically, but even so, a loss of energy is observed that is not contemplated in the model. Therefore, the results confirmed hypothesis 2, since it was evidenced that the use of the Tracker video analyzer, with the support of a cell phone, captures in a good way the behavior of the movement and its statistical analysis. In addition, it stands out as an excellent educational tool, since it does not require the acquisition of commercial kits, allowing students to perform experiments in an accessible and economical way.

Among the main limitations identified, one of the most significant was the use of a mobile phone with a capture rate of 30 frames per second (fps) for experimental analysis. This configuration limits the accuracy of the Tracker software in tracking the motion of the chain, particularly in phases that require more detailed data. It is recommended to use devices with higher resolution or high-speed cameras to improve precision in future experiments. Another limitation identified

was the lack of bibliographic material that thoroughly addresses the analysis of variable mass systems using the Lagrangian approach. Although numerous resources develop Lagrangian analysis for constant mass systems, a significant gap was observed in specific information regarding its application to variable mass systems, both in textbooks and in the reviewed articles and videos.

VI. CONCLUSION

VI.1. Step 9: Conclusions

This study demonstrates that applying a structured Problem-Based Learning (PBL) model to variable mass systems provides an effective framework for linking academic training with research practices. Using the Atwood machine with chains as a case study, the proposal shows how integrating theory and experimentation strengthens critical thinking, research skills, and the communication of results. Consequently, this approach stands as a practical guide for both instructors and students, contributing to the expansion of PBL in university physics education.

REFERENCES

- [1] E.H. Yew and K. Goh, *Health Prof. Educ.* **2**, 75 (2016)
- [2] S. Nargundkar, S. Samaddar, and S. Mukhopadhyay, *Decision Sciences Journal of Innovative Education* **12**, 91 (2014)
- [3] F.A. Ikhsan, S. Sumarni, and S. Utaya, *J. Educ. Learn. (EduLearn)* **19**, 169 (2025)
- [4] T.X. Zou, J.C. Lee, K.S. Yu, K.L. Chow, T.J. Barry, and L.Y. Leung, *High. Educ.* **88**, 1205 (2024)
- [5] B. Gäßler, L.E. Brieze, B.P. Acquatella, P. Simplicio, S. Bennani, and M. Casasco, *Conference: The 9th European Conference for Aeronautics and Space Sciences* (2022)
- [6] M. Thomaz, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **43**, e20210090 (2021)
- [7] C.A. de Sousa, *Phys. Educ.* **47**, 169 (2012)
- [8] J.E. Hurtado, J. Guid. *Control. Dyn.* **41**, 701 (2018)
- [9] J.E. Trinidad, J. Furth. *Higher Educ.* **44**, 1013 (2020)
- [10] M. Moradi and N.F.B.M. Noor, *IEEE Access* **10**, 8339–8349 (2022)
- [11] S.F. Rivas, C. Saiz, and C. Ossa, *Front. Psychol.* **13**, 913219 (2022)
- [12] C. Fernández-Espínola, M.T. Abad Robles, D. Collado-Mateo, B.J. Almagro, E. Castillo Viera, and F.J. Gimenez Fuentes-Guerra, *J. Environ. Res. Public Health* **17**, 4451 (2020)
- [13] M.S.J. Maftuh, U.S. Lawal, M. Ade, A.V. Lama, and A.F. Adzim, *J. Educ. Learn.* **1**, 54 (2023)
- [14] M.F.R. Savio, C.A. Glusko, and G.N. Dima, *Rev. enseñ. fís.* **27**, 511 (2015)
- [15] C.A. Glusko, M.F.R. Savio, and G.N. Dima, *Rev. enseñ. fís.* **27**, 519 (2015)
- [16] G.N. Dima, M.F.R. Savio, and C.A. Glusko, *Rev. enseñ. fís.* **27**, 63 (2015)

- [17] W.J.P. Valdez, J.J.L. Cedeño, A.C.A. Chávez, and C.I.E. Cordero, *Suplemento CICA Multidisciplinario* **6**, 62 (2022)
- [18] J.A.O. Diaz and G.F.C. Lozano, *Tecnol. cienc.*, 155 (2022)
- [19] R. Tytler, *An international perspective*, 21 (2020)
- [20] Y. Dong, J. Wang, Y. Yang, and P.M. Kurup, *Int. J. STEM educ.* **7**, 1 (2020)
- [21] X. Gao, P. Li, J. Shen, and H. Sun, *Int. J. STEM educ.* **7**, 1 (2020)
- [22] K. Morrissey, J. Fraser, and T. Ball, *Museums & Social Issues* **16**, 78 (2022)
- [23] K.D. Su and H.Y. Chen, In *Proceedings of the International Conference on Innovative Technologies and Learning* (Springer, 2022) pp. 355
- [24] D. Brown, *Tracker Video Analysis and Modeling Tool* (Open Source Physics, 2009).
<https://physlets.org/tracker/>
- [25] A.A. Hernández Ferreira, Y. Hernández Ramírez, and E. Quintana Cabrera, *Revista Conrado* **20**(104), e4317 (2025)
- [26] D.A. Kolb, *Experiential learning: Experience as the source of learning and development* (Pearson, 2014)
- [27] C.E. Hmelo-Silver, *Educ. Psychol. Rev.* **16**, 235 (2004)
- [28] Servicio de Innovación Educativa de la UPM, *Aprendizaje Basado en Problemas* (Innovación Educativa, Madrid, 2008)
- [29] J.A. Fredricks, P.C. Blumenfeld, and A.H. Paris, *Review of Educational Research* **74**, 59 (2004)
- [30] G.R. Norman and H.G. Schmidt, *Medical Education* **50**, 793 (2016)
- [31] M. Sahin, *Journal of Science Education and Technology* **19**, 266 (2010)
- [32] A.S. Argaw, B.B. Haile, B.T. Ayalew, and S.G. Kuma, *Eurasia J. Math., Sci. Tech. Educ.* **13**, 857 (2016)
- [33] H.S. Atwa, W.A. Nasr El-Din, A.P. Kumar, B.K. Potu, Y.I. Tayem, A.M. Al-Ansari, A.S. Deifalla, and M.H. Shehata, In *Proceedings of the Frontiers in Education* (Frontiers Media SA, 2024) Vol. 9, p. 1354494
- [34] L. Marcinauskas, A. Iljinas, J. Čyviienė, and V. Stankus, *Educ. Sci.* **14**, 154 (2024)
- [35] M.B. Gómez-Millán and I.C. Esquivia, *REDU. Revista de Docencia Universitaria* **17**, 197 (2019)
- [36] N. Suryanti and Nurhuda, *Int. J. Instruction* **14**, 665 (2021)

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) license.



EFFECTS OF COHERENCE AND DOMAIN WALLS ON DIFFRACTION PROFILES IN RARE-EARTH DOPED PbTiO_3 . EFECTOS DE LA COHERENCIA Y LAS PAREDES DE DOMINIO EN LOS PERFILES DE DIFRACCIÓN EN PbTiO_3 DOPADO CON TIERRAS RARAS.

D. CAMEJO-GONZÁLEZ^a, A. PENTÓN-MADRIGAL^{ib,a,b†}, A. PELÁIZ-BARRANCO^{ic}

a) Facultad de Física, Universidad de la Habana, San Lázaro y L. CP 10400. La Habana. Cuba. arbelio@fisica.uh.cu[†]

b) Instituto de Ciencias y Tecnología de Materiales, Universidad de la Habana (IMRE).

c) Grupo de Materiales Ferroicos, Facultad de Física, Universidad de la Habana. San Lázaro y L, Vedado. La Habana 10400, Cuba.

[†] corresponding author

Recibido 12/9/2025; Aceptado 15/11/2025

The paper presents a study concerning the coherence and domain wall effects on the profile of selected X-ray diffraction (XRD) peaks from the ferroelectric system $\text{Pb}_{0.92}\text{Ln}_{0.08}\text{TiO}_3$ ($\text{Ln}^{3+} = \text{La}^{3+}, \text{Dy}^{3+}$). The analysis focuses on the hkl -dependent broadening and asymmetry of certain diffraction peaks. The study was conducted using a diffraction model evaluated with experimentally determined parameters from XRD and Transmission Electron Microscopy (TEM). The results show that both coherence effects and domain wall scattering contribute significantly to peak asymmetries and diffuse intensity between $(h00)/(00h)$ doublets. The results also show that these effects are sensitive to domain size being more pronounced in lower-order reflections. The choice of dopant directly impacts microstructural parameters. The study highlights the complexity of quantifying ferroelectric microstructures alone from diffraction data.

El artículo presenta un estudio sobre los efectos de coherencia y de pared de dominio en el perfil de determinados máximos de difracción de rayos X (DRX) del sistema ferroeléctrico $\text{Pb}_{0.92}\text{Ln}_{0.08}\text{TiO}_3$ ($\text{Ln}^{3+} = \text{La}^{3+}, \text{Dy}^{3+}$). El análisis se centra en el ensanchamiento y la asimetría dependientes de hkl de ciertos picos de difracción. El estudio se realizó utilizando un modelo de difracción evaluado con parámetros determinados experimentalmente mediante DRX y microscopía electrónica de transmisión. Los resultados muestran que tanto los efectos de coherencia como la dispersión de pared de dominio contribuyen significativamente a las asimetrías de los picos y a la intensidad difusa entre los dobletes $(h00)/(00h)$. Los resultados también muestran que estos efectos son sensibles al tamaño del dominio y es más pronunciado en reflexiones de orden inferior. La elección del dopante afecta directamente a los parámetros microestructurales. El estudio destaca la complejidad de cuantificar las microestructuras ferroeléctricas únicamente a partir de datos de difracción.

Keywords: X-ray diffraction (Difracción de rayos X), microstructure (Microestructura), crystal defects (Defectos cristalinos), Fourier analysis (Análisis de Fourier), ferroelectric materials (Materiales ferroeléctricos).

I. INTRODUCTION

Ferroelectric ceramics based on lead titanate (PbTiO_3) are characterized by a domain structure that dictates their functional performance [1]. A critical aspect of microstructural characterization is understanding the contributions of various defects to X-ray diffraction (XRD) profiles, which are commonly used to determine microstructural parameters. In materials with 90° domain walls, such as tetragonal ferroelectrics, the analysis is complicated by anisotropic peak broadening, asymmetry, and diffuse scattering between fundamental reflections like the $(00h)/(h00)$ doublet [2–9].

While domain walls are often cited as the primary source of these features, the role of coherence effects - the constructive and destructive interference of X-rays between adjacent crystalline domains - is frequently overlooked. Subsequent studies have further emphasized the importance of accounting for these effects in materials with complex domain structures [9–13]. This work presents an analysis of these contributions in rare-earth doped PbLnTiO ($\text{Ln}^{3+} = \text{La}^{3+}, \text{Dy}^{3+}$). Lead titanate (PT) ferroelectric system exhibits a high tetragonality, which promotes microstructural strains

when the temperature changes around the Curie temperature and prevents the sintering of high density ceramic materials. Therefore, the study of lanthanide doping (PT) has attracted increasing attention, providing a lower tetragonality while good piezoelectric and ferroelectric properties are retained [14, 15].

A simple diffraction model [9] allows evaluating numerically both coherence and domain wall effects contributions to the diffracted intensity distribution from two neighboring domains. Boysen's model approaches the diffraction problem as a stacking of ordered atomic planes, where domain boundaries act as stacking faults (twins). In [9] it is demonstrated, through calculated examples, how these effects modify the intensity distribution in specific crystalline systems. Intensity distributions are generated for a given number of atomic layers within the ferroelectric domain, based on a specific selection criterion. The resulting data is then compared with experimental intensity distributions. In contrast, this manuscript explores the possibility of directly determining the average number of atomic layers within the domain from high-resolution XRD and TEM experiments to evaluate the model and thus estimate the coherence and

domain wall effects on the observed intensity distribution.

II. THE DIFFRACTION MODEL

From the Boysen model, expressions (1) and (2) can be obtained, which are key to the diffracted intensity distribution [9]. Equation (1) describes the diffracted intensity for two neighboring ferroelectric domains separated by an infinitely thin domain wall: quiero algo asi

$$I = 1 + S_1^2 + S_2^2 + S_{coh} \quad (1)$$

with

$$S_1 = \frac{\sin(\pi N(\Delta_x \xi + \Delta_v \eta))}{\sin(\pi(\Delta_x \xi + \Delta_v \eta))} \text{ and } S_2 = \frac{\sin(\pi N(\Delta_x \xi - \Delta_v \eta))}{\sin(\pi(\Delta_x \xi - \Delta_v \eta))} \quad (1a)$$

where S_1^2 and S_2^2 represent the intensities from each domain separately, and the constant 1 in (1) is the contribution from the domain wall. The coherent term S_{coh} (interference term in [9]) is given by:

$$S_{coh}(h) = 2\gamma \left(\frac{\sin(\beta(h + rk))}{\sin(\pi(h + rk))} \cdot \frac{\sin(\beta(h - rk))}{\sin(\pi(h - rk))} \right) \quad (1b)$$

where $\gamma = \cos(2\pi Nh - 1)$ and $\beta = \pi(N + 1)$.

In equation (1a) Δ_x represents a constant spacing of atomic planes parallel to the infinitely thin domain wall; Δ_v represents a constant lateral shift of such planes respect each other perpendicular to the stacking direction (see Fig. 1a in [9]). The quantities ξ and η are defined in reciprocal units. In both, (1a) and (1b), N can be assumed as the average number of atomic planes in each domain.

In equation (1b) the Miller indices h and k are defined with respect to a cubic crystallographic basis, where h takes continuous values and k takes integer values. The quantity r is related to the strain defined as:

$$r = \frac{1 + e}{2}, \quad \text{with } e = \frac{\Delta_v - \Delta_x}{\Delta_x}.$$

On the other hand, equation (2) incorporates the finite width of the domain wall into the diffracted intensity distribution:

$$F(h) = \sum_{n=-N}^N \exp \left[2\pi i \left(nh + \frac{\Delta_x}{\Delta_y} \left[\pm n + e_o \cdot n_w \cdot \ln \left[\cosh \left(\frac{n}{n_w} \right) \right] \right] k \right) \right] \quad (2)$$

where $W = n_w \Delta_x$ is the width of the wall expressed in units of Δ_x . Equations (1) and (2) can be evaluated numerically as a function of N for integer values of k over a given range of h . The remaining parameters in (1) and (2) are determined by the lattice parameters of the crystal system.

To analyze the contribution of coherence effects and domain walls to the intensity distribution, the average coherent domain size is defined as [9]:

$$\langle L \rangle = N \Delta x \quad (3)$$

where $\langle L \rangle$ represents the average coherent domain size. This quantity can be determined directly from peak profiles analysis of the diffraction maxima. Given $\langle L \rangle$, N is calculated from equation (3).

III. EXPERIMENTAL PROCEDURE

The $\text{Pb}_{0.88}\text{La}_{0.08}\text{TiO}_3$ (PTLa8) and $\text{Pb}_{0.88}\text{Dy}_{0.08}\text{TiO}_3$ (PTDy8) ceramics were synthesized via the conventional ceramic method [16]. Both compositions were selected from a wide lanthanide series considering their significantly different properties (e.g., spontaneous polarization) and degrees of tetragonality [13].

High-resolution XRD experiments were carried out at the XPD line at LNLS, Campinas, Brazil. A Hubber diffractometer with Bragg-Brentano geometry was equipped with a Si(111) monochromator crystal and a Ge(111) analyzer crystal, using a wavelength of 1.77093 Å. Powder samples were mounted on a rotating sample holder to improve measurement statistics. Data were collected at room temperature from 20° to 98° with a step size of 0.02°. A LaB_6 standard was measured to account for the instrumental contribution to peak profile.

Transmission electron microscopy (TEM) was conducted at 200 kV on one JEM- 2100 TEM, Jeol). Samples for TEM were prepared by a mechanical process (Disc grinder Mod. 623 and Dimple Grinder Mod. 656, Gatan) followed by Ar ion milling (PIPS 691, Gatan).

IV. EVALUATING COHERENCE AND DOMAIN WALL EFFECTS BY USING EXPERIMENTAL DATA FOR PTLA8 AND PDY8 CERAMICS

The average coherent domain size and unit cell parameters were determined from high-resolution XRD patterns in order to evaluate equations (1) and (2). Figure 1 shows the selected reflections for the analysis, the (001)/(100) and (002)/(200) doublets for each system. They allows analysis along two mutually perpendicular crystallographic directions: [001] and [100], including reflections of different orders. The ($h00$) and ($00h$) peaks exhibit details that vary with the rare-earth element. Anisotropic broadening is observed, ie. the integral width for the ($00h$) peaks is greater than that of the ($h00$) peaks. The diffuse intensity between the doublets, resulting in asymmetry, is typically associated with 90° domain wall effects [2, 6–9]. The ($00h$) peaks are asymmetric on the right side, while the ($h00$) peaks are asymmetric on the left side. Peaks of the form (hkh) show no asymmetry. These anisotropic broadening and asymmetry effects are more pronounced in the PTLA8 sample.

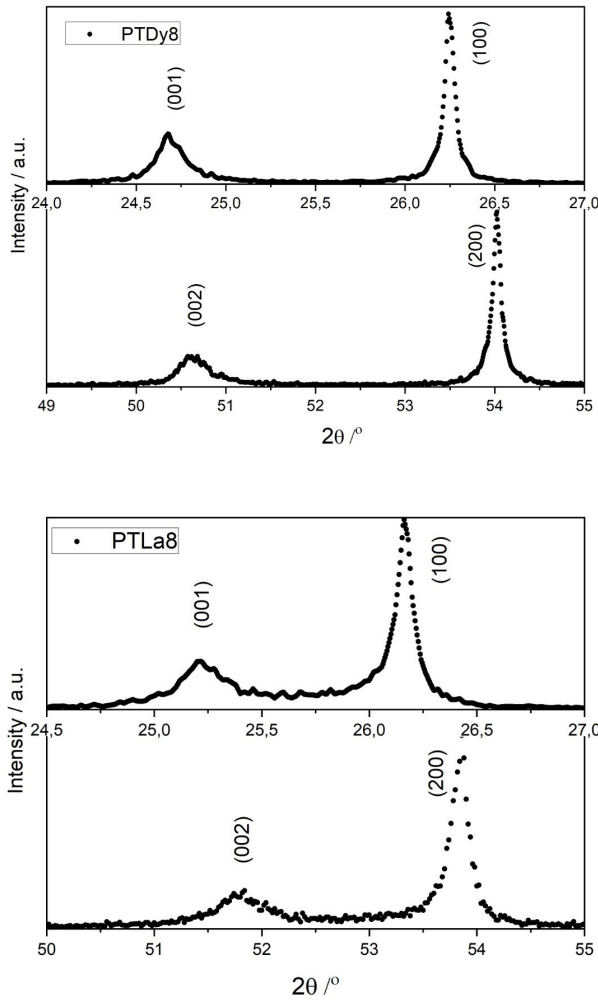


Figure 1. Peak shapes for PTdy8 and PTLA8, where $(00h)$ peaks exhibit asymmetry on the right side of the profile while the $(h00)$ peaks exhibit it on the left side.

The Warren-Averbach (WA) method [17] was applied, by using Fourier analysis, to investigate the ferroelectric microstructure. Reflections of different orders were selected to separate contributions from coherent domain size and non-uniform microstrains to the diffraction profiles. The selected $(001)/(002)$ and $(100)/(200)$ doublets satisfy the requirement of nonoverlapping with neighboring reflections, though care was taken with PTLA8 due to partial overlap in the internal region of the doublets (Fig. 1).

Following [6], the symmetric and asymmetric components of the doublets were separated. The left side of the $(00h)$ profiles and the right side of the $(h00)$ profiles were fitted using a split pseudoVoigt (pVwith) function, accounting for background. Symmetric profiles were simulated using pV functions based on the fitted parameters from each side, and the asymmetric components were obtained by subtracting these symmetric profiles from the experimental data.

Figure 2 shows the normalized experimental peaks (black points) and the calculated symmetric profiles (solid red curves) for the $(002)/(200)$ doublet. The difference curves

(bottom) represent the asymmetric components between the maxima positions $2\theta_{max}^{(002)}$ and $2\theta_{max}^{(200)}$. As referenced above, the asymmetric components are attributed to diffuse scattering from the 90° domain walls, while the symmetric components can be associated with the ferroelectric domains. After obtaining the symmetric profiles, the instrumental contribution was removed using a LaB_6 standard.

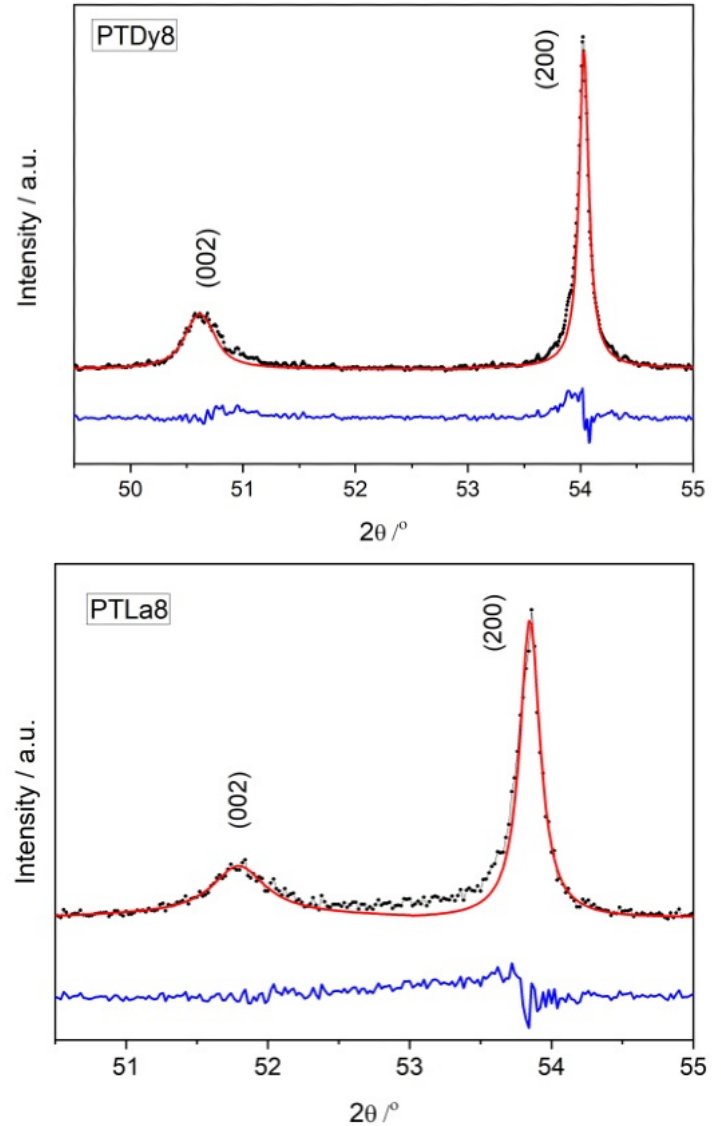


Figure 2. Experimental peaks (black), symmetric peaks (red) and the curve difference between them (blue) are shown for the $(002)/(200)$ doublet of each sample.

IV.1. Symmetric components of the $(00h)/(h00)$ doublets.

Two pairs of intrinsic symmetric reflections of different orders allowed the application of the WA method along the $[001]$ and $[100]$ directions. Assuming that crystal defects other than domain walls do not significantly affect the peak width, the calculated coherent domain size $\langle L \rangle$ can be considered a good approximation of the ferroelectric domain size and shape.

Figure 3 shows calculated Fourier coefficients (A_L^S) for

[001] and [100] directions. As stated by the WA method, the intercept of the initial slope of each curve with the abscissa axis (e.g. red dotted line) represents the average value of coherent domain size $\langle L \rangle$ and it can be assumed as the average ferroelectric domains sizes along the two considered crystallographic directions.

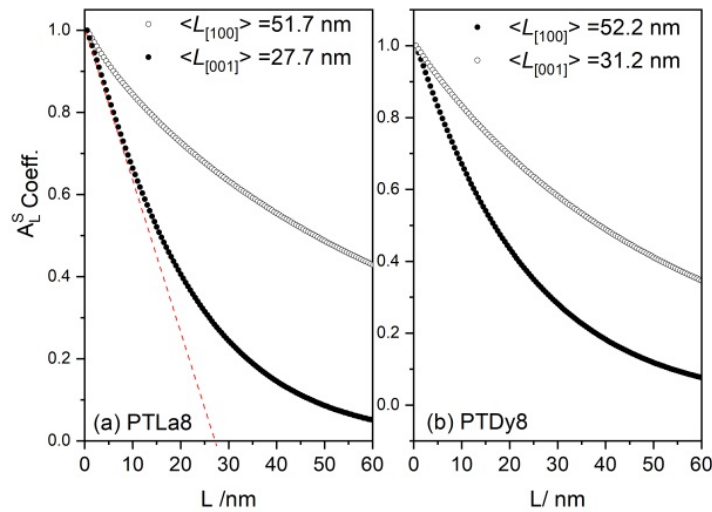


Figure 3. Fourier coefficients A_L^S for multi-order reflections and the corresponding $\langle L \rangle$ values along the [100] and [001] crystallographic directions for (a) PTLa8 and (b) PT Dy8.

The average number of atomic layers per domain $\langle N \rangle$, was calculated using equation (3) by the computed values of $\langle L \rangle$ and Δ_x . Referring to Fig. 1a in [9], the quantities Δ_x and Δ_y have been redefined for the purpose of the present study and they can now be expressed in terms of: $\langle L \rangle_{[100]}$ and $\langle L \rangle_{[001]}$ as:

$$\Delta_y^* = \sqrt{(\langle L \rangle_{[100]})^2 + (\langle L \rangle_{[001]})^2} \quad (4a)$$

$$\Delta_x^* = \frac{(\langle L \rangle_{[100]}) (\langle L \rangle_{[001]})}{\Delta_y^*} \quad (4b)$$

The average number of layers in each domain can be estimated as:

$$\langle N \rangle = \frac{\Delta_x^*}{\Delta_y} \quad (5)$$

Table 1 summarizes the unit cell and microstructural parameters for each sample along the [100] and [001] directions.

Parameter	Sample	
	PTDy8	PTLa8
$a / \text{\AA}$	$3.8989 \pm 4\text{E-}4$	$3.9112 \pm 9\text{E-}4$
$c / \text{\AA}$	$4.1398 \pm 6\text{E-}4$	$4.0529 \pm 1\text{E-}4$
$\langle L \rangle_{[100]} / \text{nm}$	52.2 ± 0.1	51.7 ± 0.2
$\langle L \rangle_{[001]} / \text{nm}$	31.2 ± 0.2	27.7 ± 0.2
$\langle L \rangle / \text{nm}$	26.8 ± 0.2	24.4 ± 0.2
$\langle N \rangle$	94 ± 1	86 ± 1

Table 1. Sample parameters for PT Dy8 and PTLa8.

The results indicate that ferroelectric domains are elongated nano-regions along the [100] direction and narrower along the [001] direction within the grains. This lamellar microstructure has been reported in other ferroelectric ceramic systems [18]. The nano-sized domains suggest that $(\text{Pb}, \text{Ln})\text{TiO}_3$ develops a high density of domain walls (twinned crystals). Doping affects the average domain size, which decreases with decreasing ionic radius, particularly along [001]. This can be interpreted as an increase in 90° domain wall density.

The XRD results agree with TEM experiments. TEM micrographs of PTLa8 (Fig. 4) reveal a dense distribution of 90° domain walls with the described lamellar morphology. Suitable TEM samples for PT Dy8 could not be prepared.

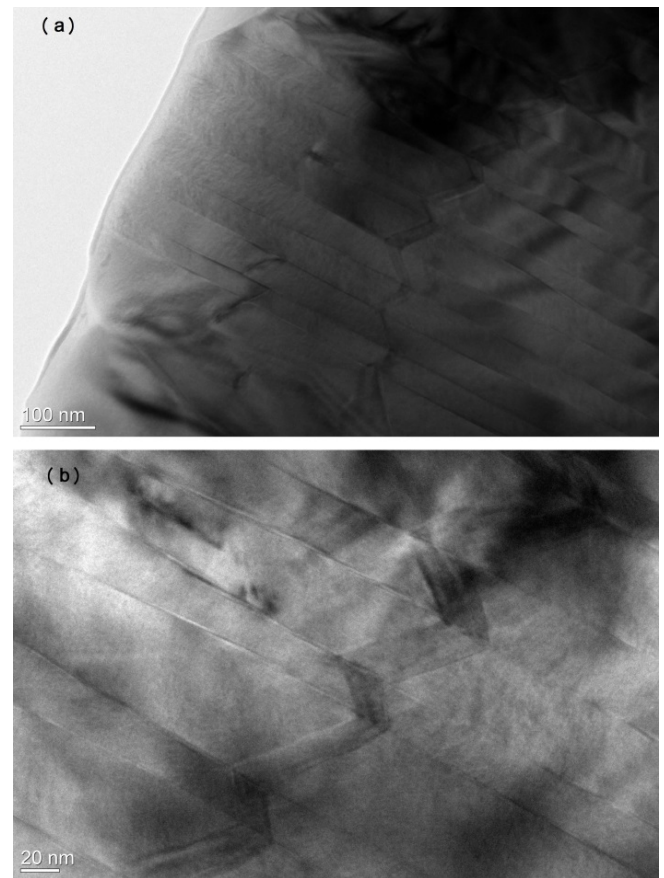


Figure 4. TEM micrograph of the PTLa8 sample showing (a) contrast due to high density of twinning within a grain, (b) magnification of the same area revealing details of domain walls.

Using the calculated $\langle N \rangle$ values (Table 1), equation (1) can be evaluated numerically in the reciprocal space. The coherence effect on the diffracted intensity from two neighboring domains is represented for any of the peaks of the doublet. Figures 5 and 6 show the intensity distribution for $k = 1$ and $k = 2$ for both $\langle N \rangle$ values. The top panels show the coherence term (S_{coh}), and the bottom panels show the total intensity distribution.

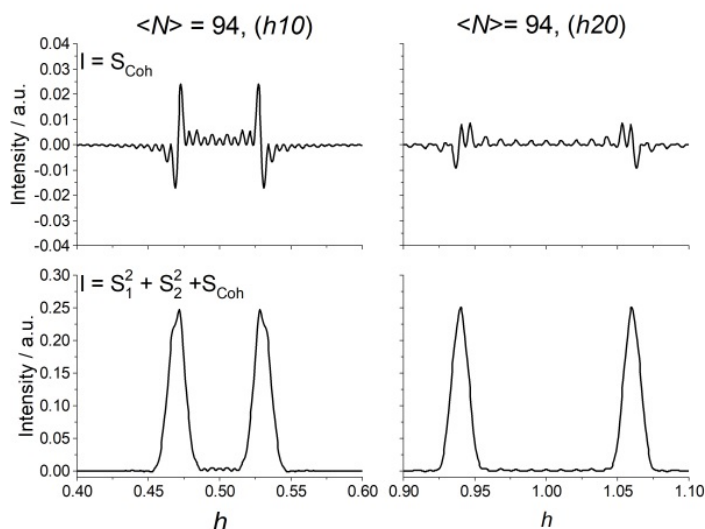


Figure 5. Coherence effect between neighboring domains for $\langle N \rangle = 94$ with $k = 1$ and $k = 2$. Top panel shows the S_{coh} term; bottom panel shows the total diffracted intensity.

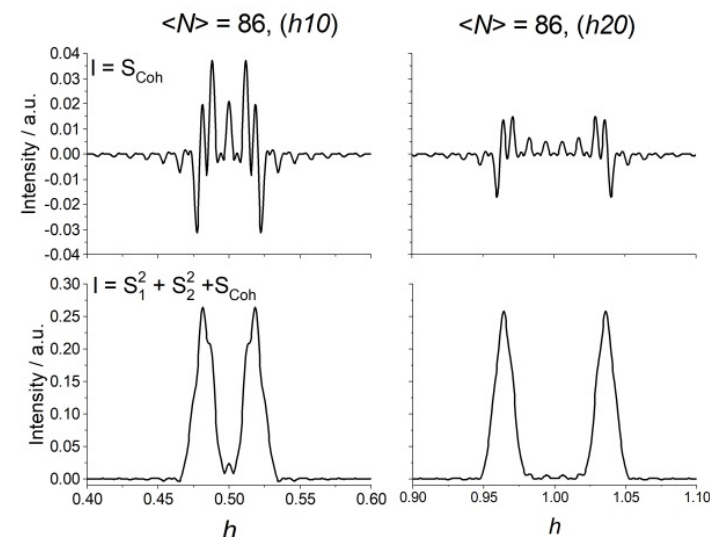


Figure 6. Coherence effect between neighboring domains for $\langle N \rangle = 86$ with $k = 1$ and $k = 2$. Top panel shows the S_{coh} term; bottom panel shows the total diffracted intensity.

Some conclusions can be drawn from the above results. Coherence effects are sensitive to $\langle N \rangle$ ($\langle L \rangle$). For $\langle N \rangle = 94$, the contribution to the total diffracted intensity is approximately 7% for $k = 1$ and 4% for $k = 2$. For $\langle N \rangle = 86$, it is 11% for $k = 1$ and 7% for $k = 2$. A smaller coherence length increases the contribution of the S_{coh} term. This contribution also depends on the reflection order k , decreasing for higher orders.

For $\langle N \rangle = 86$ and $k = 1$, significant modifications of the profile are observed (Fig. 6, bottom panel). The maxima show small «shoulders» in the inner part of the profiles, as well as the occurrence of a very low-intensity reflection at $h = 0.5$. Similar effects were reported in [4, 9] for even smaller values of $\langle N \rangle$ in an equivalent undoped system. These coherence effects could be misinterpreted as a reduction in crystal symmetry,

inhomogeneous chemical composition, or coexistence of a cubic phase from the para-ferroelectric transition.

Therefore, the asymmetries and diffuse intensity in the experimental doublets (Fig. 2) could be influenced not only by domain wall effects but also by coherence between neighboring domains, particularly in PTLa8. To isolate domain wall effects, higher-order reflections ($k \geq 2$) should be used to minimize coherence contributions.

IV.2. Study of the Contribution from Domain Walls with Finite Thickness.

In order to generalize the analysis, the diffracted intensity was evaluated by using equation (2), which includes contributions from the 90° domain walls of finite thickness. For that, it was necessary to estimate the thickness of these walls. Figure 7(a) shows a high-resolution TEM micrograph of PTLa8 with a contrast from two 90° ferroelectric domains. Figure 7(b) shows superimposed electron diffraction patterns from the two domains, with split maxima resulting from their 90° orientation difference.

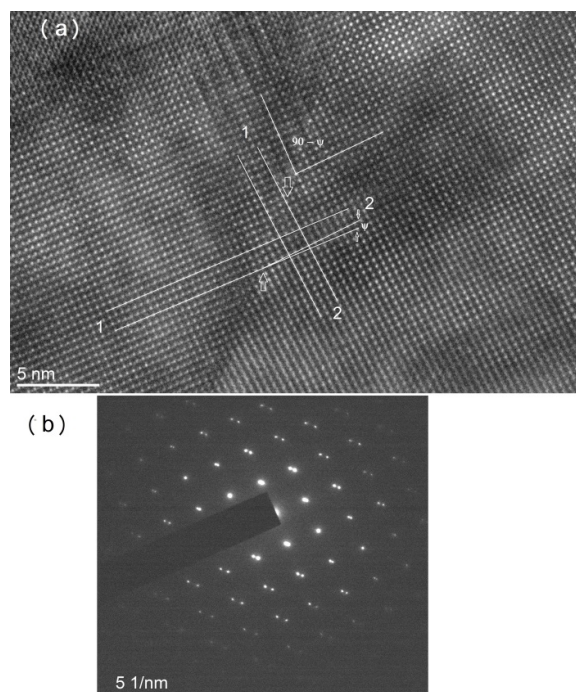


Figure 7. TEM image of sample PTLa8. (a) Contrast associated with a 90° domain wall separating two neighboring ferroelectric domains. (b) Superposition of electron diffraction patterns from the two adjacent domains.

The image was divided into zone 1 (left domain) and zone 2 (right domain). Atomic arrangements deviate at the interface (indicated by arrows), confirming the presence of a thin 90° domain wall between the zones.

The angle between the atomic arrangements of domains 1 and 2 was measured directly from the micrograph. Using $(90^\circ - \psi)$, where $\psi = 2.8^\circ$, it gives 87.2° . This deviation from 90° is necessary to create a coherent twinning interface. The relationship $90^\circ - \psi = 2 \arctan(c/a)$ [2] yields $c/a = 1.05$, close to the value of 1.036 determined from XRD for PTLa8.

The difference arises from the nature of the used techniques. Direct measurement of the number of atomic planes in the micrograph (region indicated by arrows in Fig. 7a) estimates the domain wall width to be 3–4 unit cells (approximately 1.2–1.6 nm). This agrees with values reported for other ferroelectric systems. Figures 8 and 9 show the intensity distributions, including coherence effects between adjacent domains (top panels, similar to Figures 5 and 6) and the total intensity calculated for two estimated domain wall widths (2W) in atomic layers.

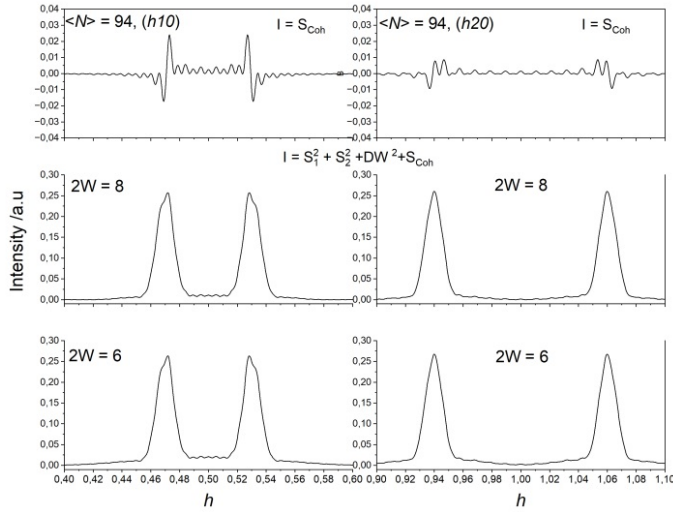


Figure 8. Top panel: Coherence effect between neighboring domains for $\langle N \rangle = 94$ with $k = 1$ and $k = 2$ (as in Fig. 6). Bottom panel: calculation of the total diffracted intensity for the finite wall case, $2W = 8$ and $2W = 6$ atomic layers.

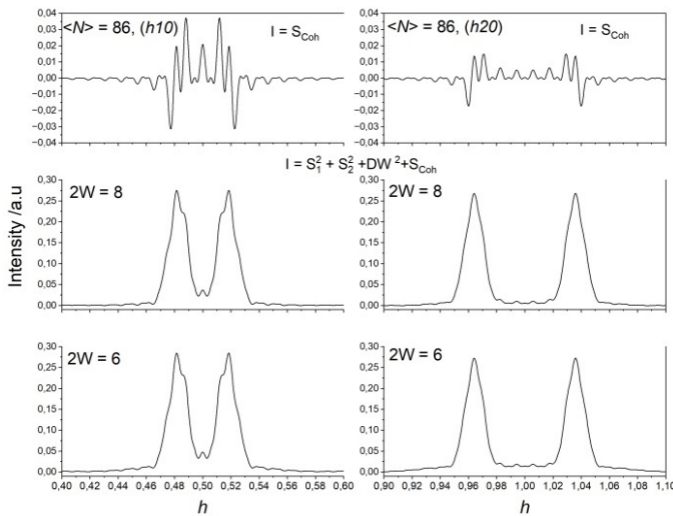


Figure 9. Top panel: Coherence effect between neighboring domains for $\langle N \rangle = 86$ with $k = 1$ and $k = 2$ (as in Fig. 6). Bottom panel: calculation of the total diffracted intensity for the finite wall case, $2W = 8$ and $2W = 6$ atomic layers.

As expected, an increase in background intensity is observed between the doublets, associated with diffuse scattering from the domain wall. This increase is more pronounced for thinner walls. In Fig. 9, the diffuse contribution from the domain wall tends to hide the peak at $h = 0.5$. In experimental patterns, such as that of PTLa8, both effects could contribute to the diffuse background between the doublets. Since coherence

effects also contribute to this region, higher-order reflections (e.g., $k = 2$) should be used to explore the domain wall contribution specifically. This result is significant because, in general, the diffuse intensity distribution between pairs of doublets has been associated in the literature only with the effects of the domain walls.

While Figures 5, 6, 8, and 9 show intensity in reciprocal space and Figure 1 shows it in 2θ space for polycrystalline samples, qualitative conclusions can be drawn. The profile shapes in Figure 1, particularly between the doublets, might suggest that domain walls in PTLa8 are narrower on average than in PTdy8. However, PTLa8 also has a smaller $\langle L \rangle$, enhancing coherence effects, especially for $k = 1$. For the $(002)/(200)$ experimental doublet ($k = 2$), the diffuse intensity decreases, likely due to reduced coherence effects at higher orders. Extracting microstructural information from the diffraction profiles in Figure 1 is complex. Peak shape and width are affected not only by coherent domain size and non-uniform microstrains but also by coherence effects and domain wall size. Ignoring these effects can lead to misinterpretation.

V. CONCLUSION

It has been shown that (i) The coherence effects between neighboring ferroelectric domains significantly modify the diffraction profiles, causing asymmetries and contributing to the background between $(h00)/(00h)$ doublets. These effects are more pronounced in samples with smaller domains and for low-order reflections. (ii) 90° domain walls of finite thickness contribute to diffuse background, which increases as the wall width decreases. (iii) The choice of dopant (La^{3+} vs. Dy^{3+}) influences the material's microstructure, affecting domain size and wall density. The results underscore the complexity of the microstructure-property relationship in ferroelectrics and the need for comprehensive analytical approaches for accurate characterization

VI. ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported in the framework of an institutional project "Quantitative characterization of the real structure of materials", Program: NAP223LH001-073, and the project PN223LH010-068 from PNCB, Cuba. This work has been also supported by the Brazilian Synchrotron Light Laboratory (LNLS) under the proposal D10B - XPD 10695. Special thanks to Prof. Miran Čeh for the microscopy facilities at the Center for Electron Microscopy and Microanalysis, Jozef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia.

REFERENCES

- [1] A. Pramanick, A. D. Prewitt, J. S. Forrester, J. L. Jones, Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences **37**, 243 (2012).
- [2] N. Floquet, C. M. Valot, M. T. Mesnier, J. C. Niepce, L. Normand, A. Thorel, R. Kilaas, J. Phys. III France **7**, 1105 (1997).

- [3] D. R. Taylor, I. P. Swainson, *J. Phys.: Condens. Matter* **10**, 10207 (1998).
- [4] L. Olikhovska, A. Ustinov, F. Bernard, J. C. Niepce, *J. Phys. IV France* **10**, (2000).
- [5] S. A. Hayward, E. K. H. Salje, *Z. Kristallogr.* **220**, 994 (2005).
- [6] H. Boysen, *Z. Kristallogr.* **220**, 726 (2005).
- [7] J. E. Daniels, J. L. Jones, T. R. Finlayson, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **39**, 5294 (2006).
- [8] G. Catalan, A. H. G. Vlooswijk, A. Janssens, G. Rispens, S. Redfern, G. Rijnders, D. H. A. Blank, B. Noheda, *Integrated Ferroelectrics* **92**, 18 (2007).
- [9] H. Boysen, *J. Phys.: Condens. Matter* **19**, 275206 (2007).
- [10] B. Khoshnevisan, D. K. Ross, D. P. Broom, M. Babaeipour, *J. Phys.: Condens. Matter* **14**, 9763 (2002).
- [11] Y. U. Wang, *Phys. Rev. B* **76**, 024108 (2007).
- [12] B. Khoshnevisan, *Physica C* **468**, 2187 (2008).
- [13] J. Diao, et al., *Phys. Rev. Mater.* **4**, 106001 (2020).
- [14] Y. Méndez-González, A. Pentón-Madrigal, A. Peláiz-Barranco, S. J. A. Figueroa, L. A. S. de Oliveira, B. Concepción-Rosabal, *Physica B* **434**, 171 (2014).
- [15] A. Peláiz-Barranco, Y. Méndez-González, D. C. Arnold, P. Saint-Grégoire, D. J. Keeble, *J. Mater. Sci.* **47**, 1094 (2012).
- [16] Y. Méndez González, "Análisis microestructural y estructural en el sistema ferroeléctrico PbTiO_3 dopado con tierras raras", Tesis de maestría, Facultad de Física, Universidad de La Habana, Cuba, (2013).
- [17] B. E. Warren, *X-ray diffraction*, Addison-Wesley (1969).
- [18] P. R. Potnis, N.-T. Tsou, J. E. Huber, *Materials* **4**, 417 (2011).

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) license.



EXPERIMENTO DOCENTE DEMOSTRATIVO PARA MOTIVAR EL ESTUDIO DE LA RADIOACTIVIDAD CON ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

DEMONSTRATIVE TEACHING EXPERIMENT TO MOTIVATE THE STUDY OF RADIOACTIVITY WITH A RESEARCH APPROACH

J.B. CRUZ-ARENCIBIA^{✉†}, J. J. LLOVERA-GONZÁLEZ[✉], A. D. RODRÍGUEZ-LLERENA[✉]

Instituto de Ciencias Básicas, Departamento de Física, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE), 19390 La Habana, Cuba.
 juan@icb.cujae.edu.cu

†para la correspondencia

Recibido 16/7/2025; Aceptado 14/11/2025

Se propone un experimento demostrativo sobre el tema radiactividad donde se aplica el enfoque de aprendizaje por investigación. En el experimento se utilizan una fuente radiactiva (^{90}Sr), contadores Geiger – Müller, imanes y electroimanes. Mediante una conversación heurística se propicia que los estudiantes lleguen, entre otras conclusiones, a descubrir la presencia de partículas cargadas eléctricamente en la emisión radiactiva estudiada. El experimento se realizó un mes antes de que los estudiantes comenzaran a recibir formalmente el contenido de física nuclear, último tema de la asignatura Física 3 (Física Moderna) que reciben los estudiantes de ingeniería. Mediante encuesta realizada en los primeros minutos de la clase-conferencia donde se introduce el tema se pudo comprobar que un alto porcentaje de los estudiantes recordaba las características fundamentales del proceso de desintegración radiactiva del isótopo objeto de estudio.

A demonstrative experiment on radioactivity is proposed, applying a research learning approach. The experiment utilizes a radioactive source (^{90}Sr), Geiger-Müller counters, magnets, and electromagnets. Through heuristic discussion, students are guided to discover, among other things, the presence of electrically charged particles in the studied radioactive emission. The experiment was conducted one month before the students formally began their nuclear physics course, the final topic in the Physics 3 subject (Modern Physics) for engineering students. A survey conducted during the first few minutes of the lecture introducing the topic revealed that a high percentage of students recalled the fundamental characteristics of the radioactive decay process of the isotope under study.

Keywords: Demonstration experiments (experimentos demostrativos), general physics (física general), radioactive beams (haces radiactivos), physics education (enseñanza de la física)

I. INTRODUCCIÓN

La celeridad con que se ha producido el desarrollo científico técnico desde finales del siglo XIX conlleva a que la enseñanza de la Física demande cada vez más un uso abarcador e intencionado del aprendizaje con enfoque en la investigación. En un curso dictado por Llovera y del Castillo, en el Congreso Internacional de Educación Superior “Universidad 2020”, se destaca como tendencia en la enseñanza de la Física: “La aplicación del método experimental reflejando un progresivo aumento del nivel de complejidad y del grado de independencia de los estudiantes a través de la disciplina en los laboratorios docentes” [1], otros autores como Tecpan [2] y Sarmiento [3] han experimentado propuestas similares.

El descubrimiento y las aplicaciones de la radiactividad constituye uno de los avances científico técnico que más ha impactado en la sociedad. La inclusión de esta temática en la enseñanza de la Física se revela en dos tendencias en la literatura docente, una de estas propone abordar el tema con carácter informativo en los diferentes niveles de educación. Corbelle y Domínguez plantean, “Los aspectos relacionados con la radiactividad suelen estar de actualidad, pues existe un debate casi permanente sobre el uso de la energía nuclear para

la producción de energía eléctrica y la problemática asociada con los residuos generados” [4], esta vertiente también se puede apreciar en otros autores [5–7].

La otra tendencia aboga por la realización de prácticas de laboratorios que pueden llevarse a cabo con recursos relativamente económicos y asequibles. Según Koike, et. al. “Naturally radioactive sources were developed using three easily available and familiar substances: potassium chloride, instant coffee, and kelp. The radiation fields that they generated were actual measurements using various instruments to adapt the sources to school radiation education” [8]. Enfoques semejantes se encuentran en [9–11].

En el artículo se presenta una concepción didáctica de un experimento demostrativo con enfoque de investigación sobre el tema radiactividad que promueve el espíritu investigativo de los estudiantes rompiendo así el paradigma tradicional basado en experimentos “prefabricados” que limitan la actividad independiente de estos. Dicho experimento y concepción se identificarán como: Experimento Demostrativo con Enfoque de Investigación (EDEI).

II. DESARROLLO

Los objetivos del EDEI tienen su fundamento en algunas de las propiedades esenciales de la radiactividad como el carácter multidireccional y aleatorio del proceso de emisión y la existencia de partículas cargadas eléctricamente en el haz de radiación emitido. El EDEI trata, además, de propiciar independencia en la labor de investigación de los estudiantes y motivar el estudio del tema en la disciplina.

II.1. Concepción didáctica del EDEI.

Se sustenta en dos pilares fundamentales:

1. Sistema experimental concebido para el EDEI.
2. Una conversación heurística.

II.1.1. Sistema experimental para el EDEI.

Los elementos básicos del sistema experimental se muestran en la figura 1.

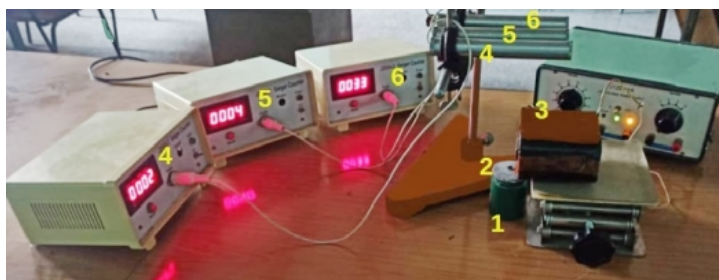


Figura 1. Sistema experimental para el EDEI. 1- Recipiente de plomo con fuente ^{90}Sr , (Fuente). 2- Tapa de plomo con orificio (colimador) 3- Electroimán con fuente de voltaje regulable. 4-5-6- contadores Geiger-Müller con sus respectivos detectores, (contadores G-M).

II.1.2. Propuesta de conversación heurística.

La conversación heurística promueve el desarrollo de las capacidades del pensamiento independiente mediante dificultades concretas que estimulan el razonamiento dialéctico y la búsqueda científica [12].

Para propiciar su mejor conducción se han elaborado dos documentos:

- *Orientaciones metodológicas para profesores.* Se propone un conjunto de preguntas y acciones que debe realizar el profesor durante la actividad experimental que desarrollarán los estudiantes.
- *Sugerencia de tareas investigativas a los estudiantes.* En este se definen los principales objetivos del EDEI a la vez que se proponen (se sugieren) un conjunto de acciones experimentales que permitan dar respuesta a los objetivos previstos. En el documento se ha insertado

un esquema como el que aparece en la figura 2 de modo que los estudiantes se hayan familiarizado previa y parcialmente con la radiactividad.

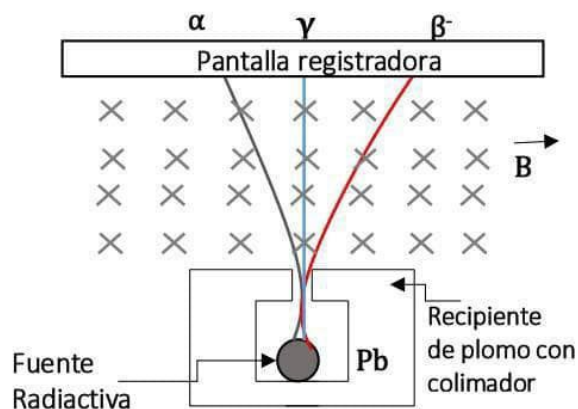


Figura 2. Tipos de radiactividad (Elaboración propia)

II.2. Primera realización del EDEI. (Procedimiento experimental y etapas de la conversación heurística desarrollados en la actividad).

Este artículo presenta la actividad desarrollada a finales de octubre 2023 con los estudiantes de segundo año de la especialidad de Ingeniería en Telecomunicaciones de la CUJAE. Para esta primera vez los estudiantes contaban con el instructivo: "Experimento de Laboratorio No. 4: Comprobación experimental de la ley de absorción de la radiación natural β^- en aluminio y cobre" tomado de [13] y que forma parte del sistema de "Instructivos para el laboratorio" del departamento de Física de la CUJAE. Adicionalmente se orientó repasar el contenido relacionado con el movimiento de partículas con carga eléctrica en un campo magnético tratado en la asignatura de Física 2.

II.3. Procedimiento que se utilizó para la primera realización del EDEI.

El procedimiento que a continuación se describe fue concebido para servir de base a la conversación heurística motivacional. Las acciones siguientes fueron realizadas por orientación del profesor ante grupos pequeños de no más de 12 estudiantes y están en correspondencia con las etapas en las que se organizó dicha conversación. Dichas acciones son:

1. Identificar los componentes básicos del sistema experimental.
2. Colocar los contadores G-M paralelamente entre sí (separados dos o tres centímetros uno del otro) y a una distancia entre 15 cm y 20 cm por encima de la Fuente totalmente tapada. Activar los contadores y anotar los conteos que estos reportan al cabo de 30 segundos.

3. Repetir el paso 2 alejando la Fuente hacia uno y otro lado de los contadores G-M (tres o más posiciones diferentes). Anotar los valores de los conteos.
4. Se orienta denominar conteo de fondo al promedio de los conteos obtenidos en los pasos 2 y 3.
5. Repetir los pasos 2 y 3 con la Fuente totalmente destapada. Inicialmente colocar la cápsula que contiene al ^{90}Sr lo más próximo posible a la parte superior del recipiente de plomo.
6. Colocar la placa de plomo horadada sobre la Fuente para lograr la colimación. Situar la Fuente colimada debajo de cada uno de los contadores G-M y cada vez hacer conteos durante 30 segundos.
7. Colocar la Fuente colimada debajo del sensor central y dejarla en esa posición.
8. Pedir a los estudiantes que analicen cómo colocar el electroimán a la salida del colimador de modo que con los detectores se pueda determinar si esto tuvo algún efecto sobre el haz emitido.
9. Invertir la conexión del electroimán a su fuente de modo que se invierta la polaridad del campo magnético.
10. Cambiar ligeramente la distancia entre los sensores laterales respecto al central.
11. Cambiar el valor y la polaridad del voltaje que proporciona la fuente. Opcionalmente se recomienda retirar y colocar alternativamente el núcleo de hierro dentro de la bobina.

II.4. Etapas para la realización del EDEI mediado por la conversación heurística.

Para la realización del EDEI, la conversación heurística se concibió en varias etapas que se han denominado con letras mayúsculas. Una clave importante consiste en que no se explica en ningún momento el principio físico del funcionamiento de los contadores G-M lo que forma parte de la investigación.

II.4.1. Etapa A

Con la realización de las acciones de la 2 a la 6 se pretende que los estudiantes puedan concluir que el incremento en el valor de los conteos que muestran los contadores G-M se debe a la presencia de la fuente radiactiva y que no existe una dirección preferencial en la emisión de esta. En la etapa se formulan preguntas tales como:

- ¿Cuando la fuente está bloqueada la cantidad de conteos mostró cambios apreciables en relación con la distancia fuente-sensores?

- ¿Cambió significativamente la cantidad de conteos al variar la distancia entre fuente no bloqueada y los contadores G-M?
- ¿Son aleatorios los conteos registrados?
- ¿Podría la aleatoriedad de los conteos tener su causa en la aleatoriedad de la emisión de la fuente?
- ¿La emisión de la fuente tiene una dirección preferencial?

II.4.2. Etapa B

La acción 6 tiene como objetivo central que los estudiantes puedan concluir si se ha logrado colimar el movimiento de las partículas, en esta etapa se realizan preguntas como:

- ¿Qué detector registra más cantidad de conteos?
- ¿Existe alguna dependencia entre la cantidad de conteos y la posición de “alineación” fuente sensor?
- ¿Son aleatorios los conteos?

II.4.3. Etapa C

Esta etapa se relaciona con las acciones 7, 8 y 9, aquí el objetivo fundamental está asociado a la posibilidad de establecer experimentalmente si en la emisión radiactiva existen partículas cargadas eléctricamente o no. Algunas posibles preguntas son:

- ¿La presencia del electroimán produjo algún efecto en la trayectoria de las partículas?
- ¿Se puede llegar a conclusiones acerca de la naturaleza eléctrica de algunas partículas de la emisión?
- ¿Se puede concluir que todas las partículas del haz poseen carga eléctrica?
- ¿Se puede determinar qué tipo de carga eléctrica poseen las partículas cargadas?
- ¿Se puede considerar que las únicas partículas que llegan a los sensores son las que proceden de la fuente?

II.4.4. Etapa D

Esta etapa, que está asociada a la acción 10, tiene un objetivo más sutil, aquí se pretende que el estudiante valore si con el experimento se puede establecer que en la emisión radiactiva todas las partículas tienen o no tienen la misma energía.

Una vez establecida la presencia de carga eléctrica en al menos una parte de las partículas del haz, el profesor debe promover la discusión encaminada a que los estudiantes recuerden con qué parámetros está relacionado el radio del arco de circunferencia que tienden a describir las partículas al pasar por un campo magnético.

Posibles preguntas para esta etapa:

- ¿Se aprecian diferencias entre la cantidad de conteos al cambiar la separación horizontal entre los detectores?
- Si la respuesta es afirmativa ¿Es esto un indicador de que no todas las partículas se mueven con la misma velocidad?
- Si la respuesta es afirmativa ¿Para qué posición relativa del sensor lateral arriban más cantidad de partículas a este, cuando está más cerca o más lejos del central?
- ¿Se puede concluir que en el haz de partículas, las cargadas eléctricamente se mueven con diferentes velocidades?

II.4.5. Etapa E

Esta etapa, asociada a la acción 11, tiene como objetivo consolidar conocimientos adquiridos en la asignatura anterior sobre las características fundamentales del campo magnético asociado a una bobina con corriente y su efecto en el movimiento de partículas cargadas.

Apoyándose en el hecho de que en la emisión radiactiva hay partículas que poseen carga eléctrica, se pide a los estudiantes que valoren de modo cualitativo cómo es el grado de desviación de la trayectoria que experimentan las partículas en función del voltaje aplicado al electroimán y como este hecho está relacionado con la intensidad de su campo magnético. Del mismo modo, se puede fijar el voltaje, por ejemplo en el valor máximo posible, y valorar el efecto que se produce cuando está colocado el núcleo de hierro y cuando no lo está.

II.5. Primera realización del EDEI. (Algunos datos complementarios y una valoración de la efectividad de este)

II.5.1. Datos complementarios.

En esta primera oportunidad el EDEI se incluyó como parte de la práctica de laboratorio sobre radiactividad. La actividad se organizó de modo que el profesor pudiese desarrollar el EDEI durante unos 20 minutos frente a grupos de no más de 12 estudiantes. Se realizaron 8 sesiones de presentación del EDEI en un mismo día de clase donde estuvieron presentes un total de 89 estudiantes. El profesor trató de garantizar que cada uno de los estudiantes respondiera las preguntas y sobre todo propició que estos propusieran acciones e ideas que consideraran pudieran ser de utilidad para el desarrollo e interpretación del experimento.

El experimento se efectuó alrededor de un mes antes de que se comenzara a impartir la primera conferencia sobre el tema de la radioactividad. Al finalizar cada sesión del EDEI el profesor informó que la fuente radiactiva utilizada fue el isótopo ^{90}Sr , y sugirió que buscaran en internet y en textos de Física las características radiactivas de este isótopo así como que fueran pensando en posibles respuestas a preguntas tales como: ¿Por qué en la Cujae se han podido utilizar esas

fuentes radiactivas durante más de 40 años? ¿Será posible que todavía puedan ser utilizadas para el 2060 a casi 100 años de fundada la Universidad? Como tareas de cierre deben dejarse las siguientes:

- Formule una hipótesis sobre el principio físico de funcionamiento del detector G-M y haga una consulta bibliográfica sobre este tema para verificarla.
- Investigue el proceso de desintegración del estroncio 90 (^{90}Sr) y analice de dónde pueden provenir las partículas beta que están detectándose atendiendo a la energía máxima de estas.

II.6. Valoración de la efectividad de la primera realización del EDEI.

Como criterio para la comprobación de la efectividad del EDEI acerca de la motivación hacia el tema y de lograr un aprendizaje más sólido y significativo se tomaron las respuestas dadas a una encuesta abierta y no avisada aplicada durante los 15 minutos iniciales de la primera conferencia sobre física nuclear.

II.7. Sobre la encuesta aplicada.

II.7.1. Población y muestra.

En el EDEI participaron 89 estudiantes de un total de 96 matriculados en la Física 3. De los 89 que participaron en el experimento fueron encuestados los 77 que asistieron a la conferencia prevista para ese día.

II.7.2. Encuesta aplicada.

La encuesta, de enunciado abierto, pero no anónima, consistió en una única orden en la que textualmente se les pidió a los estudiantes:

"Escriban todo lo que recuerden acerca del experimento demostrativo sobre radiactividad que se realizó hace un mes durante la última clase en el laboratorio"

Para hacer una valoración sobre los resultados a partir de la encuesta se escogió un conjunto de indicadores teniendo como base los objetivos del EDEI y las preguntas que se formularon a los estudiantes durante la conversación heurística desarrollada durante la realización del EDEI.

II.8. Indicadores identificados para valorar el grado de apropiación del contenido del experimento.

La encuesta fue estructurada para medir resultados en los siguientes indicadores:

- A. Si manifestaron o no el carácter aleatorio de la emisión radiactiva.

- B. Si refieren o no que en la emisión radiactiva parecía haber partículas sin carga eléctrica.
- C. Si identificaron o no el tipo de carga eléctrica que mayoritariamente se percibió en las partículas emitidas.
- D. Si identificaron que no todas las partículas se movían con igual rapidez.
- E. Si recordaban con mayor o menor precisión el efecto del campo magnético en la trayectoria de las partículas con carga eléctrica.
- F. Si hicieron referencia a que las partículas emitidas por la fuente se movían en cualquier dirección o en cierta dirección preferencial.
- G. Estudiantes que mostraron no recordar nada o casi nada del experimento realizado.

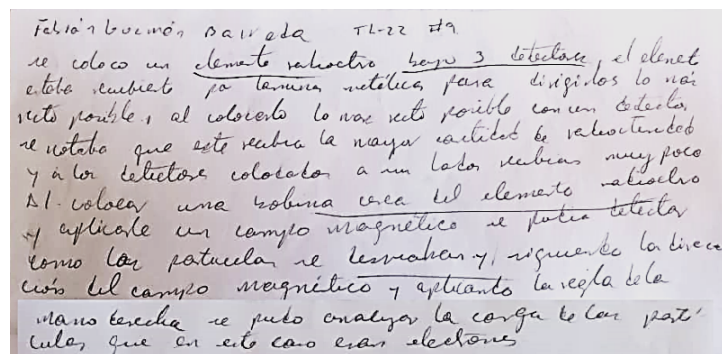


Figura 3. Facsímil de la respuesta de un estudiante a la encuesta.

Transcripción del facsímil.

Fabián Guzmán Barreda TL 22 #9:
Se colocó un elemento radiactivo bajo tres receptores, el elemento estaba cubierto por láminas metálicas para dirigirlos lo más recto posible, al colocarlo lo más recto posible con un detector se notaba que este recibía la mayor cantidad de radioactividad y a los detectores colocados a un lado recibían muy poco. Al colocar una bobina cerca del elemento radioactivo y aplicarle un campo magnético se podía detectar como las partículas se desviaban y siguiendo la dirección de campo magnético y aplicando la regla de la mano derecha se pudo analizar la carga de las partículas que en este caso eran electrones

II.9. Resultados de la encuesta.

Teniendo en cuenta que la encuesta fue totalmente abierta, cada uno de los indicadores se valoró únicamente a dos niveles a saber, si el estudiante hizo referencia al indicador o si no lo hizo. Los principales resultados de la encuesta se recogen en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1. Porcentaje de estudiantes por cada indicador identificado.

Indicadores	Cantidad de estudiantes que refieren cada indicador	% respecto a los 77 encuestados
A	21	27.3
B	32	41.6
C	51	66.2
D	30	39.0
E	37	48.1
F	15	20.8
G	11	14.3

Tabla 2. Cantidad de indicadores identificados por estudiantes.

Cantidad de estudiantes que identificaron indicadores (66)	Cantidad de Indicadores identificados	% respecto a los 66 que identificaron al menos un indicador
12	1	18.2
10	2	15.2
23	3	34.8
19	4	28.8
2	5	3.0

II.10. Muestra de respuesta dada por uno de los estudiantes.

La figura 3 muestra una imagen facsimilar de la respuesta dada por uno de los estudiantes cuyo texto se transcribe a continuación.

II.11. Valoración de los resultados de la encuesta.

Dado el carácter abierto y sorpresivo de la encuesta se considera que los resultados de la misma son positivos. En la Tabla 1 se puede apreciar que un poco más del 85 % de los estudiantes encuestados hicieron referencia al menos a uno de los indicadores evaluados. Si se tiene en cuenta además, que en la encuesta participaron 77 de los 89 que tomaron parte en el EDEI, entonces se puede plantear que alrededor del 75 % manifestó recordar algo de lo que se investigó en el experimento.

Por otro lado, en la misma tabla se puede constatar que el 66.2 % de los encuestados recordó el tipo de carga eléctrica en la emisión radiactiva y casi el 50 % habló acerca del efecto del campo magnético sobre el movimiento de las partículas. Este resultado permite concluir que la acción 11 propicia una consolidación del tema movimiento de partículas electrizadas en campos magnéticos que fue impartido en la asignatura anterior.

La Tabla II permite hacer una valoración más cualitativa sobre los resultados de la encuesta. En esta se puede apreciar que el 67 % (44 de 66) de los estudiantes que identificaron indicadores tienen en sus respuestas tres o más de los 6 evaluados. Los resultados de la encuesta cobran mayor significación si se tiene en cuenta el hecho de que cada estudiante participó en el EDEI durante un intervalo de tiempo que no excedió los 20

minutos y que no se les comunicó en ningún momento que se les haría una comprobación sobre el experimento realizado.

III. CONCLUSIONES

Las conclusiones del *EDEI* propuesto pueden valorarse en dos dimensiones:

III.1. Sobre la apropiación de las características de la emisión radiactiva estudiada.

Los estudiantes lograron identificar con el *EDEI* algunas de las características fundamentales de la emisión del ^{90}Sr , pues objetivamente pudieron comprobar que:

- En la emisión radiactiva de este isótopo existe una alta proporción de partículas con carga eléctrica negativa.
- No todas las partículas emitidas se mueven con la misma rapidez.
- No existe una dirección preferencial del proceso de emisión.
- Probablemente el proceso de emisión de la fuente sea aleatorio.
- Las partículas emitidas pueden recorrer en el aire una distancia ligeramente superior a los 15 cm.

III.2. Resultados de carácter didáctico.

- El experimento demostrativo así concebido como base para desarrollar el aprendizaje por investigación potenció por un lado el trabajo independiente de los estudiantes y por otro contribuyó al desarrollo del pensamiento abstracto pues el objeto de investigación es totalmente invisible y solamente se pueden emitir conclusiones a partir de los efectos que este produce.
- El *EDEI* permite revelar el vínculo del tema detección de partículas radiactivas con el tema movimiento

de partículas electrizadas en campos magnéticos evidenciando la unidad dialéctica entre dos fenómenos físicos que se estudian en asignaturas diferentes.

- Una vez más se puso en evidencia que cuando la enseñanza de la física se realiza con un buen protagonismo de los estudiantes en general se incrementa la motivación, el interés de estos por la asignatura y se alcanza un aprendizaje más significativo.

REFERENCIAS

- [1] J. J. Llovera, A. M. del Castillo, "Actualización de los Cursos de Física y Matemática. Necesidad Impostergable Desde La Agenda 2030", Ed. Universitaria, La Habana (2020)
- [2] S. Tecpan, J. Benegas, G. Zavala, "Actitudes de Profesores de Física hacia Estrategias de Aprendizaje Activo: Un Caso de Estudio en un Taller de Formación de Formadores", Conf. Paper, October (2012).
- [3] L. M. Sarmiento, N. Budini, S. Giorgi, G. Yoaquino, Rev. Enseñanza Fís. **30**, 211 (2018).
- [4] J. Corbelle Cao, J. M. Domínguez Castiñeiras, Ensen. Cienc. **33**, 137 (2015).
- [5] E. M. Terrado, E. Cascarosa, J. Pozuelo, F. García, Rev. Eurka Ensen. Divulg. Cienc. (REurEDC) **21**, 3203 (2024).
- [6] M. Tsubokura, Y. Kitamura, M. Yoshida, Radiat. Res. **59**, 65 (2018).
- [7] L. Peralta, C. Oliveira, "Radioactivity in the classroom", Sci. Scho. **12**, 57 (2009).
- [8] H. Koike, T. Kawano, T. Limoto, REM **12**, 74 (2023).
- [9] R. Oliveira, Phys. Educ. **55**, 055007 (2020).
- [10] N. Mitchener, Phys. Educ. **55**, 035020 (2020).
- [11] R. Oliveira, L. Baltohoshi, Phys. Educ. **52**, 064001 (2017).
- [12] F. Mbembwa, "Actividad experimental en Física con enfoque problémico en el Instituto Superior de Ciencias de Educación (ISCED), Huambo, Angola", Tesis de doctorado, Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos, Cuba (2020).
- [13] M. Vallés et al., Prácticas de laboratorio de Física III, Ed. ISPJAE, La Habana (1988), pp. 134.

HIGH-POWER LASER PROTOTYPE FOR SOFT TISSUE SURGERY IN DENTISTRY

PROTOTIPO LÁSER DE ALTA POTENCIA PARA CIRUGÍA DE TEJIDOS BLANDOS EN ODONTO-ESTOMATOLOGÍA

O. MORALES-VALDÉS[✉], P. J. LARREA-COX^{✉†}, S. FERNÁNDEZ-YANES[✉], L. HERNÁNDEZ-TABARES[✉], G. MESA-PÉREZ[✉], A. RODRÍGUEZ-ÁLVAREZ[✉], D. OJEDA-DÍAZ[✉]

Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN), 11300 La Habana, Cuba; plarrea@ceaden.edu.cu[†]

[†] corresponding author

Recibido 5/2/2025; Aceptado 20/12/2025

The first Cuban prototype of a state-of-the-art surgical semiconductor laser for dentistry is presented. Aimed at soft tissue surgery and mucosal treatments, its performance matches that of analogous equipment in the market. The prototype underwent electrical safety and parametric testing, showing high repeatability and reproducibility of the measured optical power values. The equipment is currently being introduced in Havana's Faculty of Dentistry.

Se reporta el desarrollo del primer prototipo cubano de láser semiconductor quirúrgico "estado-del-arte", para uso dental. Enfocado hacia la cirugía y los tratamientos de la mucosa dental, su comportamiento es comparable al de equipos análogos existentes en el mercado. El prototipo sufrió exámenes de seguridad eléctrica y parámetros relevantes, y demostró alta repetibilidad y reproducibilidad en los valores de su potencia óptica. Actualmente el equipo está siendo introducido en la Facultad de Estomatología de La Habana.

Keywords: Lasers and their applications (láseres y sus aplicaciones), biomedical devices (Dispositivos biomédicos), laser-assisted surgery (cirugía asistida por láser)

I. INTRODUCTION

Laser applications in dentistry are based on knowledge of a series of physical and biological processes, which depend on several factors. Depending on the wavelength (λ) of the laser and where it is applied, different optical phenomena and diverse effects on the tissue will occur. The absorption of light depends primarily on two factors: the λ of the laser and the optical characteristics of the tissue being irradiated. Low-power lasers are primarily used for their biostimulating, analgesic, and anti-inflammatory properties [1]. The best known examples are helium-neon (HeNe), gallium arsenide (GaAs), and aluminum gallium arsenide (AlGaAs).

On the other hand, high-power lasers are used as alternatives for scalpels and other conventional instruments. In dentistry, argon ion (Ar^+) lasers, with visible emissions at 488.0 nm (blue) and 514.5 nm (blue-green), are used as alternatives to halogen lamps for photopolymerization and teeth whitening. All other high-power lasers emit infrared (IR) light: carbon dioxide (CO_2 , 10.6 μm and 9.6 μm), for the treatment of pulp exposures and for coagulating and decontaminating exposed areas. The coagulation laser par excellence is the Nd:YAP (1064 nm), whose surgery is performed in a microorganism-free area, where clean incisions can be made, and less local anesthesia is required, or only topical anesthesia. Suturing is generally not necessary, postoperative periods are almost painless and edema-free, healing is rapid, and there is no evidence of recurrence. The Nd:YAP (1340 nm) behaves similarly to the above mentioned laser.

Er,Cr:YSGG (2.796 μm) and Er:YAG (2.94 μm) lasers, which

emit in pulsed mode, are very well absorbed by water and can be used on both soft and hard tissues of the oral cavity [2]. They produce photoablative effects (photothermal and thermoablative). They allow cavity preparation without local or regional anesthesia, making them increasingly recommended in pediatric dentistry and for the treatment of special patients. Semiconductor laser diodes have a bactericidal effect, with specific indications in periodontics and endodontics. They are also used for tooth whitening and soft tissue surgery. The development of high-power diode lasers for soft tissue surgery and oral mucosal treatments [3] has had a significant impact on patients compared to the traditional technique of using the scalpel [4].

Because of the laser's bactericidal effect, the procedure can be performed in an operative field with reduced microbial activity. This reduces surgical time and tissue time healing. Furthermore, patients experience less pain during and after the procedure, so lower doses of analgesics are usually prescribed for pain relief. The laser should operate at wavelengths between 810 nm and 980 nm, as these wavelengths are highly absorbed by soft tissue [5], but not by dental or bone tissue.

A wide variety of high-power semiconductor laser equipment [6] is available on the market for dental applications. Examples include the Biolase Dental Soft Tissue Laser, Biolase EpicX, Smart Deka Laser, Orotig Med Pocket Laser, and the SIROLaser Advance. This type of equipment is not produced in Cuba. In this article, we introduce an in-house high-power laser prototype that has been developed for use in soft tissue surgery (curettage, cutting of the gingival and oral mucosa)

[7], incision and drainage of abscesses, biopsies, to obtain hemostasis in surgical procedures with excessive bleeding, in the treatment of peri-implantitis, among other applications [8]. It is also used in periodontics (gingival incisions and excisions) [9] and in endodontics (as a disinfection system: decontamination and removal of bacteria). The main function of the prototype is to generate an IR laser emission, through an optical fiber, with enough power to evaporate the mucosal tissue.

II. RESULTS

II.1. Description of the prototype.

The *FISSERHighBeam₁₀* prototype consists of a central unit with a touch screen display that shows and controls various operating parameters (laser power, fiber optic connection status, etc.). The following are connected to the unit: the external power supply, the footswitch, and the fiber optic applicator (figure 1). Laser specific safety goggles are shown.



Figure 1. Laser prototype *FISSERHighBeam₁₀*.

The central unit of the prototype is composed of the following interacting elements: laser module, laser driver, TEC (Thermo Electrical Cooler) driver, power card, control card [10], laser card, single-board computer, two fans, touch screen, keyswitch, footswitch and power connectors, emergency stop button, and LED indicator.

The laser module (Laser Components, BLD-98-tt-10W-14-C) is composed of the following internal elements, which form a single physical object: high-power laser, power photodiode, thermistor, TEC, aiming laser (650 nm, red), and fiber optic coupling detector circuit. The fundamental element is an IR semiconductor laser (976 nm), with power up to 7 W (class 4 laser), which is regulated by a driver (PicoLAS, LDP-CW 18-05) controlled by the control card. The laser card, soldered onto the laser module itself (figure 2), facilitates its connection to the rest of the modules, especially the control card.

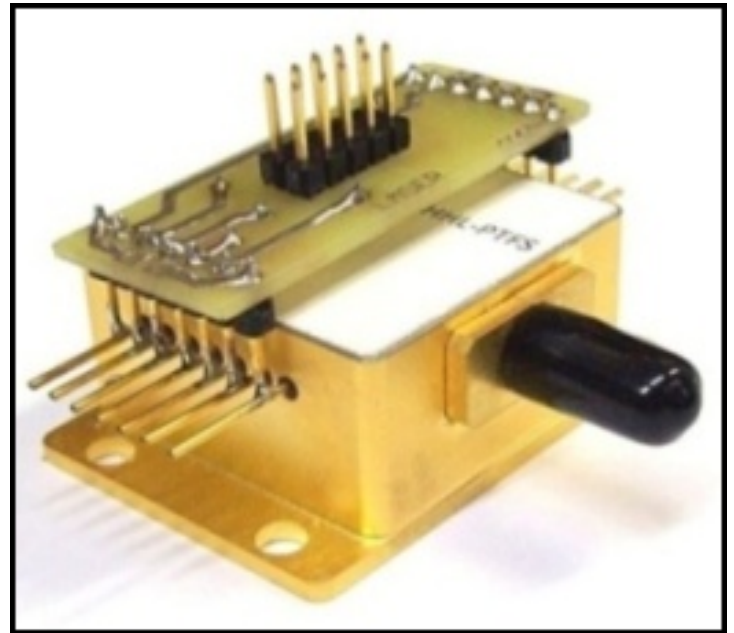


Figure 2. View of the laser module, with the laser card on top.

During operation, the high-power laser heats up and must be cooled by the TEC, controlled by another driver configured from the same control card. Additional circuits, located on this card, also monitor the status of the fiber optic connection and the footswitch action (see figure 3).

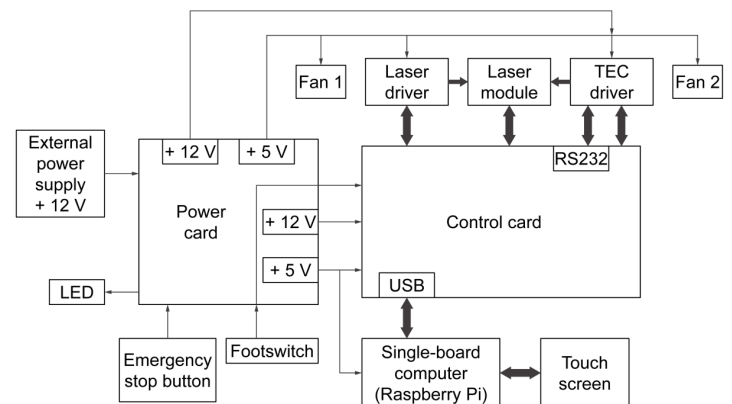


Figure 3. Block diagram of the *FISSERHighBeam₁₀*.

The TEC driver (PicoLAS, PL-TEC-2-1024) is a temperature controller for Peltier effect thermoelectric coolers. It is equivalent to the laser driver, but its function is to control the temperature of the laser itself by adjusting the current flowing through the TEC. It is a standalone PID (proportional-integral-derivative) controller, whose sensing element is a thermistor located in the laser module, which manipulates the current output sent to the TEC. The control card, whose fundamental element is a PIC18F4550 microcontroller, manipulates the functions and controls the states of the laser, the laser driver, and the TEC driver. This card responds to commands sent by a Raspberry Pi 2

single-board computer (SBC). Communication is established through one of the computer's USB (Universal Serial Bus) interfaces.

The general power supply comes from an external switched-mode power supply (XP Power, AKM90PS12), designed for medical use, autovolt, which provides a voltage of +12 V and a current of 7 A, while the power card generates the voltages required for all the prototype elements.

The footswitch is basically a normally open switch that changes its state to close when pressed. Its function is to activate the laser emission. The applicator contains a flexible, operator-friendly optical fiber that conducts the radiation exiting the laser module. It is not an electronic component.

A Raspberry Pi 7 touchscreen display is used as the user interface. The touchscreen allows for entering operating data or configuring the equipment. The high-power laser emission is generated by pressing the footswitch attached to the central unit, which is energized through a low-voltage key-operated switch on the front panel. On the same panel is an emergency stop button, which the operator can press if necessary for suddenly interrupt the general power supply. A two-color LED indicates whether the prototype is connected to the power supply or if it was energized via the key switch. Two low-voltage fans were installed to extract the heat generated by the different modules.

II.2. Prototype evaluation.

Prior to its practical introduction, the prototype underwent rigorous measurements to ensure its stability in laser power emission.

The high-power laser prototype, manufactured at CEADEN, has successfully completed electrical safety tests conducted at the Testing Laboratory of the Professional and Technical Services Company (ESAC, Havana), in compliance with current international standards.



Figure 4. Experimental setup for the evaluation of the *FISSEHighBeam10*. The multimeter, with a connected thermocouple, monitors the temperature.

For further evaluation, the behavior of the optical power values at the applicator output (a fundamental parameter) was determined, as shown in the experimental setup in figure 4. An Ophir Optonics (Israel) digital power meter, LaserStar model

was used, closely monitoring the temperature, the variable that could most affect the operation of semiconductor laser devices.

Observing the results of the output power measurements (see table 1), the standard deviations (STD) are very small, and both the percentage relative errors (Erel.) and coefficients of variation (CV) were very good, with maximum values below 5 % in both cases.

Table 1. Statistical behavior of final output power measurements. Pnom.: nominal power, Pavg.: average measured power, STD: standard deviation, Erel. (%): percentage relative error, CV (%): coefficient of variation.

Pnom. (W)	Pavg. (W)	STD	Erel. (%)	CV (%)
0.5	0.51	0.02	3.0	4.25
1.0	0.96	0.02	4.1	2.08
1.5	1.55	0.02	3.6	1.34
2.0	2.06	0.02	2.9	0.93
2.5	2.55	0.02	1.8	0.75
3.0	3.05	0.02	1.5	0.60
3.5	3.52	0.02	0.6	0.52
4.0	4.07	0.02	1.8	0.58
4.5	4.54	0.02	0.8	0.40
5.0	5.05	0.02	0.9	0.41
5.5	5.57	0.02	1.2	0.35
6.0	6.07	0.02	1.1	0.31
6.5	6.61	0.02	1.7	0.34
7.0	7.04	0.01	0.6	0.19
Max.: 4.1				4.25

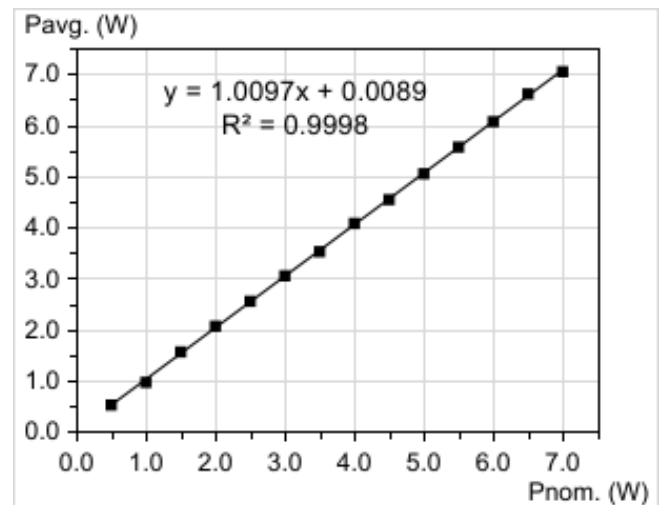


Figure 5. Calibration curve for the prototype: average measured power (Pavg.) vs. nominal power (Pnom.).

Regarding the respective graph (figure 5), adjusted using the least squares method, a correlation coefficient $R^2 = 0.9998$ (three nines) was obtained, with a slope very close to unity (1.0097) and an intercept almost zero (0.0089). In other words, there is a correlation almost 1:1.

Through a general analysis of the measurements, it is possible to affirm that there is a good correspondence (linear correlation) between the nominal values and those obtained experimentally. Throughout the entire pre-adjustment and calibration process, good reproducibility

was achieved (with three operators, over several days, and using two different power meters). Furthermore, the results showed high repeatability ensuring the correct calibration of the prototype's output power, suitable for its intended implementation. For the same purpose, the *FISSERHighBeam*₁₀ prototype was delivered to the Faculty of Dentistry in Havana for practical implementation, with positive results so far.

III. CONCLUSION

The first prototype of a state-of-the-art surgical semiconductor laser for dentistry was developed in Cuba. Intended for soft tissue surgery and mucosal treatments, its performance is equivalent to that of existing lasers on the market. The prototype underwent electrical safety and parametric testing, demonstrating high repeatability and reproducibility of the measured optical power values. These results are in compliance with international standards.

Introducing this technique at the Faculty of Dentistry in Havana, for teaching and scientific research purposes will improve the training of new professionals. Its practical application will benefit patients with oral health issues.

REFERENCES

- [1] A. M. Combarro Romero, A. A. Orellana Molina, A. Hernández Díaz, P. J. Larrea Cox, S. Fernández Yanes, and C. A. Corcho Corcho, *Láser de baja potencia. Física y Aplicaciones Médicas* (Cubaenergía, 2011), ISBN: 978-959-7136-87-3.
- [2] V. Revilla-Gutiérrez, J. Aranabat-Domínguez, A. J. España-Tost, and C. Gay-Escoda, *RCOE* **9**, 551 (2004).
- [3] A. J. España-Tost, J. Arnabat-Domínguez, L. Berini-Aytés, and C. Gay-Escoda, *RCOE* **9**, 497 (2004).
- [4] M. A. Pulido Roza, L. R. Tirado Amador, and C. C. Madrid Troconis, *Gingivoplastia y frenilectomía labial con láser de alta intensidad: presentación de caso*, *Rev. Clínica Periodoncia, Implantol. y Rehabil. Oral* **8**, 157 (2015).
- [5] N. Larrea-Oyarbide, A. J. España-Tost, L. Berini-Aytés, and C. Gay-Escoda, *RCOE* **9**, 529 (2004).
- [6] M. Michalik, J. Szymanczyk, M. Stajnke, T. Ochrymiuk, and A. Cenian, *Micromachines* **12**, 710 (2021).
- [7] E. Azma and N. Safavi, *J. Lasers Med. Sci.* **4**, 206 (2013).
- [8] R. Patel, S. Varma, G. Suragimath, K. Abbayya, S. Zope, and V. Kale, *J. Dent. Lasers* **9**, 94 (2015).
- [9] G. López-Castro, *Láser en periodoncia*, *RCOE* **19**, 271 (2014).
- [10] M. González Pérez, I. Vázquez Hernández, L. Hernández Tabares, P. J. Larrea Cox, and O. Morales Valdés, *Rev. Cubana Fis.* **35**, E31 (2018).

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) license.



M_W - M_L AND M_W - M_C SEISMIC MAGNITUDE SCALING RELATIONSHIPS FOR CUBA

RELACIONES DE ESCALA DE MAGNITUD SÍSMICA M_W - M_L Y M_W - M_C PARA CUBA

J. L. NOAS-HERNÁNDEZ^{✉†}, M. N. VEGA-GARRIGA[✉], E. D. ARANGO-ARIAS

Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAI), 90400 Santiago de Cuba, Cuba; noas@cenais.cu[†]

[†] corresponding author

Recibido 22/9/2025; Aceptado 27/11/2025

Earthquake catalogs typically report multiple magnitude types, which makes it difficult to perform comprehensive statistical analysis. Internationally, moment magnitude is the preferred reference scale for unification. This study establishes empirical relationships between M_W and two magnitudes used in Cuba: (1) amplitude-based M_L and (2) coda-duration-based M_C , as computed by the National Seismological Service of Cuba for earthquakes recorded from 1998–2022.

We evaluated linear and nonlinear regression models, including those accounting for uncertainties in the independent variable (M_L or M_C). Model parameters were estimated via standard least squares, orthogonal distance least squares, and higher-order moments regression. Using the Akaike (AIC) and Schwarz (BIC) information criteria, we identified the segmented model using orthogonal distance regression (ODR) as most recommended for both M_W - M_L and M_W - M_C relationships. These results provide a robust basis for magnitude conversions in Cuban catalog homogenization and seismicity analysis.

Los catálogos de terremotos reportan múltiples tipos de magnitud, lo que requiere una magnitud unificada para análisis estadísticos. La magnitud momento (M_W) es la escala preferida para la unificación. Establecimos relaciones empíricas entre M_W y dos magnitudes utilizadas en Cuba: M_L basada en amplitud de onda y M_C basada en duración de coda, calculadas por el Servicio Sismológico Nacional de Cuba entre 1998 y 2022.

Evaluamos modelos de regresión lineal y no lineal, incluyendo aquellos que consideran la incertidumbre en la variable independiente (M_L o M_C). Estimamos los parámetros de los modelos mediante mínimos cuadrados estándar, mínimos cuadrados ortogonales y regresión por momentos de orden superior. Mediante los criterios de información de Akaike (AIC) y Schwarz (BIC), identificamos que el modelo de regresión segmentada por distancia ortogonal es el más recomendable para las relaciones M_W - M_L y M_W - M_C . Estos resultados permiten homogenizar catálogos sísmicos cubanos y mejorar los estudios de sismicidad.

Keywords: Earthquakes in Cuba (Terremotos en Cuba), Earthquake magnitudes (Magnitudes de terremoto), Errors in physics (Errores en física), Seismicity (Sismicidad), Statistics (Estadística).

I. INTRODUCTION

The primary information contained in earthquake catalogs includes the location and magnitude of seismic events. The most common representation of earthquake size is the magnitude. Typically, catalogs report two or more types of magnitude measurements. The Cuban National Seismological Service (SSN) employs mainly the following magnitude scales: M_L (based on wave amplitude), M_C (based on coda duration) and M_W (based on seismic moment).

For statistical analyses of catalog data, such as studies of the coverage areas of seismological networks, seismicity, or hazard assessment, magnitude unification is applied to incorporate the largest possible number of observations. This process involves homogenization of all events to a single magnitude scale.

The moment magnitude M_W is considered the most representative of the tectonic effects of an earthquake and remains valid across the entire magnitude range [1]. Unlike other magnitudes, M_W does not saturate at high values, which has led to its adoption as the international reference for magnitude unification. In cases where M_W is unavailable, it can be estimated from other available magnitude types using regression-based formulas.

Magnitude conversion is a common practice worldwide [2–6]. Although several studies have examined relationships between earthquakes magnitudes in Cuba [7–9], the relationships between M_W and M_L or M_C have not yet been thoroughly investigated. This study aims to establish empirical relationships between M_W and these magnitudes, providing essential tools for catalog homogenization and seismicity analysis within the country.

II. MATERIALS AND METHODS

We utilized the instrumental earthquake catalog from the SSN covering the period 1998–2022, within the region bounded by the coordinates 73.00°–84.00° W longitude and 19.00°–24.00° N latitude. The catalog was refined using the ECP package [10], which involved removing duplicates and correcting errors through cross-validation of parameters within an acceptable range. This process yielded 14,858 pairs of observations (M_W , M_L) with M_L in the range [-1.9, 6.6], and 14,328 pairs (M_W , M_C) with M_C in [-0.4, 6.2].

While the linear model has been extensively employed for converting between different earthquake magnitude types [11], a variety of other models have also been applied in this context. These include bilinear [5, 12–17], polynomial

[18–22], and exponential models [12, 23–26]. Furthermore, more complex modeling approaches have been investigated [5, 24, 27, 28]. It is important to note that while not all cited studies exclusively focus on relationships between moment magnitude (M_W) and local or coda magnitudes (M_L/M_C), these alternative models are also applicable for such conversions.

Consequently, to explore these relationships, the following models were considered:

Linear: $M_W = a + bM$	(1)	$AIC = -2 \ln(\mathcal{L}(\theta data, model)) + 2K$	(8)
Segmented (bilinear): $M_W = a + bM + c \max(M - d, 0)$	(2)	$BIC = -2 \ln(\mathcal{L}(\theta data, model)) + K \ln n$	(9)
Polynomial2: $M_W = a + bM + cM^2$	(3)		
Polynomial3: $M_W = a + bM + cM^2 + dM^3$	(4)	Where $\mathcal{L}(\theta data, model)$ is the likelihood function of the parameters θ for the observed data and assumed model, K is the number of estimated parameters θ , and n is the sample size.	
Exponential1: $M_W = ae^{bM}$	(5)		
Exponential2: $M_W = ae^{bM} + c$	(6)		

Where M can be either M_L or M_C .

Table 1 summarizes the types of regression employed, their objectives, and the conditions under which they are applied.

Table 1. Types of Regression.

Type	Objective	Assumption
Standard	Minimize the sum of squared vertical residuals	Errors are present only in the dependent variable
Orthogonal distance ^[29]	Minimize the sum of squared orthogonal residuals	Errors exist in both dependent and independent variables
Higher-order moments ^[30]	Match theoretical moments with observed data moments	Errors are present in both dependent and independent variables

In the case of linear regression via the method of moments, six different slope parameter estimators can be used [30]. When there is available information concerning error variances, estimators $\hat{\beta}_1$ to $\hat{\beta}_4$ should be used. Otherwise, if not a priori information exists, $\hat{\beta}_5$ or $\hat{\beta}_6$ shall be used. Here we applied the estimator $\hat{\beta}_5$, as follows [30]:

$$\hat{\beta}_5 = \frac{S_{xyy}}{S_{xxy}} \quad (7) \quad \sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \quad (12)$$

Where S_{xyy} and S_{xxy} are the third-order cross-moments (coskewness) for independent and dependent variables x and y . In order to use $\hat{\beta}_5$, the third sample moment must significantly differ from zero (indicating non-normality) and the sample size must be at least 50 [30]. Both conditions were satisfied: the sample size was large, and the data did not

follow a normal distribution ($p < 0.001$ in D’Agostino and Shapiro-Francia tests).

To distinguish between linear models (1) fitted using the method of moments and those fitted using ODS, we called the first model Moments and the second Deming. At the same time, we retained the designation Linear in the case of the standard regression method.

When selecting the optimal model, we relied on information criteria such as AIC [31] and BIC [32]:

$$AIC = -2 \ln(\mathcal{L}(\theta|data, model)) + 2K \quad (8)$$

$$BIC = -2 \ln(\mathcal{L}(\theta|data, model)) + K \ln n \quad (9)$$

Where $\mathcal{L}(\theta|data, model)$ is the likelihood function of the parameters θ for the observed data and assumed model, K is the number of estimated parameters θ , and n is the sample size.

As can be seen, both AIC (8) and BIC (9) are based on the likelihood of the model, which quantifies how well the model explains the observed data; bigger likelihood means that the given model is more plausible [33]. In practice, it is convenient to work with the natural logarithm of the likelihood function, and the term $\ln(\mathcal{L}(\theta|data, model))$ in the formulas refers to its maximum value.

These criteria balance model fit with complexity. The first term in both AIC and BIC rewards how well the model explains the data, while the second term penalizes model complexity to guard against overfitting. This penalty increases with the number of estimated parameters (K) [34]. The BIC imposes a stricter penalty than the AIC, as its penalty term also incorporates the sample size n . Accordingly, for both criteria, a lower value indicates a better model.

For regressions using the least squares method, as used in this study, these measures can be calculated using the formulas presented in [34], which, keeping all terms, lead to:

$$AIC = n(\ln \sigma^2 + \ln 2\pi + 1) + 2K \quad (10)$$

$$BIC = n(\ln \sigma^2 + \ln 2\pi + 1) + K \ln n \quad (11)$$

Where K and n are the same as before, σ^2 is the estimated residual variance

and ε_i represents the regression residuals. A crucial point is that, in addition to the model’s structural coefficients, the residual variance must also be included in the count to determine the value of K . With this in mind, for models (1) to (6), K takes the values: 3, 5, 4, 5, 3, and 4, respectively.

AIC and BIC are broad metrics suitable for comparing models of various types [35]. They do not directly evaluate the model's quality but rather facilitate comparison among candidate models based on their respective values.

To facilitate this comparison, measures such as their difference AIC, BIC or their relative weights AIC_W and BIC_W [34,36] are frequently applied as follows:

$$\Delta AIC_j = AIC_j - AIC_{min} \quad (13)$$

AIC_j is AIC for model j , and AIC_{min} is the minimum of all AIC.

$$AIC_{W_j} = LAIC_j / \sum_m LAIC_m \quad (14)$$

Where $LAIC_j$ is the relative likelihood of the model j , given by

$$LAIC_j = e^{-\frac{1}{2}\Delta AIC_j} \quad (15)$$

Similarly, for BIC we have:

$$\Delta BIC_j = BIC_j - BIC_{min} \quad (16)$$

BIC_j is BIC for model j , and BIC_{min} is the minimum of all BIC.

$$BIC_{W_j} = LBIC_j / \sum_m LBIC_m \quad (17)$$

Where $LBIC_j$ is calculated as,

$$LBIC_j = e^{-\frac{1}{2}\Delta BIC_j} \quad (18)$$

Since the model with the lowest AIC or BIC value is considered optimal, then it is assigned AIC or BIC of 0. Consequently, its relative likelihood (15) or (18) equals 1 and its relative weight (14) or (17) is the largest and closest to 1 within the model set.

Relative weights can be interpreted as relative preference or the degree of empirical evidence that supports the preference for one model over another [34,36].

For models accounting for uncertainty in all variables, the information criteria were computed similarly, but based on orthogonal residuals instead of vertical residuals; hereinafter denoted as AIC_O , BIC_O , AIC_{OW} and BIC_{OW} .

Although the method of moments does not consider orthogonal residuals, to compare its resulting model with others, we calculated its AIC_O , BIC_O , AIC_{OW} and BIC_{OW} .

The analyses were primarily conducted using R [37], utilizing the `nls` function for standard nonlinear regressions, and the `onls` package [38] for orthogonal distance regression (ODR). Visualization was facilitated with the `ggplot2` package [39].

III. RESULTS

We compute the parameters of several regression models (linear and non-linear), relating M_W with M_L and with M_C , across two scenarios: 1) ignoring uncertainty in M_L and M_C and 2) considering uncertainty in M_L and M_C . The selection of the optimal model was guided by information-theoretic criteria (AIC, BIC) and their corresponding weights (AIC_W , BIC_W).

III.1. M_W - M_L models that do not consider uncertainty in M_L .

For the M_W - M_L relationships without uncertainty management (figure 1) the estimated parameters are provided in table 2.

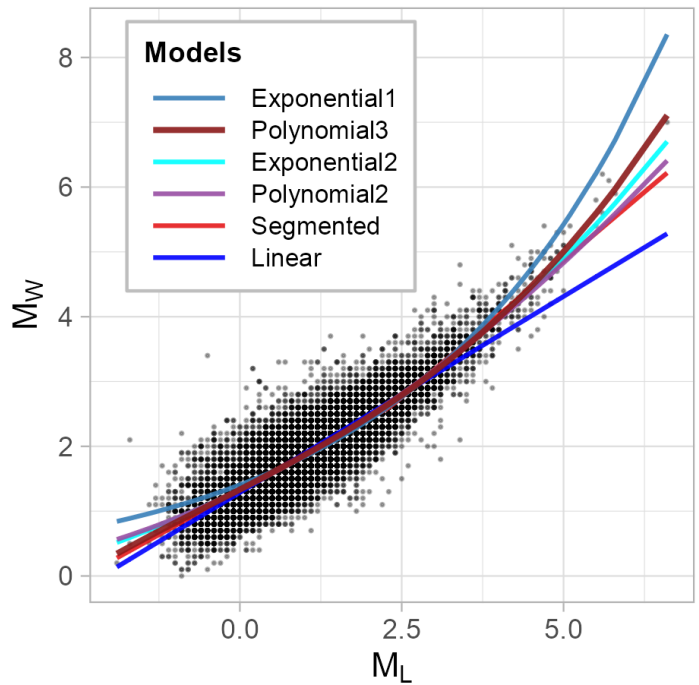


Figure 1. Graphs of M_W - M_L models that neglect uncertainty in M_L .

Table 2. Parameters of the M_W - M_L relationships (without considering uncertainty in M_L).

Model	a	b	c	d
Linear	1.287	0.605	–	–
Segmented	1.328	0.552	0.292	2.330
Polynomial2	1.329	0.485	0.043	–
Polynomial3	1.333	0.515	0.010	0.007
Exponential1	1.406	0.270	–	–
Exponential2	3.438	0.143	-2.107	–

We observed that the Polynomial3 exhibits the lowest AIC and BIC, outperforming other options due to its higher weight ($AIC_W = 0.999$, $BIC_W = 0.991$, table 3). The remaining models have minimal weights, with the Linear and Exponential1 models being the least aligned with the observations, especially at higher M_L values (figure 1, table 3).

Table 3. Information criteria for M_W - M_L models without considering uncertainty in M_L .

Model	AIC	BIC	AIC _W	BIC _W
Polynomial3	9979.6	10017.7	0.999	0.991
Exponential2	9996.7	10027.1	2.0×10^{-4}	8.9×10^{-3}
Segmented	10005.4	10035.8	2.6×10^{-6}	1.2×10^{-4}
Polynomial2	10019.4	10049.8	2.4×10^{-7}	1.1×10^{-7}
Exponential1	10513.6	10536.4	1.1×10^{-16}	2.2×10^{-13}
Linear	10531.5	10554.3	1.5×10^{-20}	2.9×10^{-17}

III.2. M_W - M_L models that incorporate uncertainty in M_L

When including uncertainty in M_L (figure 2) the estimated parameters are adjusted (table 4) and the information criteria (table 5) strongly favor the segmented regression model ($AIC_{OW} = BIC_{OW} = 0.871$)¹, showing better behavior in the presence of errors. The model Polynomial2 becomes the second-best option, though with a considerably lower weight ($AIC_{OW} = BIC_{OW} = 0.129$).

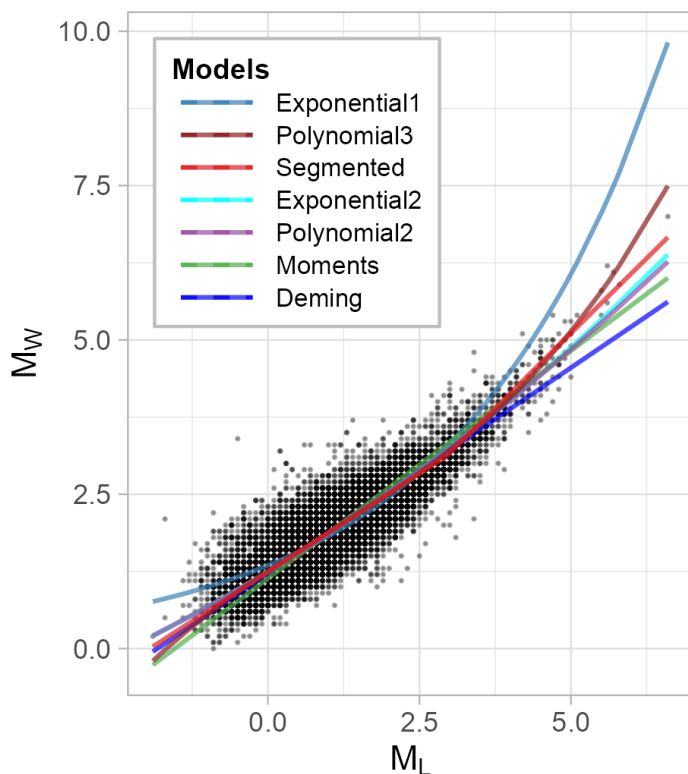


Figure 2. Graphs of M_W - M_L models that consider uncertainty in M_L .

The Exponential1 model and the linear models (Moments and Deming) demonstrated the poorest fit (figure 2, table 3). Nonetheless, the weights assigned to Exponential2 and Polynomial2 also suggest a low likelihood of these models being optimal.

¹The subscript "O" indicates that the criteria were calculated from the orthogonal residuals.

Table 4. Parameters of the M_W - M_L relationships (considering uncertainty in M_L).

Model	a	b	c	d
Linear	1.136	0.738	–	–
Segmented	1.217	0.667	–	–
Polynomial2	1.242	0.638	0.333	2.959
Polynomial3	1.245	0.593	0.025	–
Exponential1	1.348	0.301	–	–
Exponential2	7.748	0.079	-6.231	–

Table 5. Information criteria for M_W - M_L models considering uncertainty in M_L .

Model	AIC _O	BIC _O	AIC _{OW}	BIC _{OW}
Segmented	5249.0	5287.0	0.871	0.871
Polynomial3	5252.8	5290.8	0.129	0.129
Exponential2	5324.8	5355.3	2.9×10^{-17}	1.3×10^{-15}
Polynomial2	5335.0	5365.5	1.8×10^{-19}	7.9×10^{-18}
Deming	5496.4	5519.3	3.8×10^{-54}	3.2×10^{-51}
Moments	5964.4	5987.2	3.8×10^{-156}	7.7×10^{-153}
Exponential1	6496.5	6519.3	1.1×10^{-271}	2.2×10^{-268}

III.3. M_W - M_C models that do not account for uncertainty in M_C

The M_W - M_C models that omit uncertainty in M_C (Figure 3) produced the estimates shown in table 6.

Table 6. Parameters of the M_W - M_C relationships (without considering uncertainty in M_C).

Model	a	b	c	d
Linear	1.287	0.605	–	–
Segmented	0.243	0.802	0.442	2.940
Polynomial2	0.490	0.507	0.081	–
Polynomial3	0.310	0.783	-0.046	0.018
Exponential1	0.817	0.398	–	–
Exponential2	3.045	0.186	-2.591	–

Table 7. Information criteria for M_W - M_C models without considering uncertainty in M_C .

Model	AIC	BIC	AIC _W	BIC _W
Segmented	9967.7	9998.0	1.00	1.00
Polynomial3	10025.6	10063.4	2.8×10^{-13}	6.3×10^{-15}
Exponential2	10038.3	10068.5	4.8×10^{-16}	4.8×10^{-16}
Polynomial2	10052.5	10082.8	3.9×10^{-19}	3.9×10^{-19}
Linear	10052.5	10082.8	4.4×10^{-88}	1.9×10^{-86}
Exponential1	10588.3	10611.0	1.8×10^{-135}	7.8×10^{-134}

The segmented model minimizes the information criteria (table 7), achieving the highest weight ($AIC_W = BIC_W = 1.00$), which indicates strong evidence supporting its selection. The other models exhibit minimal relative support and are considered highly unlikely.

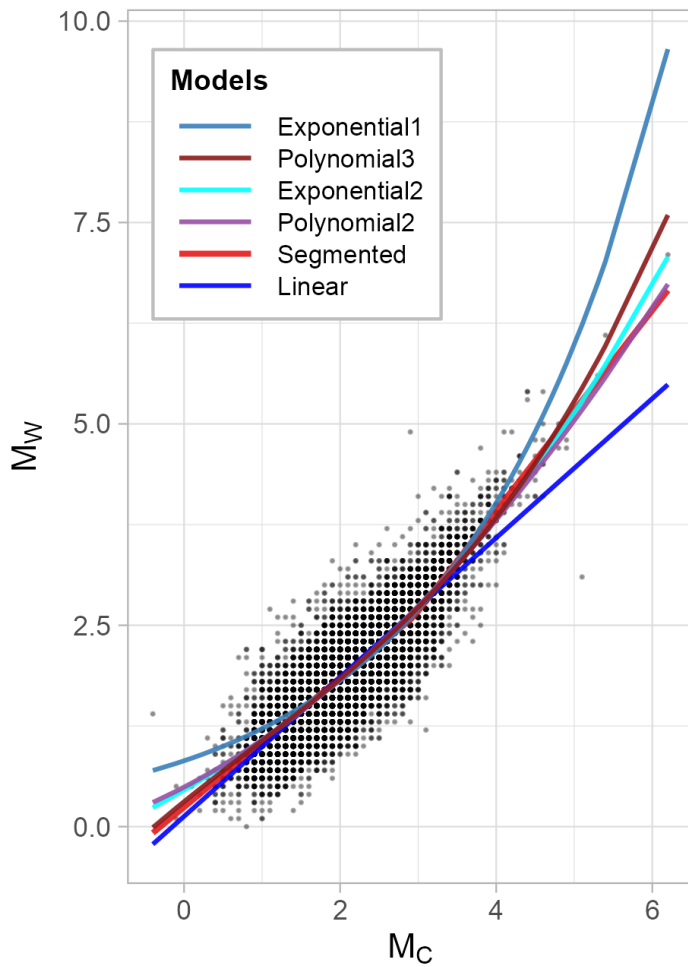


Figure 3. Graphs of M_W - M_C models that neglect uncertainty in M_C .

The segmented model minimizes the information criteria (table 7), achieving the highest weight $AIC_W = BIC_W = 1.00$), which indicates strong evidence supporting its selection. The other models exhibit minimal relative support and are considered highly unlikely.

III.4. M_W - M_C models that consider uncertainty in both magnitudes.

When we incorporated uncertainty into M_C (figure 4), the optimal settings changed.

Table 8. Parameters of the M_W - M_C relationships (considering uncertainty in both magnitudes).

Model	a	b	c	d
Moments	-0.616	1.216	–	–
Deming	-0.224	1.031	–	–
Segmented	-0.126	0.979	0.266	2.799
Polynomial2	0.032	0.785	–	–
Polynomial3	-0.134	1.037	-0.061	0.016
Exponential1	-0.647	0.502	–	–
Exponential2	7.611	0.106	-7.593	–

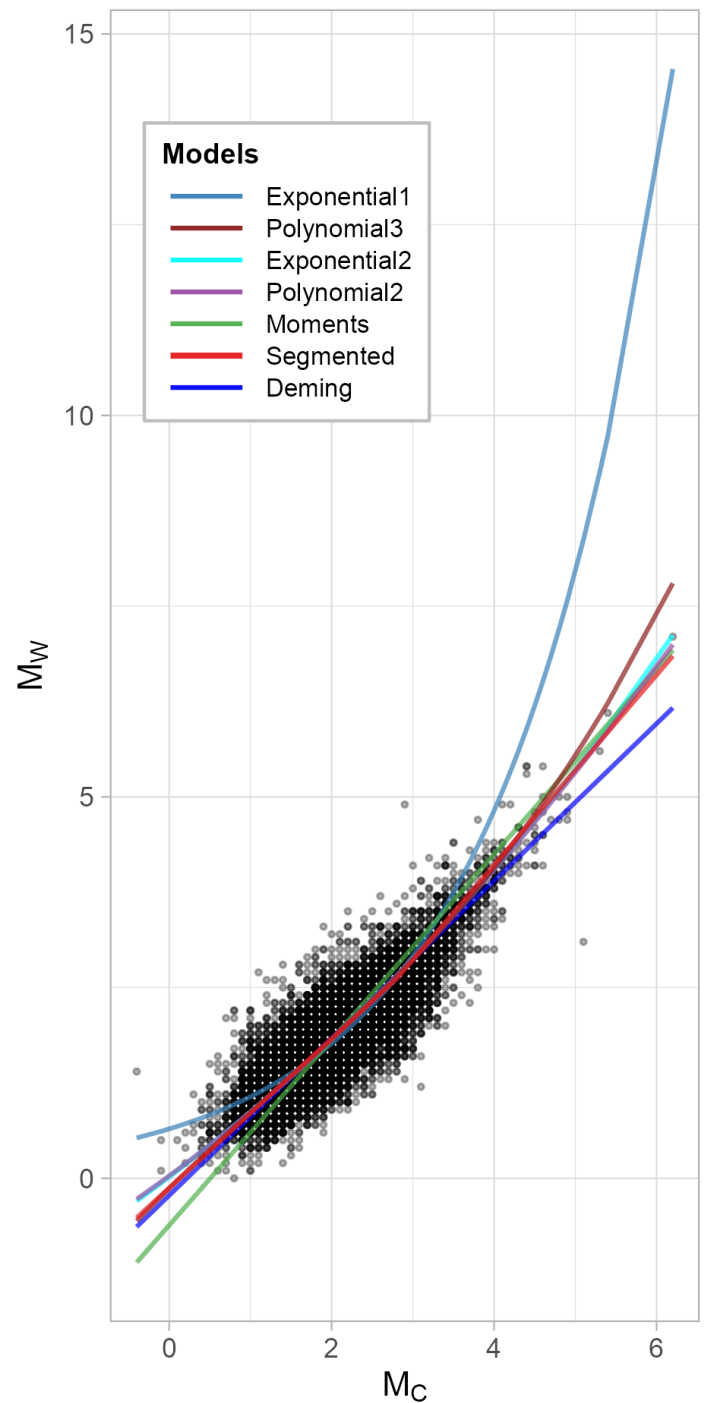


Figure 4. Graphs of M_W - M_C models that consider uncertainty in M_C .

The estimated parameters appear in table 8. The information criteria (table 9) consistently favored the segmented orthogonal model, which again outperformed all other alternatives ($AIC_{OW} = 0.999$ y $BIC_{OW} = 0.998$).

Once more, the Exponential1 model and the linear models (Moments and Deming) demonstrated the poorest fit (figure 4, table 9). Also, the weights associated with Exponential2 and Polynomial2 provide substantial evidence against these models.

Table 9. Information criteria for M_W - M_C models (considering uncertainty in both magnitudes).

Model	AIC _O	BIC _O	AIC _{ow}	BIC _{ow}
Segmented	1108.3	1146.2	0.999	0.998
Exponential2	1129.1	1159.4	1.4×10^{-05}	1.4×10^{-03}
Polynomial3	1123.4	1161.3	5.3×10^{-04}	5.3×10^{-04}
Polynomial2	1131.6	1161.9	9.0×10^{-06}	4.0×10^{-04}
Deming	1240.1	1262.8	2.4×10^{-29}	4.7×10^{-26}
Moments	2240.4	2263.1	1.5×10^{-246}	2.9×10^{-243}
Exponential1	2301.4	2324.1	8.7×10^{-260}	1.6×10^{-256}

IV. DISCUSSION

In all cases, we observed that the pure exponential model (Exponential1) and the linear models (Moments and Deming) demonstrated the poorest performance. Although the Deming regression model overall outperformed Moments, exhibited less statistical support at higher magnitudes. Conversely, the exponential model with an independent term (Exponential2) consistently yielded a better fit than the pure exponential, while the cubic polynomial (Polynomial3) outperformed the quadratic polynomial (Polynomial2).

As noted by [11] the standard least squares method is inappropriate for converting seismic magnitudes because: both variables are affected by uncertainties (which contradicts the assumptions underlying least squares) and the magnitudes do not follow a Gaussian distribution.

To address these issues, [11] proposed the generalized orthogonal regression (GOR). However, this approach requires previous knowledge of the ratio (η) between the standard deviations of the variables [11], information that is almost always unavailable in seismic catalogs.

Moreover, GOR is not applicable to nonlinear models [17].

To incorporate the uncertainty in both variables we use:

- Higher-order moment regression [30] for linear models (which does not require knowledge of η), and
- Orthogonal distance regression (ODR) [29] for nonlinear cases. Although infrequently applied in seismology, ODR proves effective for nonlinear conversions [17]. We assume $\eta = 1$ (indicating similar errors in both variables), which is equivalent to Deming regression in linear contexts.

For both magnitude types (M_L and M_C), segmented orthogonal distance regression was found to be optimal when accounting for uncertainties. Our preferred models (with standard errors) are:

$$M_W = (1.242 \pm 0.005) + (0.638 \pm 0.004)M_L + (0.333 \pm 0.025) \max[M_L - (2.959 \pm 0.063), 0] \quad (19)$$

Range: $(-1.9 \leq M_L \leq 6.6)$.

$$M_W = (0.126 \pm 0.014) + (0.979 \pm 0.007)M_C + (0.266 \pm 0.022) \max[M_C - (2.799 \pm 0.047), 0] \quad (20)$$

Range: $(-0.4 \leq M_C \leq 6.2)$.

Our findings align with previous research when a wide range of magnitudes was used:

- For small earthquakes ($M_L < 3$), M_W exhibits a direct proportionality to $2/3 M_L$ [16,40].
- Both models present a change in slope (d) near $M \approx 3$ (2.96 for M_L and 2.80 for M_C). Bilinear M_W - M_C relationships with a break point (e.g. $M_C = 2.7$) have also been documented [13].

IV.1. Limitations and Recommendations.

Nonlinear techniques (particularly ODR) demand more computational resources than linear approaches; however, their application is justified by their enhanced precision. A significant limitation is the absence of standard deviations in the catalog, which reduces the accuracy of methods such as ODR and GOR. We suggest incorporating these uncertainties in future catalog updates.

V. CONCLUSION

The segmented model identified through orthogonal distance regression is the most suitable for the M_W - M_L and M_W - M_C empirical relationships in Cuba, validated using information criteria (AIC and BIC).

This study provides the first nonlinear empirical relationships between magnitudes specific to Cuba, accounting for uncertainties in both dependent and independent variables.

These results provide a solid basis for magnitude conversions, catalog homogenization, and seismicity analysis within the region.

REFERENCES

- [1] P. Bormann, S. Wendt, and D. DiGiacomo, *Introduction to seismological instrumentation*, in *New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2)* (GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam, 2013).
- [2] R. Das, H. R. Wason, and M. L. Sharma, *Regression analysis of earthquake magnitude scales in the Himalayan region*, *J. Asian Earth Sci.* **50**, 44 (2012).
- [3] P. Gasperini, B. Lolli, and S. Castellaro, *Empirical calibration of local magnitude in Italy*, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **105**, 1787 (2015).

- [4] R. Kumar, R. B. S. Yadav, and S. Castellaro, *Regional magnitude scale calibration using orthogonal regression*, Seismol. Res. Lett. **91**, 3195 (2020).
- [5] E. M. Scordilis, *Empirical global relations between seismic body wave magnitudes*, J. Seismol. **10**, 225 (2006).
- [6] M. Wyss and R. E. Habermann, *Quality of magnitude data reported by IASPEI*, Bull. Seismol. Soc. Am. **72**, 1651 (1982).
- [7] L. Álvarez and V. I. Buné, *On the homogenization of magnitude scales*, Fizika Zemli **10**, 54 (1977).
- [8] L. Álvarez, R. S. Mijáilova, E. O. Vorobiova, T. J. Chuy Rodríguez, G. N. Zhakirdzhanova, E. R. Pérez, L. M. Rodiónova, H. Álvarez, and K. M. Mirzoev, *Sismicidad de Cuba y Estructura de la Corteza en el Caribe*, 1st ed. (Academia, La Habana, 2000).
- [9] M. Villalón-Semanat and R. Palau-Clares, *Seismic hazard assessment in Cuba using modern statistical methods*, Min. Geol. **34**, 171 (2018), [Online].
- [10] V. Kossobokov, A. Mostinskiy, and P. Shebalin, *Earthquake Catalog Processing (ECP) Package* (2008).
- [11] S. Castellaro, F. Mulargia, and Y. Y. Kagan, *Regression problems for magnitudes*, Geophys. J. Int. **165**, 913 (2006).
- [12] D. Di Giacomo, I. Bondár, D. A. Storchak, E. R. Engdahl, P. Bormann, and J. Harris, *The ISC-GEM earthquake catalog: Incremental improvements*, Phys. Earth Planet. Inter. **239**, 33 (2015).
- [13] J. Holt, *Addressing Uncertainty in Earthquake Magnitudes Commonly Used in Modern Seismic Hazard Assessment*, Ph.D. thesis, University of Liverpool (2019).
- [14] F. T. Kadirioglu and R. F. Kartal, *Re-evaluation of Turkish earthquake catalog using robust regression*, Turk. J. Earth Sci. **25**, 300 (2016).
- [15] H. Kanamori, *Centennial magnitude scale*, Tectonophysics **93**, 185 (1983).
- [16] L. Malagnini and I. Munafò, *Statistical evaluation of magnitude conversion coefficients*, Bull. Seismol. Soc. Am. **108**, 1018 (2018).
- [17] G. A. Weatherill, M. Pagani, and J. Garcia, *Global earthquake hazard model: Data processing*, Geophys. J. Int. **3**, 206 (2016).
- [18] B. Edwards, B. Allmann, D. Fäh, and J. Clinton, *Ground motion prediction equations for Switzerland*, Geophys. J. Int. **183**, 407 (2010).
- [19] B. Gutenberg and C. Richter, *Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration*, Ann. Geofis. **9**, 1 (1956).
- [20] E. Oros, A. Placinta, and I. Moldovan, *Comparison of magnitude regression techniques in seismic catalogs*, Rom. Rep. Phys. **73**, 706 (2021).
- [21] R. Sawires, M. A. Santoyo, J. A. Peláez, and R. D. Corona Fernández, *A homogeneous earthquake catalog for the Middle East*, Sci. Data **6**, 241 (2019).
- [22] D. Stromeyer, G. Grünthal, and R. Wahlström, *The revised European macroseismic catalogue (REMC)*, J. Seismol. **8**, 143 (2004).
- [23] I. Grigoratos, V. Poggi, L. Danciu, and R. Monteiro, *Open-access tools for seismic data homogenization*, Seismica **2**, 402 (2023).
- [24] B. Lolli, P. Gasperini, and G. Vannucci, *Systematic comparison of magnitude types worldwide*, Geophys. J. Int. **199**, 805 (2014).
- [25] M. Shahabuddin and W. Kumar Mohanty, *Updated magnitude relationships for India and surrounding regions*, Seismol. Res. Lett. **96**, 2603 (2025).
- [26] D. A. Storchak, D. Di Giacomo, I. Bondár, E. R. Engdahl, J. Harris, W. H. Lee, A. Villaseñor, and P. Bormann, *Public release of the ISC-GEM global instrumental earthquake catalog*, Seismol. Res. Lett. **84**, 810 (2013).
- [27] J. Cheng, Y. Rong, H. Magistrale, G. Chen, and X. Xu, *Impact of magnitude uncertainties on seismic hazard assessment*, Bull. Seismol. Soc. Am. **107**, 2490 (2017).
- [28] B. P. Goertz-Allmann, B. Edwards, F. Bethmann, N. Deichmann, J. Clinton, D. Fäh, and D. Giardini, *Magnitude conversion problem: A case study from Switzerland*, Bull. Seismol. Soc. Am. **101**, 3088 (2011).
- [29] P. T. Boggs and J. E. Rogers, *Orthogonal Distance Regression*, NISTIR 89-4197 (National Institute of Standards and Technology, 1989).
- [30] J. Gillard, *Review of errors-in-variables regression*, Commun. Stat. - Theory Methods **43**, 3208 (2014).
- [31] H. Akaike, *Selected Papers of Hirotugu Akaike* (Springer, New York, 1998).
- [32] G. Schwarz, *Estimating the dimension of a model*, Ann. Stat. **6**, 461 (1978).
- [33] G. Casella and R. L. Berger, *Statistical Inference*, 2nd ed. (Duxbury Press, Pacific Grove, 2002).
- [34] K. P. Burnham and D. R. Anderson, Eds., *Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach*, 2nd ed. (Springer, New York, 2002).
- [35] J. H. Bolin, *Regression Analysis in R: A Comprehensive View for the Social Sciences*, 1st ed. (Taylor & Francis, Boca Raton, 2023).
- [36] E.-J. Wagenmakers and S. Farrell, *AIC model selection using Akaike weights*, Psychon. Bull. Rev. **11**, 192 (2004).
- [37] R Core Team, *R: A Language and Environment for Statistical Computing* (R Foundation for Statistical Computing, 2023).
- [38] A.-N. Spiess, *onls: Orthogonal Nonlinear Least-Squares Regression* (2022), [Software].
- [39] H. Wickham, *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*, 2nd ed. (Springer, Houston, 2016).
- [40] N. Deichmann, *On the reliability of magnitude conversion in seismic hazard studies*, Bull. Seismol. Soc. Am. **107**, 505 (2017).

TESTING THE THIN CAPILLARY MODEL

PROBANDO EL MODELO DE CAPILAR DELGADO

V. IVCHENKO[†]

Department of energy, electrical engineering and physics, Kherson National Technical University, Kherson 73008, Ukraine. retery@gmail.com

[†] corresponding author

Recibido 30/10/2025; Aceptado 10/11/2025

We provide a detailed and accessible introduction to the exact theory of capillary phenomena in a cylindrical tube of finite radius. We demonstrate explicitly that *Jurin's law* always somewhat underestimates the height of liquid rise. The largest deviations occur for small contact angles. In the limiting case of a very large capillary radius, the true column height becomes independent of the radius and approaches a finite limiting value. The mean curvature of a real meniscus is a monotonically increasing function of the capillary radius. We argue that the force balance method is most appropriate for deriving *Jurin's law*, whereas the exact capillary equation requires the use of the pressure balance method or the Helmholtz energy minimization procedure.

Proveemos una accesible y detallada traducción para la teoría exacta de los fenómenos capilares en un tubo cilíndrico de radio finito. Demostramos explícitamente que la *ley de Jurin* siempre subestima la altura que alcanza el líquido. Las mayores desviaciones ocurren para ángulos de contacto pequeños. En el caso límite de un radio capilar muy grande, la altura real de la columna no depende del radio y se acerca a un valor límite finito. La curvatura media de un menisco real es una función monótona decreciente del radio capilar. Discutimos que el método de equilibrio de fuerzas es más apropiado para obtener la *ley de Jurin*, mientras que la ecuación exacta para la capilaridad requiere el uso del método de equilibrio de presiones o la minimización de la energía de Helmholtz.

Keywords: capillary (capilaridad), Jurin's law (ley de Jurin), column height (altura de columna), mean curvature (curvatura media).

I. INTRODUCTION

Capillarity (from the Latin *capillaris* - "resembling hair") is the process by which liquid flows in a narrow space without the help of or even against any external force such as gravity. The capillary effect occurs due to intermolecular interactions between a liquid and the surface of a solid. If the diameter of the vessel is small enough, the combination of surface tension (which is caused by cohesion between the liquid molecules) and adhesion between the liquid and the walls of the vessel causes the liquid to rise. The first recorded description of capillarity belongs to Leonardo da Vinci. Capillary action underlies the function of wet cloths, sponges, towels, napkins, capillary pens, and lighters.

The simplest analysis of capillary action (*Jurin's law*) is presented in every introductory physics course. Our experience shows that many students leave these courses with the misconception that *Jurin's law* is a universal law and can be applied to an arbitrary tube radius. At the same time, some other students repeatedly asked how *Jurin's model* should be modified for the case of intermediate or even very wide tubes.

A rigorous treatment of the liquids rise within both planar and axisymmetric models is presented in excellent paper of Sai Liu et al [1]. Unfortunately, their numerical calculations are limited to water in glass tubes, reducing the generalizability of the findings. In this paper, we provide a detailed and accessible introduction to the exact theory of capillary phenomena in a cylindrical tube of finite radius. Our approach relies on just two dimensionless parameters, making the theory both practical and broadly applicable. We intend this contribution to be useful to undergraduate university students

of physics and chemistry.

II. THE ELEMENTARY CONSIDERATION

Let us recall how *Jurin's law* can be derived from the force balance method. We consider a thin capillary tube open to the atmosphere with an internal radius r_0 , in which there is a liquid column (figure 1).

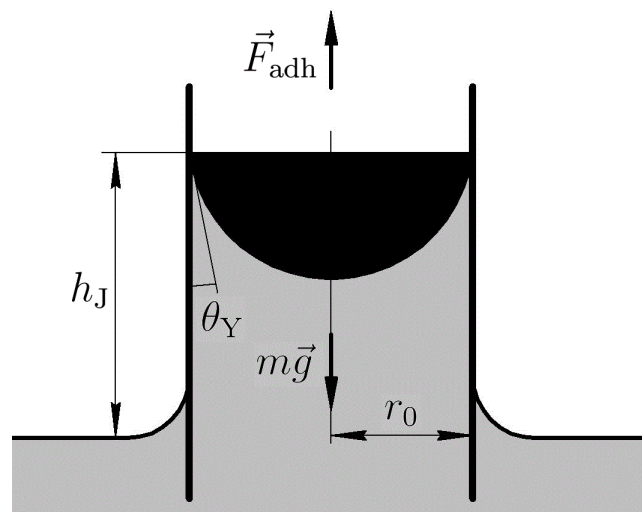


Figure 1. Layout for the derivation of *Jurin's law* based on force balance.

The total adhesion force acting upward on a three-phase contact line is derived in Ref. [2] and equal to $2\pi\gamma r_0 \cos \theta_Y$, where γ is the surface tension; θ_Y ($0 < \theta_Y < \pi$) is Young's contact angle of the solid wall.

The contact angles depend on the nature of the liquid, the solid surface, and the surrounding medium (usually air). For example, water wets clean glass well, so the contact angle is close to 0° (almost complete wetting). For perfectly clean glass the angle can be around $0-10^\circ$, but in practice (due to contamination) it can reach $20-30^\circ$. Mercury does not wet glass, and the contact angle is large, usually around $130-140^\circ$ (non-wetting). This is due to the high surface energy of mercury and low adhesion to glass.

Under the equilibrium condition, this force should be compensated by the gravity force acting on the liquid. Here is the key Jurin's simplification: we assume that the column height h_j is so large that we can ignore the absence of liquid in the shaded part above the meniscus and take the gravity force equal to $\rho\pi r_0^2 h_j g$, where ρ is the density of the liquid. Then

$$h_j = \frac{2\gamma \cos \theta_Y}{\rho g r_0}. \quad (1)$$

Equation (1) is the mathematical expression of Jurin's law, which states that the maximum height of a liquid in a capillary tube is inversely proportional to the tube's diameter. Therefore, this law is absolutely correct only in limiting case of infinitesimally thin tube. It is also obvious that for a capillary of finite radius, the law gives a somewhat underestimated value for the height of liquid rise.

III. MENISCUS SHAPE IN A CAPILLARY TUBE: THE RIGOROUS TREATMENT

Refer to the cylindrical coordinate system for the meniscus profile as shown in figure 2.

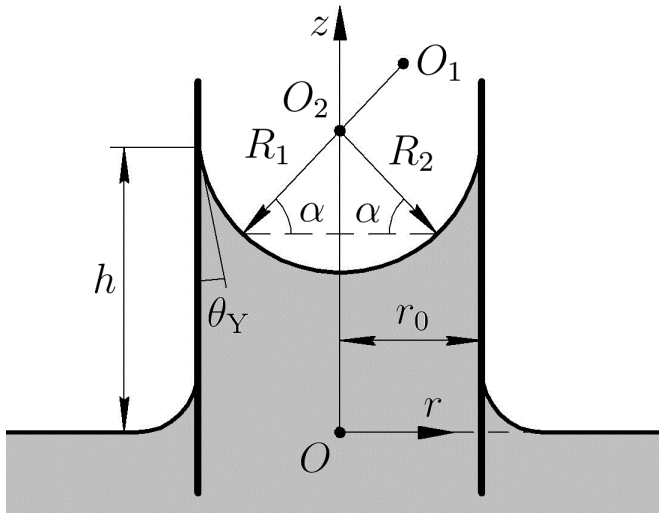


Figure 2. Schematic of meniscus profile in the axisymmetric tube.

We choose the origin O at the liquid level away from the tube. Assume the atmospheric pressure to be p_0 . Then the pressure inside the liquid for the liquid-vapour points located at height z is the atmospheric pressure reduced by the hydrostatic pressure $\rho g z$ and increased by the Laplace pressure p_L , that is $p_0 - \rho g z + p_L$. Outside the liquid, this pressure is simply equal to

p_0 . Under the equilibrium condition, the pressure inside and outside the liquid should be the same. It means that $p_L = \rho g z$ (the Young-Laplace equation).

The general expression for the Laplace pressure [3] reads as

$$p_L = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = 2\gamma H, \quad (2)$$

where R_1 and R_2 are the principal radii of curvature (figure 2); H is the mean curvature of the surface. The value R_1 of the radius of curvature of a plane curve, which is given by the equation $z(r)$, can be found by the well-known equation [4]:

$$R_1(r) = \frac{[1 + (z'(r))^2]^{3/2}}{z''(r)}, \quad (3)$$

where $z'(r)$ and $z''(r)$ are, respectively, the first and second derivatives of function $z(r)$. Considering figure 2, we find

$$R_2(r) = \frac{r}{\cos \alpha} = \frac{r \sqrt{1 + (z'(r))^2}}{z'(r)}, \quad (4)$$

where $z'(r) = \tan \alpha$. Combining equations (2) - (4), we finally get

$$\frac{1}{\tilde{r}} \left(\frac{\tilde{r} \tilde{z}'}{\sqrt{1 + (\tilde{z}')^2}} \right)' = \tilde{r}_0^2 \tilde{z}, \quad (5)$$

where $\tilde{z} = z/r_0$ and $\tilde{r} = r/r_0$ ($0 < \tilde{r} < 1$) are the reduced (dimensionless) cylindrical coordinates; $\tilde{r}_0 = r_0/l_c$ is the relative (dimensionless) capillary radius; $l_c = \sqrt{\gamma/(\rho g)}$ is the capillary length. If $\tilde{r}_0 \ll 1$, the capillary forces dominate (thin tube). If $\tilde{r}_0 \gg 1$, the gravity dominates (wide tube). The capillary lengths less than 1 mm are rare, as they require extreme densities or very low surface tensions. For most liquids, l_c is in the range of 1–5 mm (for example, for water $l_c \approx 3.83$ mm). The even more elegant derivation of equation (5), based on the minimization of the Helmholtz energy of the system, is presented in Ref. [5].

In equation (5) we represent the sum of two terms as derivative of a single function. The solution of equation (5) should satisfy the following two boundary conditions:

$$\left. \frac{d\tilde{z}}{d\tilde{r}} \right|_{\tilde{r}=0} = 0, \quad (6)$$

$$\left. \frac{d\tilde{z}}{d\tilde{r}} \right|_{\tilde{r}=1} = \cot \theta_Y. \quad (7)$$

The advantage of equation (5) is that it is written in dimensionless form. This allows us to study the behavior of solutions depending on only two parameters of the theory: $\tilde{r}_0$ and θ_Y . Unfortunately, the non-linear second-order differential equation (5) in combination with boundary conditions (6) and (7) has no analytical solution. Therefore, a numerical method, i.e. the shooting method, should be adopted. This procedure can be realized using some advanced mathematical software (NumPy [6], SciPy [7], etc).

Equations (5)-(7) are invariant under the transformation $\tilde{z} \rightarrow -\tilde{z}$, $\theta_Y \rightarrow \pi - \theta_Y$, indicating the symmetry between a rising ($0 < \theta_Y < \pi/2$) and a depressing ($\pi/2 < \theta_Y < \pi$) meniscus [8]. In Ref. 9 it is strictly proved that for raising (depressing) meniscus the function $z(r)$ always increases (decreases) monotonically and does not contain inflection points. It means that the raising (lowering) meniscus is everywhere concave upward (downward).

IV. ASYMPTOTIC SOLUTIONS IN THE TWO LIMITING CASES

The asymptotic solution of equations (5)-(7) for $\tilde{r}_0 \ll 1$ can be obtained if we recall that in this case $z(r) \approx h_l$ ($\tilde{z}(\tilde{r}) \approx 2 \cos \theta_Y / \tilde{r}_0^2$) and $\tilde{r}_0^2 \tilde{z} \approx 2 \cos \theta_Y = \text{const.}$ Then equation (5) takes the following form:

$$\left(\frac{\tilde{r} \tilde{z}'}{\sqrt{1 + (\tilde{z}')^2}} \right)' = 2\tilde{r} \cos \theta_Y. \quad (8)$$

Equation (8) can be transformed to the separable first-order differential equation satisfying both conditions (6) and (7):

$$\tilde{z}' = \frac{\cos \theta_Y \tilde{r}}{\sqrt{1 - \cos^2 \theta_Y \tilde{r}^2}}. \quad (9)$$

Its solution, that satisfies approximate condition $\tilde{z}(0) \approx 2 \cos \theta_Y / \tilde{r}_0^2$, reads as

$$\tilde{z}(\tilde{r}) \approx \frac{2 \cos \theta_Y}{\tilde{r}_0^2} + \frac{1}{|\cos \theta_Y|} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \theta_Y} - \tilde{r}^2}. \quad (10)$$

Therefore, for $\tilde{r}_0 \ll 1$ meniscus is the spherical cap with radius $R = r_0 / |\cos \theta_Y|$. If $|\cos \theta_Y| \ll 1$, equation (10) simplifies to

$$\tilde{z}(\tilde{r}) \approx \frac{2 \cos \theta_Y}{\tilde{r}_0^2} + \frac{\cos \theta_Y}{2} \tilde{r}^2. \quad (11)$$

Thus, for $\tilde{r}_0 \ll 1$ and $|\cos \theta_Y| \ll 1$ it is equally valid to regard the meniscus shape as either parabolic or spherical.

From a purely physical perspective, when $\tilde{r}_0 \gg 1$, it can be assumed that both the function $\tilde{z}(\tilde{r})$ and its derivative remain small in a central core region spanning most of the cylinder, except for a boundary-layer region near the wall. This enables the simplification of equation (6) to

$$\tilde{z}'' + \frac{\tilde{z}'}{\tilde{r}} \approx \tilde{r}_0^2 \tilde{z}, \quad (12)$$

This equation can be easily reduced to the modified Bessel differential equation, whose solution satisfying the boundary condition (6) has the following form: $\tilde{z}(\tilde{r}) = C_2 I_0(\tilde{r}_0 \tilde{r})$, where $I_0(x)$ is the modified zero-order Bessel function of the first kind. Using condition (7) and relation $I_0'(x) = I_1(x)$ ($I_1(x)$ is the modified first-order Bessel function of the first kind) we get $C_2 = \cot \theta_Y / (\tilde{r}_0 I_1(\tilde{r}_0))$ and

$$\tilde{z}(\tilde{r}) \approx \frac{\cot \theta_Y I_0(\tilde{r}_0 \tilde{r})}{\tilde{r}_0 I_1(\tilde{r}_0)}. \quad (13)$$

V. THE MEAN CURVATURE

Taking into account the Young-Laplace equation and equation (2), we find the expression for the relative mean curvature:

$$\tilde{H}(\tilde{r}) = \frac{H(\tilde{r}) r_0}{\cos \theta_Y} = \frac{\tilde{r}_0^2}{2 \cos \theta_Y} \tilde{z}(\tilde{r}). \quad (14)$$

In figure 3 we plot the value of $\tilde{H}$ as a function of the radial distance $\tilde{r}$, calculated at different relative capillary radius $\tilde{r}_0$ and Young's contact angle θ_Y . In all possible cases, $\tilde{H}(\tilde{r})$ is a monotonically increasing function, and $\tilde{H}(1) > 1$ always holds. It is notable that across a wide range of $\tilde{r}_0$ and θ_Y values, the function $\tilde{H}(\tilde{r})$ typically reaches a value of 1 at approximately $\tilde{r} \approx 0.7$.

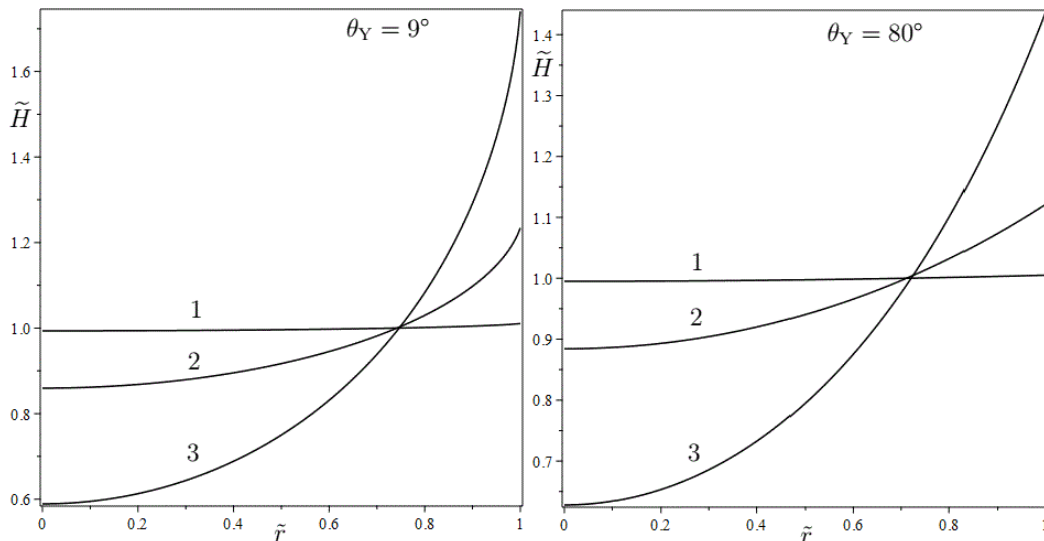


Figure 3. Dependence $\tilde{H}(\tilde{r})$ at: (1) - $\tilde{r}_0 = 0.2$; (2) - $\tilde{r}_0 = 1$; (3) - $\tilde{r}_0 = 2$.

VI. THE COLUMN HEIGHT: APPROXIMATE VERSUS EXACT SOLUTIONS

The true column height h can be defined as the product $r_0 \tilde{z}(1)$. Using equation (1), we find the column height within Jurin's approximation: $h_J = 2r_0 \cos \theta_Y / \tilde{r}_0^2$. Then, the relative error ε_h describing the deviations of Jurin's model from reality reads as:

$$\varepsilon_h = \frac{h - h_J}{h} = \frac{\tilde{z}(1) - 2 \cos \theta_Y / \tilde{r}_0^2}{\tilde{z}(1)}. \quad (15)$$

In figure 4 we plot the value of ε_h as a function of the relative capillary radius, calculated at three different angles θ_Y .

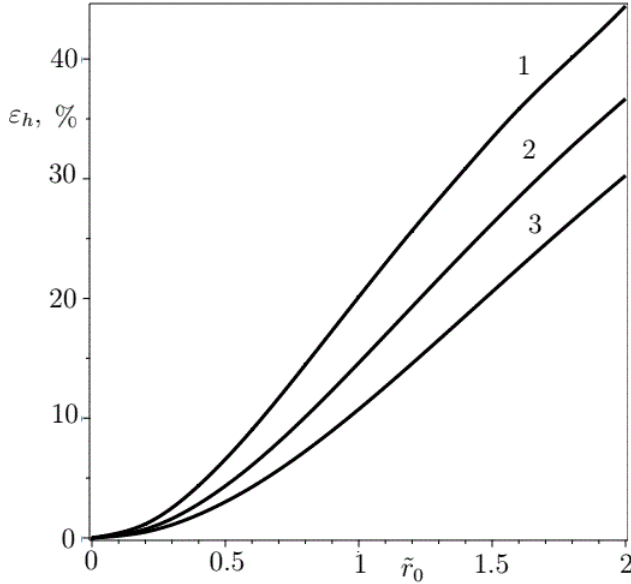


Figure 4. Dependence $\varepsilon_h(\tilde{r}_0)$ at: (1) - $\theta_Y = 5^\circ$; (2) - $\theta_Y = 30^\circ$; (3) - $\theta_Y = 85^\circ$.

In all practical cases, there is a significant error already at $r_0 = l_c$. The deviations increase as Young's contact angle decreases.

The asymptotic analysis [8] gives us the true value of the liquid rise in the limiting case of very large $\tilde{r}_0$:

$$h_\infty \approx l_c \sqrt{2(1 - \sin \theta_Y)}. \quad (16)$$

Therefore, at $\tilde{r}_0 \rightarrow \infty$ the column height does not depend on the radius of the capillary at all and takes a constant

finite value. For example, for water inside a glass tube $h_\infty \approx 5.41$ mm. This feature is explained by the fact that at very large radii the meniscus is flat in the central region, and the rise of the liquid is determined exclusively by the edge effect at the wall, the area of action of which has a characteristic size l_c .

VII. CONCLUSIONS

In conclusion, we made a revision of the thin capillary model by means of an extensive investigation of the meniscus shape and column height. This paper not only refines the theoretical understanding of capillary action but also serves as a pedagogical tool to deepen students' appreciation of the interplay between physical principles and mathematical modelling. Finally, this topic has a research pattern (including numerical calculations and analysis) and can be successfully used in undergraduate courses or projects.

- [1] Sai Liu, Shanpeng Li, and Jianlin Liua, "Jurin's law revisited: Exact meniscus shape and column height," *Eur. Phys. J. E.* **41** (3),46 (2018).
- [2] M. Á. Rodríguez-Valverde and M. T. Miranda, "Derivation of Jurin's law revisited," *Eur. J. Phys.* **32** (1), 49–54 (2011).
- [3] L. D. Landau and E. M. Lifschitz, *Fluid Mechanics* (2nd Edition, Butterworth Heineman, Oxford, 1971)
- [4] G. A. Korn, and T. M. Korn, *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers* (2nd Edition, Dover. Publications, New York, 2000)
- [5] Y. Tang, S. Cheng, "The meniscus on the outside of a circular cylinder: From microscopic to macroscopic scales," *J. Colloid Interface Sci.* **533**, 401–408 (2019).
- [6] J Oliphant T E 2021 NumPy: the fundamental package for scientific computing with Python <https://numpy.org/>
- [7] Virtanen P 2021 SciPy: the fundamental algorithms for scientific computing in Python <https://scipy.org/>
- [8] P. Concus, "Static menisci in a vertical right circular cylinder," *J. Fluid Mech.* **34** (3), 481–495 (1968).
- [9] R. Finn, *Equilibrium Capillary Surfaces. Grundlehren der Mathematischen Wissenschaften [Fundamental Principles of Mathematical Sciences]* (Vol. 284, Springer-Verlag, New York, 1986)

ROLE OF RADIOFREQUENCY POWER ON THE CRYSTALLOGRAPHIC, MORPHOLOGICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF SPUTTERED ALUMINUM THIN FILMS

PAPEL DE LA POTENCIA DE LA RADIOFRECUENCIA EN LAS PROPIEDADES CRISTALOGRÁFICAS, MORFOLÓGICAS Y ÓPTICAS DE LAS CAPAS DELGADAS DE ALUMINIO DEPOSITADAS MEDIANTE «SPUTTERING »

R. RAMOS-BLAZQUEZ^a, F. SOLIS-POMAR^{a†}, A. FUNDORA-CRUZ^b, A. COLLADO-HERNANDEZ^a, C. GARCIA-RODRIGUEZ^a, M.J. MARTÍNEZ-CARREÓN^a, A. FRAGIEL^c, A. MARTINEZ-HUERTA^a, AND E. PEREZ-TIJERINA^a

a) Centro de Investigación en Ciencias Físico Matemáticas, Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Universidad Autónoma de Nuevo León, 66451 Nuevo León, México; francisco.solispm@uanl.edu.mx[†]

b) Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTeC), Universidad de La Habana, 10400 La Habana, Cuba

c) Laboratorio de Física Aplicada, Modelos Fundamentales, Fluidos y Plasmas, Centro de Física, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC), 1020-A Caracas, Venezuela.

† corresponding author

Recibido 22/9/2025; Aceptado 20/11/2025

Aluminum (Al) thin films are of great interest for applications in telecommunications, microelectronics, and the automotive industry, among others, due to their high conductivity, excellent optical properties and low weight. Their properties depend on the deposition technique and its parameters. In this work, the crystallographic, morphological, and optical characteristics of Al thin films grown by radio-frequency (RF) magnetron sputtering were analyzed. An aluminum target was used in an argon (Ar) atmosphere, and the effect of sputtering power on film properties was investigated. The samples were characterized by X-ray diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM), Atomic Force Microscopy (AFM), and UV-Vis Spectroscopy. The crystalline quality improved with increasing power. AFM and SEM results revealed an increase in roughness, thickness, and grain size with higher sputtering power. UV-Vis spectroscopy showed lower diffuse reflectance at lower power across the 190-900 nm range. The enhancement of film properties is mostly attributed to the increased kinetic energy of sputtered species, directly related to the applied RF power.

Las películas delgadas de aluminio (Al) son de gran interés para aplicaciones en telecomunicaciones, microelectrónica y la industria automotriz, entre otras, debido a su alta conductividad, excelentes propiedades ópticas y bajo peso. Sus propiedades dependen de la técnica de depósito y sus parámetros. En este trabajo, se analizaron las características cristalográficas, morfológicas y ópticas de películas delgadas de Al crecidas mediante pulverización catódica (sputtering) magnetrón de radiofrecuencia (RF). Se utilizó un blanco de aluminio en una atmósfera de argón (Ar), y se investigó el efecto de la potencia de pulverización en las propiedades de la película. Las muestras se caracterizaron por Difracción de Rayos X (XRD), Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) y Espectroscopía UV-Vis. La calidad cristalina mejoró al aumentar la potencia. Los resultados de AFM y SEM revelaron un aumento en la rugosidad, el espesor y el tamaño de grano con una mayor potencia de pulverización. La espectroscopía UV-Vis mostró una menor reflectancia difusa a menor potencia en el rango de 190-900 nm. La mejora de las propiedades de la película se atribuye principalmente al aumento de la energía cinética de las especies pulverizadas, directamente relacionada con la potencia de RF aplicada.

Keywords: Aluminum (aluminio), thin films (capas delgadas), magnetron sputtering (*sputtering* con magnetrón), radio frequency power (potencia de radiofrecuencia)

I. INTRODUCTION

Aluminum (Al) thin films are employed in various technological fields, including telecommunications, microelectronics, optics, and the automotive industry, among others, due to their high conductivity, reflectance, and corrosion resistance [1]. These properties, combined with the advantage of being lightweight, make their study particularly relevant. The structural characteristics of thin films are strongly influenced by the synthesis method used. According to the literature, physical methods such as thermal and vapor deposition are the most commonly employed [1].

film synthesis that involves the erosion of material from the surface of a bulk material, known as target, by means of the bombardment with accelerated ions. This method is highly advantageous, as it produces uniform thin films with excellent reproducibility and is scalable to large industrial facilities. The final properties of the films are determined by the conditions used during the deposition process. In the case of magnetron sputtering, factors such as applied power [2-4], deposition time [5, 6], working pressure, the type of the gases used [7, 8], substrate temperature [9-11], and target-to-substrate distance [12], among others, play a crucial role in defining their characteristics.

Magnetron sputtering is a widely used technique for thin In the context of magnetron sputtered Al thin films, an

increment of the hardness for the coatings deposited at 200 sccm from 0.62 to 1.31 GPa has been reported, as power increased from 500 to 2000 W, and an increase in the deposition rate was detected as the Ar flow rate raised from 200 to 500 sccm [13]. Moreover, Al thin films grown on steel substrates presented enhanced crystallinity and a decrease in root-mean-squared roughness values as higher substrate temperatures were employed in the synthesis procedure [14]. Abid Iqbal et al. [3] reported that an increase of sputtering power enhances the kinetic energy of ions, resulting in the production of highly c-axis oriented aluminum nitride thin films. However, they also noted how excessively high power can negatively affect the crystal structure due to the elevated kinetic energy of secondary atoms.

Although significant progress has been made in developing Al thin films synthesized by magnetron sputtering, a comprehensive understanding of how the deposition parameters influence the resulting functional characteristics is crucial. Aluminum thin films have a broad range of technological applications, such as reflective the coating for telescopes [15], antibacterial surfaces [16], and protective or decorative coatings [1], where precise control over crystallographic, morphological, and optical behavior is required, since each application demands specific and distinct film properties. Therefore, establishing clear correlations between sputtering conditions and the resulting film features is essential to optimize their performance for specific applications. In this context, the present study systematically investigates the effect of RF sputtering power on the crystallographic, morphologic and optical properties of Al thin films. The work provides a quantitative statistical analysis of grain size distributions, reports diffuse optical reflectance behaviour and offers a fully reproducible set of deposition parameters with detailed explanations of each observed trend.

II. METHODOLOGY

II.1. Thin films synthesis.

Al thin films were synthesized on clean BK7 glass substrates (25 mm × 25 mm) by RF magnetron sputtering using a UHV Standard Spherical Chamber from Kurt J. Lesker, with no intentional heating applied to the samples. Before deposition, the substrates were pre-sputtered for 40 minutes to ensure surface cleanliness. The deposition procedure consisted of employing an Al target (2" diameter, 1/4" thickness, 99.99% purity) from Advanced Engineering Materials and a radio-frequency (RF) power source operating at 13.56 MHz, with variable power output. The Al target was mounted on the cathode over the magnetron head and the glass substrates were placed on the anode holder at a fixed distance of 9 cm. The chamber was evacuated using mechanical and turbomolecular pumps until a base pressure of 3.5×10^{-5} Torr was reached. Subsequently, Ar gas (99.999% purity) was introduced at a flow rate of 40 sccm, until a working pressure of 5.0 mTorr was achieved. After stabilization of the working pressure in the chamber, the RF power source was activated. The RF power was varied from 120-180 W to

study its effect on the film properties, while the deposition time was fixed at 15 minutes. Lower powers were avoided because they produce thinner films with reduced crystallinity and a stronger dependence of surface morphology on the substrate [17]. On the other hand, higher powers may lead to re-sputtering effects [18].

Table 1. Deposition conditions for the Al thin films.

Parameter	Value
RF-power (W)	120, 140, 180
Working pressure (mTorr)	5.0
Ar flux (sccm)	40
Deposition time (min)	15
Target-Substrate distance (cm)	9

II.2. Characterization.

The crystalline structure of the films was studied by X-Ray diffraction using an X'Pert3 Powder diffractometer from Malvern Panalytical, operating with a Cu K source ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) at 45 kV and 40 mA. Diffraction patterns were processed using the X'Pert Highscore Plus software and indexed with the International Centre for Diffraction Data (ICDD) database. Film morphology was examined by field-emission scanning electron microscopy (FESEM) and atomic force microscopy (AFM). FESEM images and EDS spectra were measured using the Nova NanoSEM 200 microscope from FEI, while AFM images were obtained using the NX10 atomic force microscope from Park Systems, operating in non-contact mode with a SiO₂ tip. Optical properties were studied by UV-Vis-NIR spectroscopy, using a Jasco V-770 spectrophotometer in the range from 190 to 900 nm.

III. RESULTS AND DISCUSSION

III.1. Crystal structure.

X-Ray diffractograms of Al thin films synthesized under different RF power conditions are shown in Figure 1.

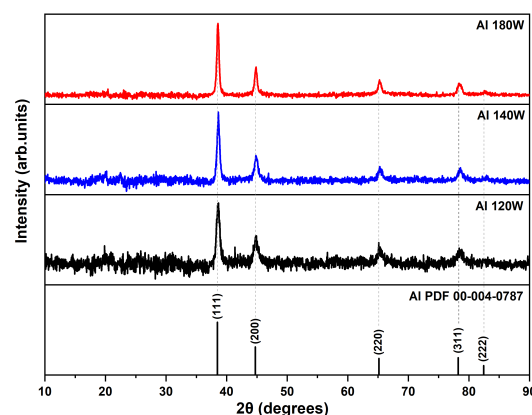


Figure 1. X-Ray diffractograms for the Al thin films obtained at different RF-power conditions.

The crystal structure of the obtained Al thin films corresponds to a face-centered cubic system with the space group Fm-3m (PDF 00-004-0787). The observed planes were (1 1 1), (2 0 0), (2 2 0), (3 1 1), and (2 2 2) for all thin films. A higher signal-to-noise (S/N) ratio was obtained with increasing RF power, attributed to the higher energy of the sputtered species depositing on the substrate's surface.

The crystallite size for the (111) diffraction plane was calculated using Scherrer's equation and Figure 2 shows its variation with RF power, increasing RF power resulted in a larger crystallite size. The higher crystal quality of the films is related to the deposition power since the sputtered species arrive with a higher kinetic energy, enhancing their surface mobility and allowing the adatoms to diffuse more easily across the surface. This enables them to reach energetically favorable lattice sites, promoting the formation of a well-ordered crystalline structure [19,20]. Moreover, at lower power, the critical nucleus size for film formation is smaller, leading to a higher nucleation density and the growth of finer grains, which can limit the overall crystallinity of the film [17].

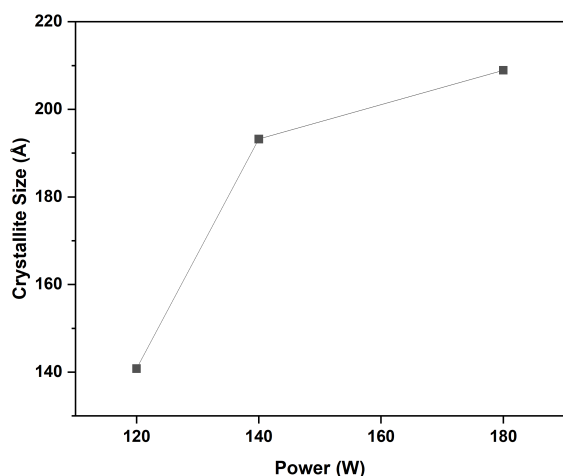


Figure 2. Crystallite size dependence on RF-power for the (111) diffraction plane in the Al thin films.

III.2. Morphology.

III.2.1. Scanning Electron Microscopy

The morphology of the deposited Al thin films was studied by field-emission scanning electron microscopy (FESEM). FESEM images are shown in Figure 3. The deposited Al thin films display features typical of magnetron-sputtered films, i.e., uniform dense films with high crystal quality [21, 22, 8] (see Figure 3 a-c). Figure 3(d-f) show the surface of the

thin films at higher magnifications. It can be appreciated that grain size increment as power increased. Histograms of the grain size with a fit to the log-normal distribution are shown in Figure 3 (g-i). The mean grain size of the Al thin films synthesized at 120, 140 and 180 W were 35 nm, 38, and 60 nm, respectively. The grain size dispersion was analyzed by means of the standard deviation of the fitted log-normal distribution. In this case, Al thin films deposited using 120, 140, and 180 W presented standard deviations of 13.0, 15.7, and 22.6 nm. The increase in grain size and its dispersion is related to the deposition power, which provides the sputtered species with energy to deposit on the glass substrate. At higher sputtering powers, the increased kinetic energy of aluminum atoms enhances their surface and grain boundary mobility, facilitating grain coalescence and growth [23, 24]. This increase in diffusion and grain coarsening lead to a gradual transition from small, island-like growth to thicker, columnar growth [17]. Furthermore, EDS spectra can be found in Figure 3 (j-l), where Al was detected in the surface of study. Elements such as O, Na, Mg, Si, and Ca were also detected in the spectra. These elements are present in the composition of the glass substrate.

Thin film thickness was measured using cross-section FESEM images. Figure 4(a-c) shows the thin films thickness for the Al thin films synthesized using 120, 140 and 180 W, respectively. Film thickness increased with RF power, from 170 nm for 120 W to 253 nm and 356 nm when using 140 and 180 W, respectively.

III.2.2. Atomic Force Microscopy

Morphology of the deposited Al thin films was studied by Atomic Force Microscopy (AFM). Figure 5(a-c) shows the 3D and 2D micrographs for the films synthesized under different RF power conditions. As RF power increases, higher grain coalescence is observed. This resulted in denser films with larger grains and fewer grain boundaries. This observation agrees with the increment of crystallite size observed by XRD (see Section III.1).

Histograms of grain size, with a fit to the log-normal distribution, are shown in Figure 6. The mean grain sizes of the Al thin films were 30 nm, 36 nm, and 54 nm, with standard deviations of 10.1 nm, 16.1 nm, and 22.1 nm, for the synthesis powers of 120 W, 140 W, and 180 W, respectively.

Figure 7 exhibits the evolution of thin films' thickness and RMS roughness. Higher thickness and RMS roughness were obtained at higher RF power. When RF power increased from 120 to 180 W, thickness of the Al thin films increased from 163 to 328 nm, while RMS roughness changed from 4.50 to 17.09 nm. Table 2 summarizes the obtained thickness, deposition rate and RMS roughness for each deposition condition employed.

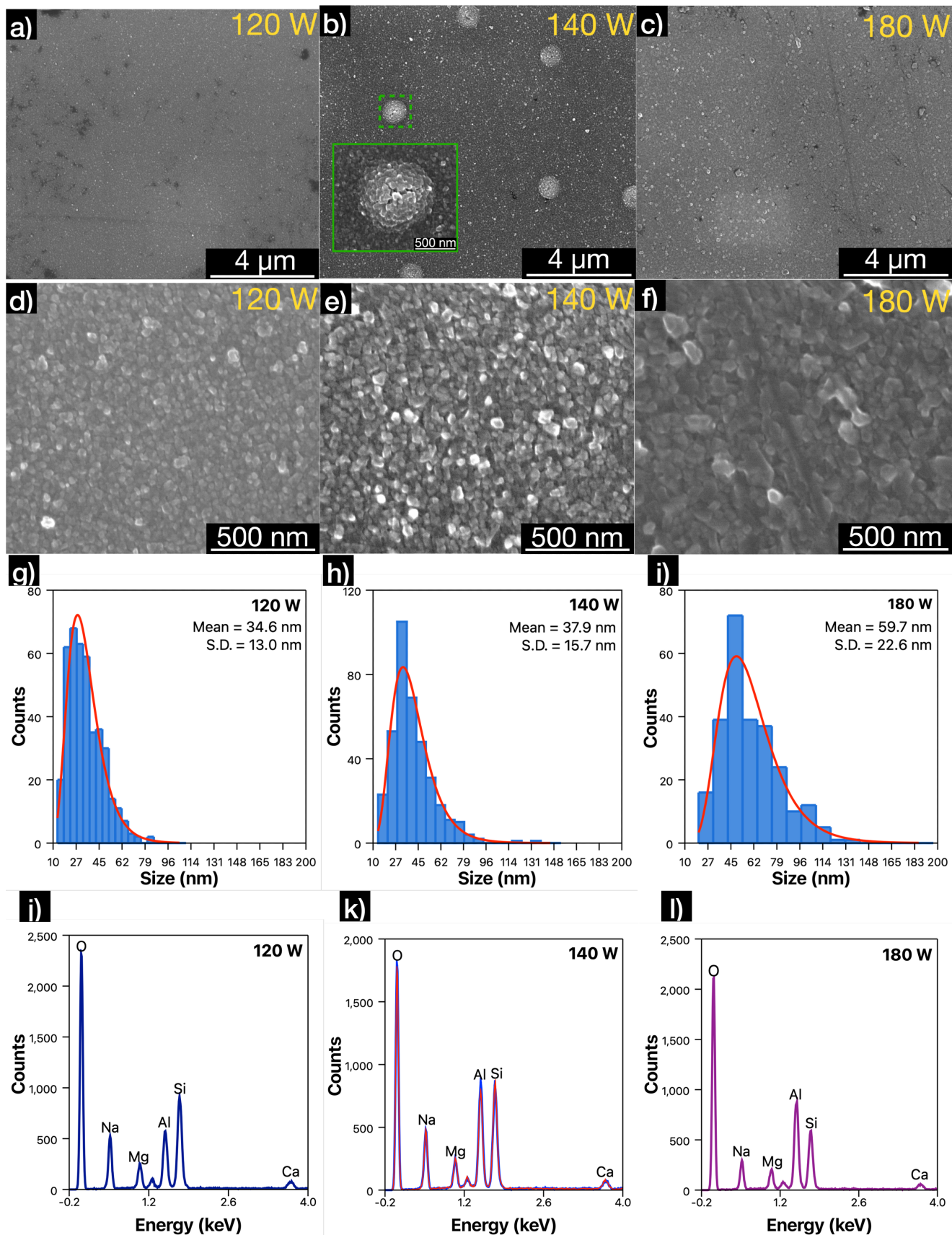


Figure 3. (a-f) FESEM images for Al thin films synthesized at 120, 140, and 180 W at different magnifications. (g-i) Grain size distribution of Al thin films synthesized using 120, 140 and 180 W. (j-l) EDS spectra of the Al thin films synthesized at 120, 140, and 180 W.

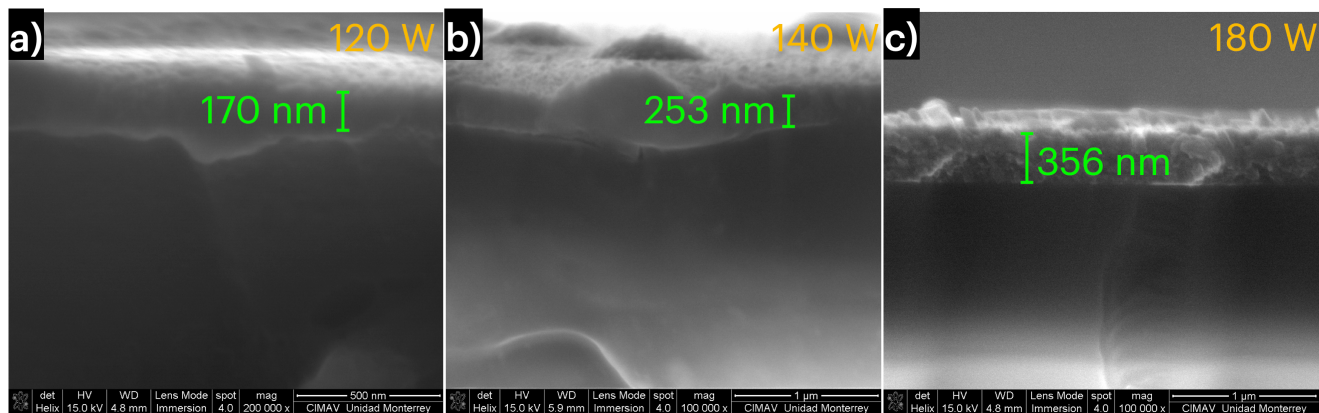


Figure 4. (a-c) Cross-sectional FESEM images for Al thin films synthesized at 120, 140, and 180 W, respectively.

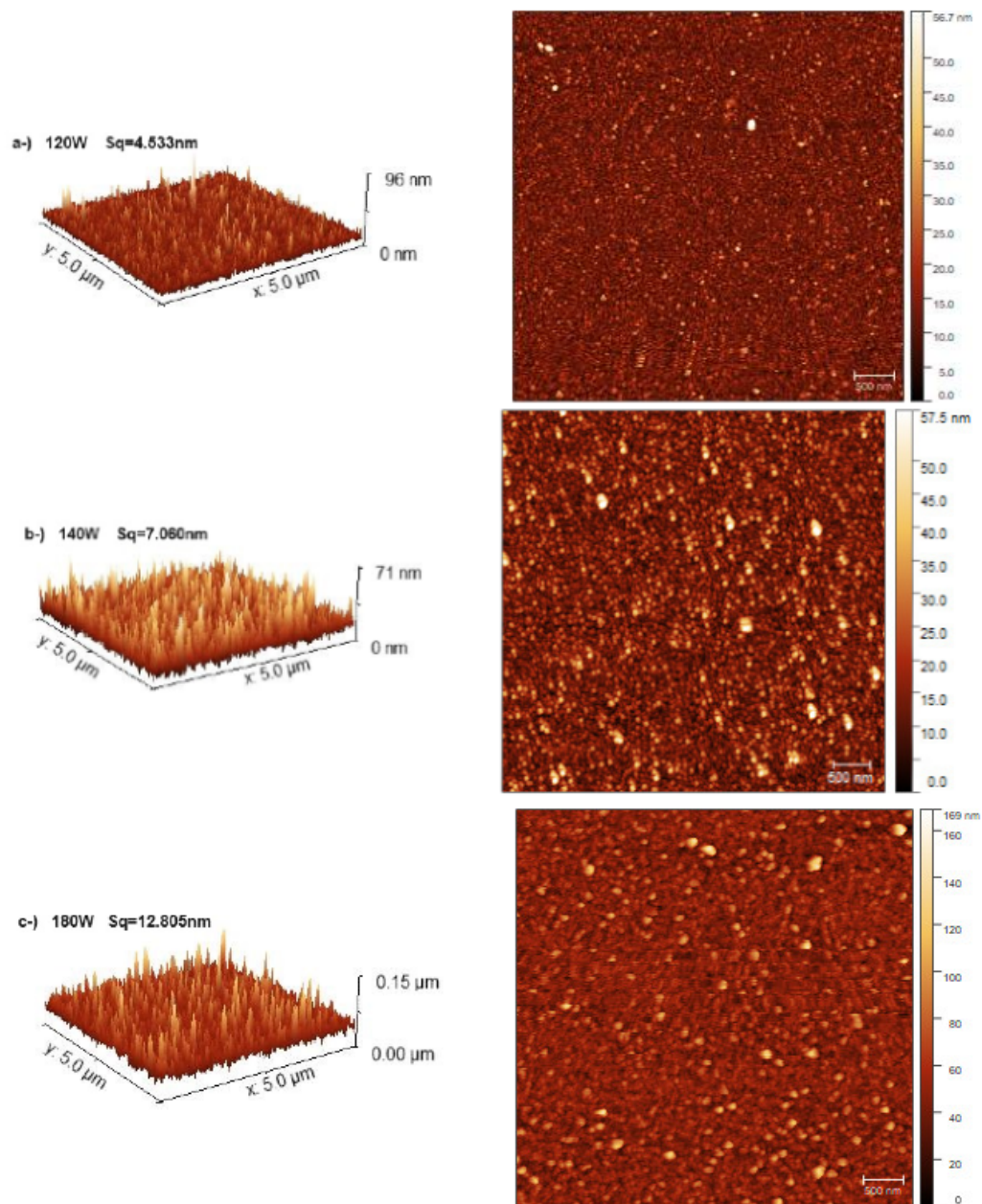


Figure 5. AFM images for the Al thin films synthesized at a) 120, b) 140 and c) 180 W.

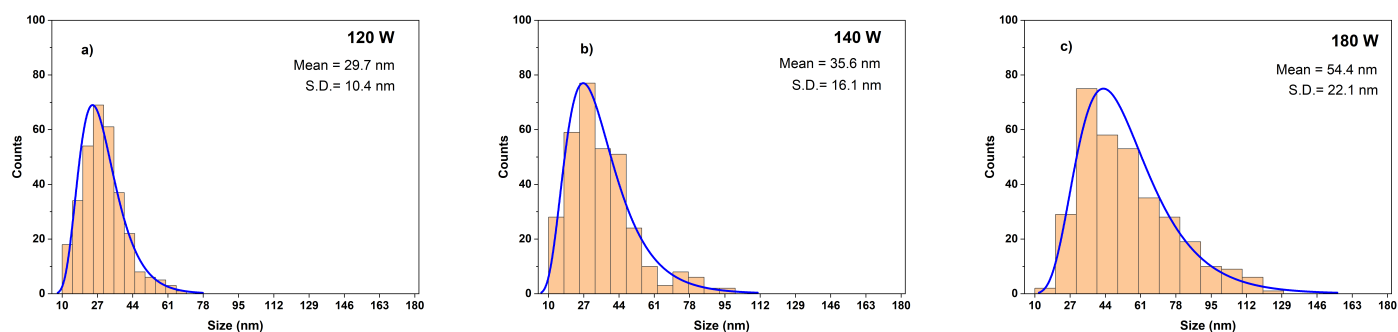


Figure 6. Grain size distribution of Al thin films synthesized using 120, 140 and 180 W.

At high RF power, argon gas and sputtered particles gain significant kinetic energy, which may lead to: (i) an increased deposition rate, and (ii) more frequent collisions between target atoms and ions, reducing the mean-free-path of the target atoms and therefore lowering film growth [20]. In our study, higher power led to increased deposition rates and the formation of thicker aluminum films.

Table 2. Morphological properties of the Al thin films synthesized under different RF power conditions.

Property	Power (W)		
	120	140	180
Thickness (nm)	163	218	328
Deposition rate (nm/min)	10.87	14.53	21.87
RMS roughness (nm)	4.53	7.06	12.80

Table 3 summarizes the results for mean grain size and film thickness obtained through Scanning Electron Microscopy and Atomic Force Microscopy. Grain sizes measured by AFM tend to be slightly smaller than those from SEM. This difference may arise from the AFM's higher surface sensitivity and resolution, which allow it to resolve finer grain boundaries more precisely [25].

Table 3. Comparison of grain size and film thickness measured by SEM and AFM

Property	120 W	140 W	180 W
Mean Grain Size (nm) - SEM	35	38	60
Film Thickness (nm) - SEM	170	253	356
Mean Grain Size (nm) - AFM	30	36	54
Film Thickness (nm) - AFM	163	218	328

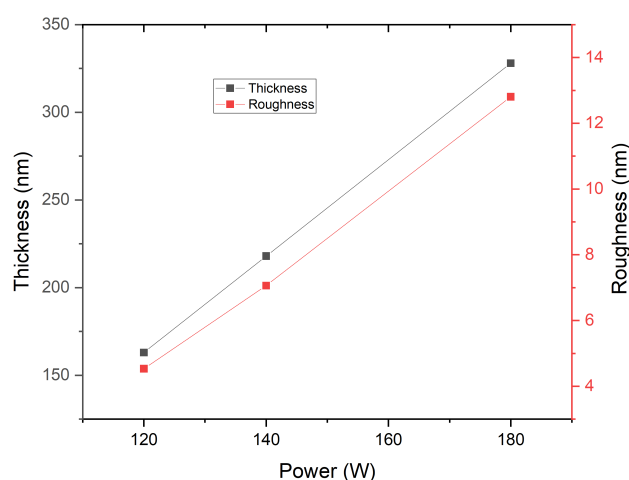


Figure 7. Thickness and RMS roughness development against RF power.

III.3. Optical properties.

Optical properties of the Al thin films were assessed by UV-Vis-NIR spectroscopy. Diffuse reflectance of the samples is shown in Figure 8. Films presented high diffuse reflectance (above 60%) in the visible range of the electromagnetic spectrum (380-750 nm). It is well known that structural and morphological properties have a direct impact on the optical properties of thin films [23, 1]. Higher sputtering power led to increased thickness, larger crystallite sizes, and higher surface roughness, which enhances light scattering. This results in a higher diffuse reflectance signal [26, 27].

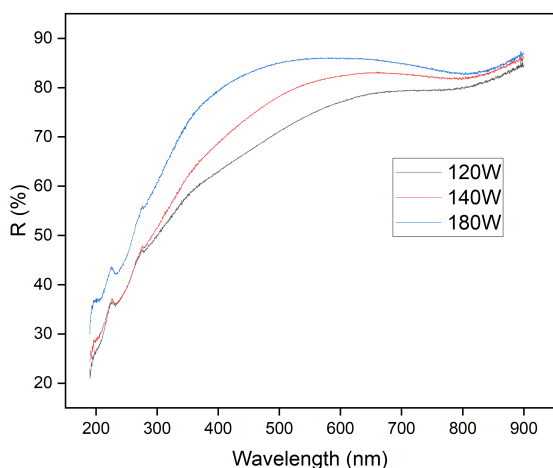


Figure 8. Diffuse reflectance of the Al thin films synthesized under different power conditions.

IV. CONCLUSION

Al thin films have been synthesized by RF magnetron sputtering on BK7 glass substrates. The effect of RF power on their structural, morphological, and optical properties was investigated. Deposition using higher RF power resulted in improved structural and morphological properties, i.e., denser Al thin films with higher crystal quality (larger crystallite size) as well as greater grain size were obtained. The improvement of the structural and morphological properties led to enhanced diffuse reflectance. The RF power used during deposition is related to the kinetic energy of the sputtered species; thus, higher power during deposition enhances their mobility on the surface and through grain boundaries, facilitating the grain coalescence and growth.

V. ACKNOWLEDGEMENT

We acknowledge Dr. Maria Isabel Mendivil Palma from CIMAV Monterrey for her help measuring SEM images and EDS spectra. R. Ramos Blazquez acknowledges CONAHCYT for his master studies scholarship (843048).

A. Collado-Hernandez thanks CONAHCYT for his doctoral studies scholarship (841625). We thank an anonymous referee for valuable critique and suggestions.

REFERENCES

- [1] F. M. Mwema, O. P. Oladimeji, S. A. Akinlabi, and E. T. Akinlabi, *J. Alloys Compd.* **747**, 306 (2018).
- [2] B. Wu *et al.*, *Vacuum* **150**, 144 (2018).
- [3] A. Iqbal and F. Mohd-Yasin, *Sensors* **18**, 1797 (2018).
- [4] M. D. Serna-Manrique *et al.*, *Coatings* **12**(7), 979 (2022).
- [5] R. S. Tondare *et al.*, *Mater. Today Proc.* **5**, 2710 (2018).
- [6] A. Tchenka *et al.*, *Adv. Mat. Sci. Eng.* **2021**, 5556305 (2021).
- [7] J. Wang *et al.*, *Appl. Surf. Sci.* **515**, 146053 (2020).
- [8] M. K. Sandager, C. Kjelde, and V. Popok, *Crystals* **12**, 1379 (2022).
- [9] Y. Gao, H. Leiste, S. Heissler, S. Ulrich, and M. Stueber, *Thin Solid Films* **660**, 439 (2018).
- [10] S. Ponmudi, R. Sivakumar, C. Sanjeeviraja, and C. Gopalakrishnan, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* **30**, 18315 (2019).
- [11] C. Liu, J. Peng, Z. Xu, Q. Shen, and C. Wang, *Metals* **13**, 583 (2023).
- [12] H. A. R. O. O. N. Ejaz *et al.*, *J. Appl. Chem. Sci. Int.* **13**, 41 (2022).
- [13] M. Singh *et al.*, *Mater. Today Proc.* **5**, 2696 (2018).
- [14] F. Madaraka *et al.*, *Mater. Today Proc.* **5**, 20464 (2018).
- [15] K. Balasubramanian *et al.*, *Proc. SPIE* **9602**, 96020I (2015).
- [16] S. Pogodin *et al.*, *Biophys. J.* **104**, 835 (2013).
- [17] C. Zhou, T. Li, X. Wei, and B. Yan, *Metals* **10**, 896 (2020).
- [18] A. Iqbal *et al.*, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* **31**(1), 239 (2020).
- [19] S. Yu, W. Xu, H. Zhu *et al.*, *J. Alloys Compd.* **883**, 160622 (2021).
- [20] S. Asgary *et al.*, *Appl. Phys. A* **127**, 752 (2021).
- [21] J. Li, G. K. Ren, J. Chen *et al.*, *JOM* **74**, 3069 (2022).
- [22] J. Cheng *et al.*, *Chem. Eng. J.* **509**, 161242 (2025).
- [23] D. Zöllner, *Comput. Mater. Sci.* **125**, 51 (2016).
- [24] V. Karoutsos *et al.*, *Coatings* **14**, 1441 (2024).
- [25] L. Crouzier *et al.*, *Beilstein J. Nanotechnol.* **10**, 1523 (2019).
- [26] G. Rincón-Llorente *et al.*, *Coatings* **8**, 321 (2018).
- [27] C. A. Corrêa *et al.*, *RSC Adv.* **14**, 15220 (2024).

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) license.



IVAR GIAEVER: AN UNLIKELY HERO OF QUANTUM TIMES

IVAR GIAEVER: UN HÉROE IMPROBABLE DE LOS TIEMPOS CUÁNTICOS

E. ALTSHULER[†]

Group of Complex Systems & Statistical Physics, University of Havana, 10400 Havana, Cuba. ealtshuler@fisica.uh.cu

† corresponding author

Recibido 31/1/2025; Aceptado 1/4/2025

Giaever, who passed away in June 2025, transformed quantum physics through his experimental discovery of tunnelling in superconductors, a phenomenon predicted by BCS theory and intimately linked to the superconducting gap. Despite his modest academic beginnings, he achieved groundbreaking results at General Electric by demonstrating quasiparticle tunnelling across superconductor–insulator–superconductor junctions. His curiosity, perseverance, and collaborative environment enabled this achievement. The author, whose own research was shaped by tunnelling effects in ceramic superconductors, reflects on Giaever's profound influence during a fleeting elevator encounter.

Giaever, fallecido en junio de 2025, transformó la física cuántica mediante su descubrimiento experimental del efecto túnel en superconductores, un fenómeno predicho por la teoría BCS e íntimamente ligado al “gap” superconductor. A pesar de sus modestos comienzos académicos, logró resultados innovadores en General Electric al demostrar el efecto túnel de cuasipartículas a través de las uniones superconductor-aislante-superconductor. Su curiosidad, perseverancia y un ambiente de colaboración hicieron posible este logro. El autor, cuya propia investigación se vio influenciada por los efectos túnel en superconductores cerámicos, reflexiona sobre la profunda influencia de Giaever durante un fugaz encuentro en un ascensor.

Keywords: Superconductivity (superconductividad), Nobel prize in physics (premio Nobel en física), quantum tunnelling (efecto túnel cuántico), history of science (historia de la ciencia)

I guess it happened around the year 2002, when I was visiting the Physics department at the University of Oslo. One morning, I was waiting the elevator at the ground floor, when another person quietly joined me. I mechanically nodded him as he arrived but, as soon as I returned to my original position, electricity went down my body. It was Ivar Giaever.

I looked up at the elevator indicator, noticing that the doors were about to open. I desperately tried to find a dignified way to tell Ivar how much I admired him as a scientist during the 15 seconds we would ride together into the elevator. But a hesitant “bye” was the only sound coming off my mouth when he walked out at his floor. As the doors closed behind him to lock me back inside the metal box, I felt like a frustrated scientific paparazzi. Ivar has passed away by June 20, 2025, at the age of 96 years old. With Leo Esaki and Brian Josephson, he had won the Nobel Prize in Physics in 1973 “for their experimental discoveries regarding tunnelling phenomena in semiconductors and superconductors”. Tunnelling, as we know, is one of the strangest signatures of the quantum world: a microscopic particle –like an electron– is eventually able to pass through an energy barrier that cannot be penetrated by a particle in the macroscopic world. Isaac Newton would have mocked this possibility; no doubt.

But let us go back to our main character. When he finished his mechanical engineering studies at the Norwegian Institute of Technology, it was very hard to predict Ivar's brilliant future as a scientist: he finished scoring 4.0 marks –which means barely passing, as the best grade in Norway was 1.0. Surprisingly, he was admitted for a position at the General Electric Research Laboratory in 1956 (Schenectady, New York), by an impressed interviewer who had no clue of the Norwegian

grading system [1]. Giaever would spend decades in that place, where he performed the experiments that eventually launched him into the Nobel arena. Superconductors are materials that, for temperatures below the so-called critical temperature (T_C), display three bizarre experimental fingerprints: zero resistivity, expulsion of magnetic flux lines from their interior (Meissner effect), and flux quantization. This collection of strange properties is the result of the fact that superconductivity is a macroscopic quantum phenomenon: all the carriers of the non-dissipative current –the Cooper pairs– can be described by a single quantum wavefunction. The microscopic theory describing it was created by Bardeen, Schrieffer and Cooper (BCS) in 1957, for which they received the Physics Nobel prize of 1972 [2]. A non-microscopic theory –perhaps even more fruitful, in my opinion– was developed by Ginzburg, Landau, Abrikosov and Gorkov (GLAG) around the same time [3]. These theories suggested that the non-dissipative current in superconductors would be carried not by electrons, but by electron couples (called Cooper pairs) that are somehow “synchronized” all over the superconductor –by means of a phonon-based interaction, if we follow the original BCS model.

Being creatures of the quantum world, Cooper pairs might be expected to tunnel through a non-superconducting barrier sandwiched between two superconductors. That would imply a hard-to-swallow quantum effect: a current could be established at zero voltage across the barrier. This effect was predicted by a 22-year-old physicist named Brian Josephson in 1962 [4] (Initially, his ideas looked so bizarre, that they were publicly –and wrongly– dismissed by Bardeen himself [5]).

But the BCS model also suggests a perhaps less bizarre kind of

tunnelling. Cooper pairs can be broken into “quasi-particles” (that we can imagine as electrons “missing” their couple) if an energy equal to the “superconducting gap” is provided. One way to achieve it is applying an appropriate potential difference between two superconductors separated by an insulating barrier: in such case, Cooper pairs break into quasi-particles, which tunnel through the junction from the higher voltage to the lower voltage superconducting electrode. The fingerprint of it is a current-voltage curve across the barrier where the tunnelling current only flows if the voltage difference is equal or larger than $2\Delta/e$, where e is the charge of the electron and Δ is the superconducting gap. So, if you measure a current-voltage characteristic of a superconductor-insulator-superconductor barrier, you can calculate the value of the gap of the superconducting electrodes! Ivar Giaever, partly following suggestions from colleagues, decided to test this possibility in the lab. It was not an easy task: as a mechanical engineer, he had zero experience in solid-state fabrication, low temperatures or electrical measurements, and a modest background in theoretical physics. However, with the help of extremely cooperative members of his lab at General Electric, he fabricated a tunneling barrier consisting of two lead electrodes linked by a very fine layer of lead oxide: at low enough temperatures obtained with the help of liquid helium, the lead would become superconducting but not the oxide. And in fact he found the tunneling effect: there was a range of applied voltages with basically no current passing through the device, but it would rise quite sharply when the voltage value $2\Delta/e$ was reached [6].

How is it possible that an average-performing mechanical engineer with a modest background in either theoretical or experimental physics, as well as a “non-quantum” frame of mind had made a major contribution to quantum physics? It seems that it was a combination of enormous curiosity, hard work, freedom to choose his research topic, and the help of cooperative and selfless colleagues. As Giaever himself writes in his Nobel lecture, “In particular, I can remember (Charles) Bean enthusiastically spreading the news in our laboratory and also patiently explaining to me the significance of the

experiment” [7].

For decades, I worked myself in the field of superconductivity, doing inexpensive experiments at the modest temperature of liquid nitrogen, until we ran out of it due to economical debacles and the plain indolence of some decision-makers. I used to work in the most inexpensive materials: ceramic superconductors. But thank to the “dirtiness” of the samples, all my experiments were permeated by the quantum tunnelling across the “weak-links” naturally occurring between superconducting grains [8–10]. It forced me into the wonderful world of Giaever’s, and critically shaped my scientific career as a mature researcher able to survive the circumstances.

These thoughts flooded my mind during the 15 second ride with Ivar Giaever in the elevator, finally condensing into a simple “bye” as the doors closed behind him to lock me back inside the metal box.

REFERENCES

- [1] I. Giaever, “I am the smartest man I know: a Nobel laureate’s difficult journey” (World Scientific, 2017)
- [2] J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer, *Phys. Rev.* **106**, 162 (1957)
- [3] V. L. Ginzburg, L. D. Landau, *J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.)* **20**, 1064 (1950)
- [4] B. D. Josephson, *Phys. Lett.* **1**, 251 (1962)
- [5] D. G. McDonald, *Physics Today* **54**, 46 (2001)
- [6] I. Giaever, K. Megerle, *Phys. Rev. Lett.* **5**, 147 (1960)
- [7] I. Giaever, Nobel Lecture: Electron tunneling and superconductivity. In Stig Lundqvist (eds.), *Nobel Lectures, Physics 1971-1980* (1992)
- [8] E. Altshuler, R. Cobas, A. J. Batista-Leyva, C. Noda, L.E. Flores, C. Martínez, M. T. D. Orlando, *Phys. Rev. B* **60**, 3673 (1999)
- [9] A. J. Batista-Leyva, R. Cobas, E. Estévez-Rams, M. T. D. Orlando, C. Noda, E. Altshuler, *Physica C* **331**, 57 (2000)
- [10] A. J. Batista-Leyva, R. Cibas, M. T. D. Orlando, E. Altshuler, *Superc. Sci. Technol.* **16**, 857 (2003)

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) license.



ESCRUTANDO CON LA ANTIMATERIA

SCRUTINIZING WITH ANTIMATTER

A. A. IRIBARREN-ALFONSO^{✉†}

Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales (IMRE), Universidad de La Habana, 10400 La Habana, Cuba. augusto.iribarren@gmail.com[†]
 †para la correspondencia

Recibido 18/11/2024; Aceptado 1/9/2025

La Física sugiere que la Naturaleza está constituida por materia y la llamada anti-materia, esta última en menos cantidad. La antimateria la constituyen antipartículas con la misma masa, pero aunque su carga y momento magnético son de la misma magnitud, son opuestos a las de la partícula correspondiente de la materia ordinaria. La colisión de partículas y antipartículas genera fotones de alta energía. En el presente artículo se expone una introducción al uso de la antimateria, en específico de los antielectrones o positrones, para hurgar y estudiar, a partir de su aniquilación con electrones presentes, aspectos tan diversos como el metabolismo de un tejido en un ser vivo y las características de las defectos de vacancia en diversos materiales.

Physics suggests that Nature is made of matter and the so-called anti-matter, the latter in lesser extent. Antimatter is made up of antiparticles with the same mass, but although their charge and magnetic moment are of the same magnitude, they are opposite to those of the corresponding particle of ordinary matter. The collision of particles and antiparticles generates high-energy photons. This paper presents an introduction to the use of antimatter, specifically antielectrons or positrons, to explore and study, through their annihilation with present electrons, aspects as diverse as the metabolism of tissue in a living being and the characteristics of vacancy defects in various materials.

Keywords: Matter and anti-matter (materia y anti-materia); positron annihilation (aniquilación positrónica); positron emission tomography (PET, Tomografía de emisión positrónica); positron annihilation spectroscopy (PAS, espectroscopía de aniquilación de positrones).

I. INTRODUCCIÓN

Las técnicas nucleares de caracterización utilizan las propiedades de los núcleos atómicos o partículas nucleares como neutrones, iones, protones, electrones y positrones, para estudiar la composición, estructura y propiedades de los materiales [1]. Estas técnicas tienen la característica de que penetran el material en profundidad, lo que posee la gran ventaja de permitir un análisis volumétrico, además de que son no destructivas, muy sensibles y pueden dar información específica y hasta cuantitativa. Como desventajas las técnicas nucleares en general necesitan instalaciones radioprotegidas de acceso limitado, pueden activar las muestras en algunos casos y necesitan tiempos de medición largos. Sus aplicaciones son multidisciplinarias en campos como ciencia de materiales, farmacéutica, energía, medicina, etc.

Las técnicas nucleares pueden clasificarse según la partícula que interactúa con la materia. Así están las técnicas basadas en la interacción de neutrones, como la dispersión de neutrones (ND) [2], la interacción de iones, como la retrodispersión Rutherford (RBS) [3] y la espectrometría de masas con acelerador (AMS); las basadas en la emisión de rayos gamma, como la espectroscopía Mossbauer [4]; las basadas en la interacción con positrones como la espectroscopía de aniquilación positrónica (PAS) [5] y la tomografía por emisión de positrones (PET) [6].

Esta última técnica relacionada con la aniquilación positrónica tiene su gran importancia en el estudio de actividad fisiológica entre otros aspectos en seres vivos y en ciencia de materiales para estudiar la estructura y defectos electrónicos en sólidos

orgánicos o inorgánicos.

En el presente artículo se abordan las técnicas relacionadas con la aniquilación positrónica como método de estudio de seres vivos por medio de la técnica PET y la caracterización de materiales por la técnica PAS.

II. ANTIMATERIA: LOS POSITRONES Y SU ANIQUILACIÓN

La naturaleza está formada por materia y antimateria [7]. Antimateria se denomina a la materia formada por antipartículas que son partículas contrapartes de las partículas ordinarias comúnmente conocidas, aunque la antimateria existe en mucho menores concentraciones que la materia. Cada partícula subatómica posee su antipartícula que posee la misma masa y la magnitud de carga eléctrica, pero poseen carga y momento magnético opuestos. Ejemplos de esto son el electrón (e^-) y su antielectrón o positrón (e^+) que es igual al electrón, pero con carga positiva y con el protón y su antiprotón que es un protón con carga negativa. Los átomos de antipartículas no persisten naturalmente, pues se aniquilan con las partículas ordinarias y solo se han obtenido artificialmente aunque han tenido tiempos de vida muy cortos. La aniquilación de materia con antimateria genera gran cantidad de energía en forma de radiación electromagnética.

Una de las antipartículas que ha tenido aplicaciones prácticas es el antielectrón o positrón (e^+) [8]. Los positrones se obtienen por un proceso de desintegración (beta) en que un protón (p^+) dentro del isótopo radioactivo se desintegra en un neutrón (n), un positrón (e^+) y un neutrino ¹ (ν_e) (Figura 1).

¹El neutrino es una partícula subatómica neutra con masa casi cero. Son de tres tipos o "sabores". Este es de tipo electrónico.

Radioisótopos en los cuales ocurre esta desintegración y se emiten positrones son el carbono-11 (^{11}C), el potasio-40 (^{40}K), el nitrógeno-13 (^{13}N), el oxígeno-15 (^{15}O), el aluminio-26 (^{26}Al), el sodio-22 (^{22}Na), el flúor-18 (^{18}F) y el yodo-124 (^{124}I). Cuando el positrón colisiona con un electrón ambos se aniquilan generando dos fotones γ cuyas energías corresponden teórica y experimentalmente al valor de la ecuación de la energía de Einstein $E = m_e c^2$ donde m_e es la masa del electrón de aproximadamente $9 \times 10^{-31} \text{ kg}$ y c es la velocidad de la luz de unos $3 \times 10^8 \text{ m/s}$. El valor de esta energía corresponde a un fotón de $E = 511 \text{ keV}^2$, que por su magnitud es una radiación electromagnética ionizante, por lo que puede tener efectos biológicos importantes en seres vivos y es capaz de penetrar profundamente diversos materiales. En el proceso de aniquilación los fotones generados emergen en direcciones prácticamente antiparalelas, o sea, sus vectores de velocidad tienen aproximadamente la misma dirección y sentidos opuestos, es decir, un ángulo de aproximadamente 180° (Figura 2).

ocurre con electrones de niveles más externos o de valencia con menor momento.

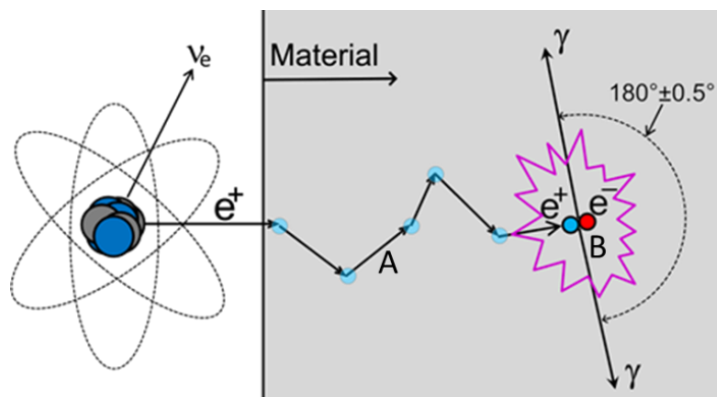


Figura 2. Esquema de la generación de un positrón (e^+), su camino dentro del material (A), su colisión con un electrón (e^-) o aniquilación positrónica (B) y la consiguiente generación de dos fotones con sentido opuesto.

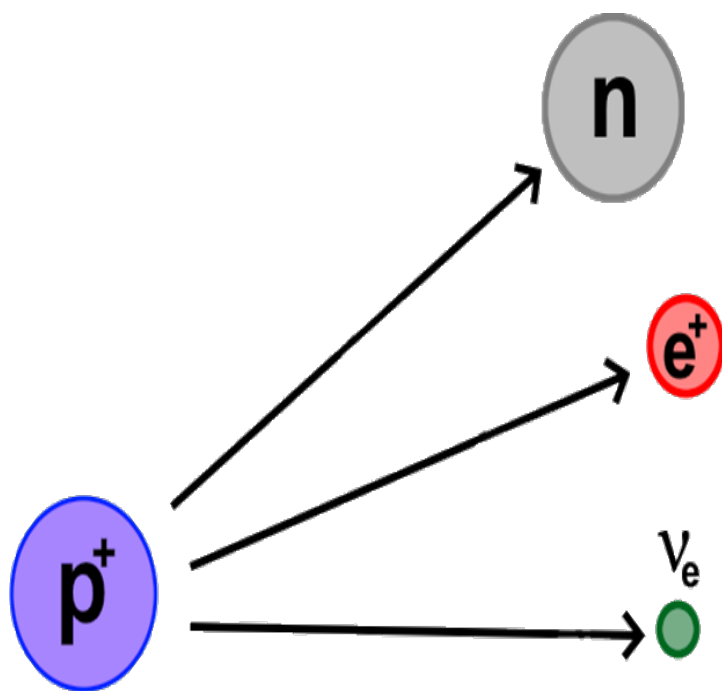


Figura 1. Esquema de la desintegración de un protón (p^+) en un neutrón (n), un positrón (e^+) y un neutrino (ν_e).

En la práctica el valor de energía de los fotones generados no siempre es exactamente 511 keV, sino que hay un pequeño corrimiento de este valor. Esto se debe a que en el momento de la colisión electrón-positrón los electrones no están en reposo, sino en movimiento, por lo que, según la componente de este movimiento sobre la dirección de la colisión, ocurre una variación estadística ΔE a causa de un efecto Doppler³. El valor de $E \pm \Delta E$ será menor y más cercano a cero si la aniquilación

III. APLICACIONES DE LA ANIQUILACIÓN POSITRÓNICA

La aniquilación positrónica se utiliza en la medicina en la tomografía de emisión positrónica (PET por sus siglas en inglés) [9] y en estudios de materiales mediante la espectroscopía de aniquilación positrónica (PAS por sus siglas en inglés) [10, 11].

III.1. Tomografía de emisión positrónica

En la tomografía de emisión positrónica (PET) se administra al paciente por vía intravenosa un radiofármaco compuesto por un radioisótopo que emite positrones, agregado a un fármaco que es un compuesto orgánico específico para estudiar el órgano o la enfermedad de interés. Los positrones emitidos desde el radiofármaco pueden colisionar con los electrones del tejido en el que esté presente. Los dos fotones generados en la colisión son fotodetectados por dos dispositivos contrapuestos, lo que se denomina "en coincidencia". La adquisición de los datos se realiza en coordenadas polares (r, θ) y la intensidad de las imágenes obtenidas son las que determinan o sugieren qué procesos ocurren en los órganos, por lo que es una técnica de imagenología médica (Figura 3). El radiofármaco emisor de positrones se ha comprobado que es seguro para adultos y tienen tiempos de vida media relativamente cortos, por lo que no duran mucho en el organismo. El radioisótopo más utilizado es el flúor-18 (^{18}F) con un tiempo de vida media cercano a los 110 minutos, aunque hay otros radioisótopos que también se utilizan como en galio-68 (^{68}Ga), indio-111 (^{111}In) y el carbono-11 (^{11}C), entre otros menos utilizados o en estudio. Esta prueba permite

²keV = 10^3 eV . La unidad eV, electronvoltio, es la energía cinética adquirida por un electrón en el vacío con una diferencia de potencial de 1 voltio (V). Se asocia también con la energía de los fotones. La energía de un fotón de luz visible está en el rango entre 1.6 eV y 3.2 eV. En física de altas energías se trabajan megaelectronvoltio (1 MeV = 10^6 eV) y gigaelectronvoltios (1 GeV = 10^9 eV).

³El efecto Doppler se ha usado ampliamente en diversas aplicaciones habituales. Está relacionado con la variación de la frecuencia de una onda cuando el emisor se mueve respecto al receptor o viceversa. Un ejemplo de él es la variación del sonido de la sirena de una ambulancia o carro patrulla cuando se acerca al receptor y cuando se aleja. Este ejemplo es con ondas sonoras, pero también ocurre con ondas electromagnéticas como la luz.

estudiar la actividad metabólica y funcionamiento de sus tejidos y órganos y se ha empleado mucho en los campos neurológicos, oncológicos y cardiovasculares, aunque en la actualidad tiende a extenderse a otros campos. Aunque pueda preocupar la exposición a estas radiaciones, las dosis tan bajas no constituyen peligro alguno para el paciente, lo que ha sido confirmado por el uso por décadas de esta técnica sin la detección de efectos dañinos por esta causa. La técnica de PET tiene ventajas sobre otras técnicas, pues puede realizar la detección temprana de enfermedades y la efectividad de un tratamiento a partir de la observación directa de la actividad celular.

La tomografía de emisión de positrones puede brindar información que no se obtiene por otras técnicas de imagenología como la tomografía axial computarizada (TAC) y la resonancia magnética nuclear (RMN). La técnica PET es capaz de aportar información de cómo están funcionando algunas partes del organismo, más allá de aportar una simple imagen de esas partes. Suele utilizarse en la detección temprana de enfermedades, aunque no se descartan las ventajas posibles del uso combinado de varias técnicas. Además, es una técnica menos invasiva que, por ejemplo, la cirugía exploratoria. Lamentablemente la necesidad de exponer al paciente a radiaciones ionizantes, su alto costo y la necesidad de instalaciones especializadas son desventajas que limitan su uso.

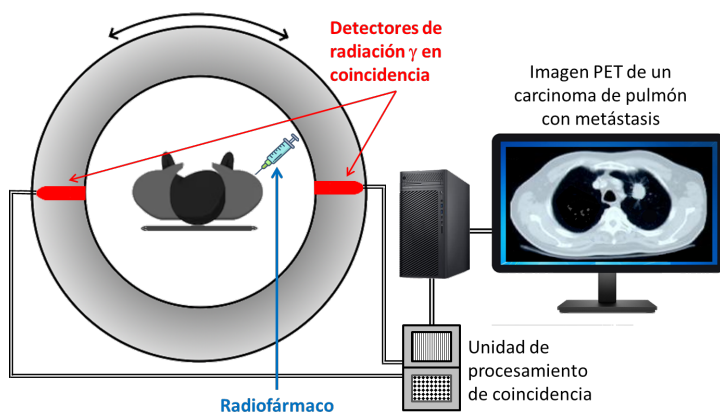


Figura 3. Esquema de un equipo para PET y la imagen de un carcinoma de pulmón con metástasis.

III.2. Espectroscopía de aniquilación positrónica.

Los materiales perfectos no existen. Aunque se han necesitado materiales casi perfectos, en general, se aprovecha el grado de perfección o imperfección a conveniencia en aplicaciones [12]. En los materiales siempre hay distorsiones estructurales y estequiométricas como intercambio de átomos de sus posiciones “correctas”, impurezas que sustituyen los átomos “correctos”, átomos no enlazados como ocurre en la superficie, ausencia del átomo “correcto” en la estructura o vacancia, dislocaciones que son cadenas de distorsiones, y otros defectos [13, 14].

Las vacancias atómicas son defectos puntuales en que falta al menos un átomo en un sitio de la red cristalina de un material. Las vacancias existen de manera intrínseca o natural y su concentración en el material depende de la temperatura, la energía de formación y otras características y parámetros. En el campo de los semiconductores y los metales, aunque también en otros tipos de materiales, las vacancias son relevantes, pues inducen cambios en las propiedades mecánicas, estructurales, ópticas, eléctricas y otras [15]. Por ello es necesario estudiarlas para conocer su comportamiento y características [16]. No obstante, no son muchos los métodos de estudio de vacancias y son significantes aquellos que se basan en la aniquilación de positrones por colisión con electrones.

En los estudios de materiales mediante la espectroscopía de aniquilación positrónica (PAS) se utiliza frecuentemente el sodio-22 (^{22}Na) debido a su tiempo medio de vida de 2.6 años por lo que puede utilizarse tiempos largos. Una de las técnicas derivadas de PAS tiene en cuenta la probabilidad de colisión del positrón con un electrón en el material que se refleja en el tiempo de vida, o sea, el tiempo entre la generación del positrón en su fuente y su aniquilación y detección del fotón que se denomina espectroscopía tiempo de vida de la aniquilación positrónica (PALS por sus siglas en inglés). El positrón, al penetrar en un material, puede inicialmente transitar por él, termalizándose sin interacción, o incluso ser rechazados por los núcleos atómicos con carga positiva como él (proceso A de Figuras 2 y 4), hasta que encuentre un electrón como ilustra el proceso B en Figuras 2 y 4. En el material “perfecto”, o sea, sin defectos y alto grado de cristalinidad es muy probable que esto ocurra en tiempos breves de no más de aproximadamente 150 ps⁴. Si el material tiene vacancias aisladas o mono-vacancias, o sea, ausencias de átomos como defectos puntuales, habrá algo menor densidad local de electrones, la probabilidad de aniquilación se reduce un poco y el tiempo de vida del positrón crece y está en un rango aproximado entre 200 ps y 300 ps, en lo que influye significativamente la concentración entre otros parámetros (proceso C en Figura 4). Si hay zonas con muchas vacancias agrupadas, o sea, clústeres de vacancias o huecos la concentración de electrones disminuye más, por lo que la probabilidad de aniquilación es mucho menor y dependerá en gran medida de la concentración, tamaño y características de cada clúster (proceso D en Figura 4). El tiempo de vida del positrón en los huecos o clústeres será mayor que 300 ps y en algunos materiales puede llegar a los nanosegundos. La probabilidad de aniquilación del positrón que está directamente relacionado con el conteo de fotones, se calcula a partir del decaimiento detectado de la señal en el tiempo y utilizando y ajustando la expresión:

$$N_i(t) = \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{t_i} \exp\left(-\frac{t}{t_i}\right) \quad (1)$$

donde i se relaciona con el proceso de aniquilación, o sea, si ocurre en el material “perfecto”, en monovacancias o en clústeres de vacancias o huecos más o menos grandes, n es la cantidad mínima de posibles procesos, I la intensidad

⁴1 ps es 0.000 000 000 001 s o sea, 10^{-12} s.

o conteo de fotones γ de la emisión obtenida mediante un detector y t_{subi} es el tiempo de vida del positrón que es característico del decaimiento relacionado con la velocidad de aniquilación del positrón que se muestra en Figura 5. En la Figura 5, el mejor ajuste con la expresión (1) son dos exponenciales decrecientes con valores de tiempos de vida τ_1 menor, relacionado con la aniquilación positrónica combinadas en el material “perfecto” y en monovacancias catiónicas, y τ_2 relacionado con la aniquilación positrónica en clústeres complejos de vacancias. Los valores I_1 e I_2 indican el porciento de ocurrencia de cada proceso.

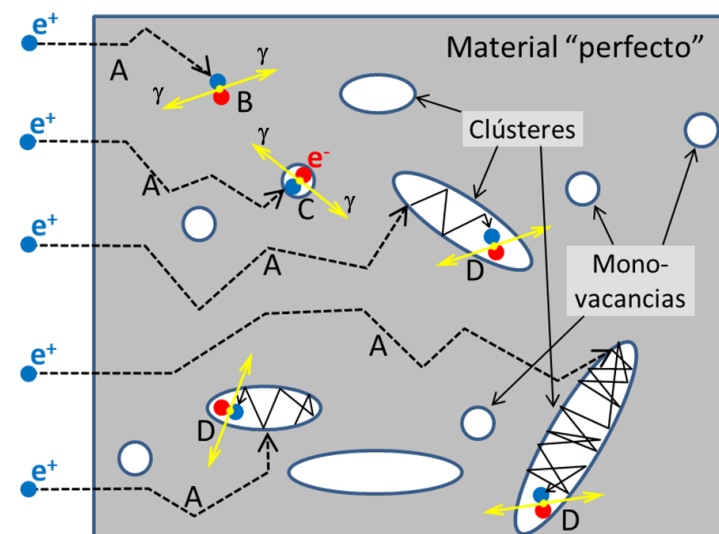


Figura 4. Esquema de la aniquilación positrónica en vacancias y clústeres en un material.

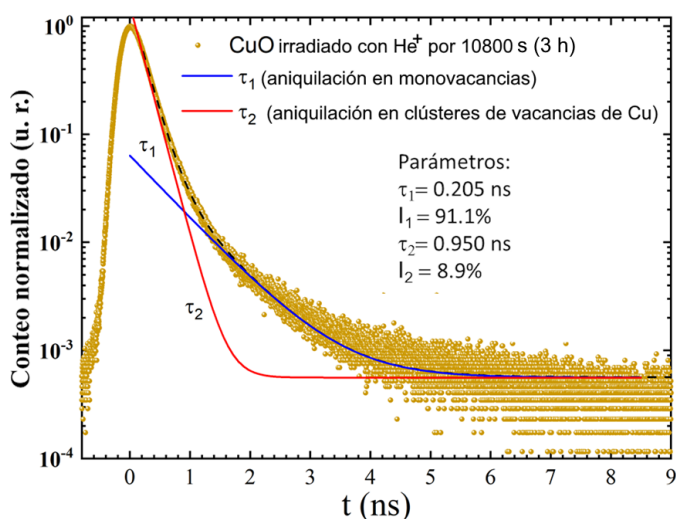


Figura 5. Espectro de tiempo de vida del positrón en un óxido metálico irradiado con iones de He.

En materiales no conductores existe la probabilidad de que la interacción entre un positrón y un electrón devenga en un estado ligado inestable llamado positronio, en que positrón y electrón “giran” alrededor de su centro de masa manteniendo

una distancia de 0.106 nm. Si el espín [Espín (del inglés “spin”, en español “giro”) representa el momento magnético de las partículas elementales como el electrón y el positrón, recordando a un cuerpo cargado eléctricamente en rotación.] del electrón y el del positrón son paralelos (espín=1), se forma un estado llamado orto-positronio (o-Ps), con vida media de 140 ps, mientras que si son de espines opuestos (espín=0) resulta la especie para-positronio (p-Ps) con vida media de 125 ps. El o-Ps y el p-Ps se forman en relación 3:1.

Por otra parte, el estudio de la dispersión $\pm\Delta E$ del valor de la energía del fotón debido al momento del electrón con que se aniquila el positrón se denomina espectroscopía de ensanchamiento Doppler (DBS por sus siglas en inglés). La relación entre la desviación ΔE de la aniquilación positrónica con electrones de alto momento y aquella con electrones de valencia es capaz de indicar las características del defecto de vacancia que puede ser compleja [6]. Los resultados de esta técnica junto con la determinación del tiempo de vida del positrón permite dilucidar las características relevantes de las vacancias, grupos de vacancias, huecos, su concentración, su tamaño y hasta cómo se comportan bajo la acción de tratamientos térmicos, dopajes, irradiación, etc. en metales, aleaciones, semiconductores, materiales complejos como las zeolitas y otros materiales semejantes, pero también en materiales orgánicos como los polímeros.

Las técnicas de PAS tienen como gran ventaja poder resolver tamaños de defectos por debajo de los 10 nm a profundidades de decenas de micrómetros. A esta posibilidad solo se acercan las microscopía de efecto túnel (STM) y de fuerza atómica (AFM), pero a tamaños de pocos nanómetros y posee mayor resolución que la microscopía de transmisión (TEM). Por otra parte la técnica de PAS es sensible a concentraciones de defectos hasta algo menos que 1 ppm y profundidades de hasta decenas de micrómetros, mientras que ninguna otra técnica se acerca a estas posibilidades [6]. Las técnicas de PAS tienen posibilidades únicas de diferenciar la presencia de monovacancias, pequeños clústeres de solo algunas vacancias, grandes clústeres de vacancia, concentración de defectos de vacancias sobre todo en materiales nanoestructurados donde la superficie es relevante, nanoprecipitados en metales, aleaciones y semiconductores y su prevalencia y el estudio de estos y otros detalles cuando el material se somete a acciones externas.

IV. CONCLUSIONES

En resumen las técnicas basadas en aniquilación de positrones, tanto las de diagnóstico de humanos y seres vivos como las de estudio de defectos en materiales aportan importantes informaciones que no se obtienen por otras vías. Sus usos poseen diversas ventajas sobre otras técnicas debido a las posibilidades de penetración de positrón su y reacción específica al medio. Sin embargo, ha de considerarse que el uso combinado de estas con otras técnicas permite lograr una caracterización más profunda y certera.

V. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está bajo los proyectos PN223LH008-66 del Programa Nacional de Nanociencias y Nanotecnología (PN3) y PN223LH010-58 del Programa Nacional de Ciencias Básicas y Naturales (PNCB), Cuba.

REFERENCES

- [1] S. Luo, "Nuclear Analytical Techniques and Methods", in *Nuclear Science and Technology: Isotopes and Radiation* (Springer, Singapore, 2023), pp. 91–130.
- [2] D. Liu, K. Song, W. Chen, J. Chen, G. Sun, and L. Li, *Nucl. Anal.* **1**, 100011 (2022).
- [3] M. Rocchini, M. Chiari, E. Pasquali, A. Nannini, and K. Hadynska-Klek, *Nucl. Instrum. Meth. B* **486**, 68 (2021).
- [4] B. Wareppam, E. Kuzmann, V. K. Garg, and L. H. Singh, *J. Mater. Res.* **38**, 937 (2023).
- [5] F. A. Selim, *Mater. Charact.* **174**, 110952 (2021).
- [6] J. Trotter, A. R. Pantel, B. K. K. Teo, F. E. Escorcia, T. Li, D. A. Pryma, and N. K. Taunk, *Adv. Radiat. Oncol.* **8**, 101212 (2023).
- [7] L. Canetti, M. Drewes, and M. Shaposhnikov, *New J. Phys.* **14**, 095012 (2012).
- [8] D. J. Pons, A. D. Pons, and A. J. Pons, *Phys. Essays* **27**, 26 (2014).
- [9] G. Muehlehner and J. S. Karp, *Phys. Med. Biol.* **51**, R117–R137 (2006).
- [10] R. W. Siegel, *Annu. Rev. Mater. Res.* **10**, 393 (1980).
- [11] J. Cízek, *J. Mater. Sci. Technol.* **34**, 577 (2018).
- [12] O. Pedgley, "Desirable Imperfection in Product Materials", in *Design's Big Debates - DBS International Conference*, edited by Y. Lim, K. Niedderer, J. Redström, E. Stolterman, and A. Valtonen (Umeå, Sweden, 16-19 June 2014).
- [13] H. G. Van Bueren and R. Smoluchowski, *Phys. Today* **14**, 62 (1961).
- [14] K. Müllen, *Nat. Rev. Mater.* **1**, 15013 (2016).
- [15] M. Wuttig, D. Lüsebrink, D. Wamwangi, W. Wehnic, M. Gilleßen, and R. Dronskowski, *Nature Mater.* **6**, 122 (2007).
- [16] A. Seeger, *Appl. Phys.* **4**, 183 (1974).

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) license.



EL INSTITUTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE MATERIALES (IMRE) DE LA UNIVERSIDAD DE LA HABANA: ANIVERSARIO XL

THE INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY (IMRE) OF THE UNIVERSITY OF HAVANA: 40TH ANNIVERSARY

J. A. MARTÍNEZ[†], K. VALDIVIÉS-CRUZ, C. R. MILIÁN-PILA

Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales (IMRE), Universidad de La Habana, 10400 La Habana, Cuba; javmar@imre.uh.cu
†para la correspondencia

Recibido 5/2/2025; Aceptado 20/12/2025

Se realiza un rápido recuento de la trayectoria científica del Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales (IMRE) de la Universidad de La Habana, desde su fundación en 1985 hasta su 40 aniversario. Analizamos los principales resultados investigativos logrados durante estos 40 años, así como realizamos un estudio de su comportamiento histórico.

It's presented a short review of the scientific history of the Institute of Materials Science and Technology (IMRE) of the University of Havana, from its creation in 1985 to its 40th anniversary. We analyze the main research results achieved during these 40 years, as well as an study of its historical performance.

Keywords: Historia de la Ciencia (history of science); instalaciones de laboratorio nacionales e internacionales; ciencia de materiales (materials science), nanociencia (nano-science), nanotecnología (nanotechnology)

I. INTRODUCCIÓN

El Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales de la Universidad de La Habana (UH), fue fundado como Instituto de Materiales y Reactivos para la Electrónica (IMRE) el 1 de julio de 1985 [1–3]. Durante estos 40 años de existencia, el IMRE ha realizado importantes aportes al conocimiento científico de Cuba, sea realizando investigaciones científicas originales, desarrollando productos innovativos, o realizando servicios científico-técnicos. También ha jugado un importante papel en la formación postgraduada de profesionales y en el apoyo a la docencia de pregrado de la Universidad de La Habana. El llegar a 40 años, es sin duda un gran éxito, a pesar de las muchas dificultades en el camino de un Instituto que, como “unidad presupuestada”, no pertenece a ningún grupo empresarial, sufriendo de las lógicas carencias presentes en nuestra sociedad. Intentaremos realizar en este artículo un recuento y análisis de lo logrado en estos años en el campo de la investigación científica.

II. ANTECEDENTES Y SURGIMIENTO DEL IMRE

La investigación científica en las universidades cubanas surge con la Reforma Universitaria de 1962. Hasta aquel momento, las escasas universidades cubanas formaban primordialmente graduados en especialidades humanísticas (Derecho, Filosofía y Letras) y Medicina, y en mucha menor medida ingenieros, que por demás contaban con planes de estudios en general obsoletos. Apenas existían las carreras de ciencias y la investigación científica en las universidades era prácticamente nula [1,4].

La reforma universitaria de 1962 cambió radicalmente este panorama, surgieron las nuevas carreras de Física, Química

y Matemática, se iniciaron las investigaciones científicas por parte de profesores y estudiantes y con posterioridad, en la medida que las investigaciones se fueron desarrollando, se fueron creando los centros científicos universitarios [1,4].

El creciente desarrollo en Cuba en la década de 1980 de una industria electrónica, de acuerdo con los planes y convenios dentro del Consejo de Ayuda Mutua Económica (CAME) de los países socialistas hacía necesario y aconsejable la organización y centralización en un instituto de las investigaciones que realizaban hasta entonces por separado, grupos de las Facultades de Física y Química de la UH. Así, el 1 de julio de 1985 se creó el Instituto de Materiales y Reactivos para la Electrónica (IMRE) de la Universidad de La Habana. Formado con personal proveniente de ambas facultades (Física y Química), con larga experiencia investigativa y docente, el IMRE concentró el caudal de conocimientos acumulados por los claustros de ambas facultades, en especial en las investigaciones sobre Física y Química del Estado Sólido [1–3]. Sus laboratorios fundacionales radicaban originalmente dentro de las propias instalaciones de las facultades de Física y Química. En fechas posteriores, tras los primeros logros científicos salidos del nuevo instituto se construyeron sus propias instalaciones, aun cuando una parte de sus laboratorios permanecieron en el edificio de la Facultad de Física.

III. PRIMEROS AÑOS

Casi coincidentemente con el surgimiento del IMRE, se produjo en 1986-1987 un descubrimiento científico de impacto mundial y con perspectivas muy promisorias: el descubrimiento de la superconductividad a “altas” temperaturas [5,6] (“altas” comparadas con las temperaturas

hasta entonces conocidas en las cuales se podía lograr este fenómeno, por debajo de algunos kelvin), que prometía una manera más eficiente de aprovechamiento de la energía eléctrica, si se lograba elevar la temperatura crítica de los superconductores hasta la temperatura ambiente.

La experiencia del Laboratorio de Magnetismo en la obtención de ferritas por el método cerámico, permitió que un equipo de ese laboratorio obtuviese en el propio 1987 una cerámica que sumergida en nitrógeno líquido hacía levitar sobre ella a un imán, mostrando su carácter superconductor. Este resultado mostró que el IMRE, desde sus inicios, no sólo era capaz de resolver problemas prácticos, sino que tendría potencial para obtener resultados científicos de nivel mundial. [1]

Coincidentemente con estos éxitos en el campo del magnetismo y la superconductividad, en las instalaciones del IMRE se obtuvieron otros importantes logros en estos primeros años, como lo fueron: producción de óxido férrico cubano y ferritas cubanas a partir de éste, crecimiento de monocristales de cuarzo a partir de cuarzo cubano, fabricación de imanes permanentes, fabricación de fotodiodos, soluciones búffer para gasometría, desarrollo de hemoglobínometros, patrones de medicamentos, obtención de derivados de la quitosana, electrodos para cálculos renales, polímeros para lentes de contacto, trabajos de homologación y sustitución de importaciones en la electrónica, pinturas conductoras para circuitos flexibles, sensores de oxígeno por electrólitos sólidos para controlar la eficiencia de las calderas, láser para cirugía oftalmológica, equipo digitalizador de imágenes, desarrollo de materiales zeolíticos, fabricación de LEDs, obtención y caracterización de nuevos materiales semiconductores y para celdas solares, y obtención de reactivos de alta pureza [3].

IV. CRISIS: EL IMRE DURANTE EL PERÍODO ESPECIAL

Las afectaciones debidas al llamado Período Especial en la década de 1990, repercutieron inmediatamente en el IMRE en la carencia de reactivos químicos, en la ausencia de insumos para equipos e instrumental científico, la falta de piezas de repuesto, la falta de financiamiento para emprender nuevos proyectos investigativos y sostener los que se venían realizando, etcétera [1–3].

En el caso del IMRE, la paralización del Programa de la Electrónica, desarrollado dentro de los marcos del CAME, afectó el propio objetivo fundamental para el que había sido creado: el desarrollo de materiales y reactivos para la Electrónica. Necesariamente el IMRE debía cambiar la orientación de sus objetivos de investigación. La existencia de investigaciones previas en diferentes ramas de la Ciencia de Materiales daba al IMRE una amplia base y experiencia. De modo que el cambio de objetivos del instituto tendía a hacerse de forma natural [1].

V. EL IMRE DE HOY: CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE MATERIALES

Este cambio de orientación, impuesto por las condiciones económicas del país, se realizó paulatinamente en esos

años de Período Especial. Las investigaciones desarrolladas desde la fundación del IMRE en el estudio y desarrollo de ciertos materiales utilizados en la industria electrónica, especializaron al personal científico del instituto en un campo investigativo multidisciplinario, donde convergen Física, Química e Ingeniería, Ciencia y Tecnología: la Ciencia y Tecnología de Materiales [1].

Un momento importante en este proceso de transformaciones lo constituyó el cambio oficial de nombre del instituto, que a partir del curso 2005-2006 comenzó a denominarse Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales, manteniendo las siglas IMRE [1].

Como resultado de todo este proceso, las investigaciones científicas del IMRE se concentran hoy en las siguientes líneas: nanociencia y nanotecnología, nuevos materiales y sus tecnologías, diseño de dispositivos para la energía, el medio ambiente y médico farmacéuticos, análisis químico especializado, protección del medio ambiente, y desarrollo energético sostenible.

VI. PRODUCCIÓN CIENTÍFICA

VI.1. Artículos

Uno de los aspectos principales que caracteriza la labor de los investigadores del IMRE es su producción científica. A pesar de ser un centro de investigación relativamente pequeño, en los últimos años su producción científica en total de artículos, y en número de artículos publicados en revistas indexadas en la Web of Science o Scopus representa aproximadamente el 5% y el 10% de la producción total de la Universidad de La Habana, respectivamente. El comportamiento histórico de las publicaciones científicas del IMRE entre 1985 y 2024, ambos incluidos, de acuerdo con los artículos que hemos localizado en Google Académico, que hayan sido firmados por al menos un autor con la afiliación del IMRE (sea miembro de su claustro o adjunto), se muestra en la Figura 1 [7].

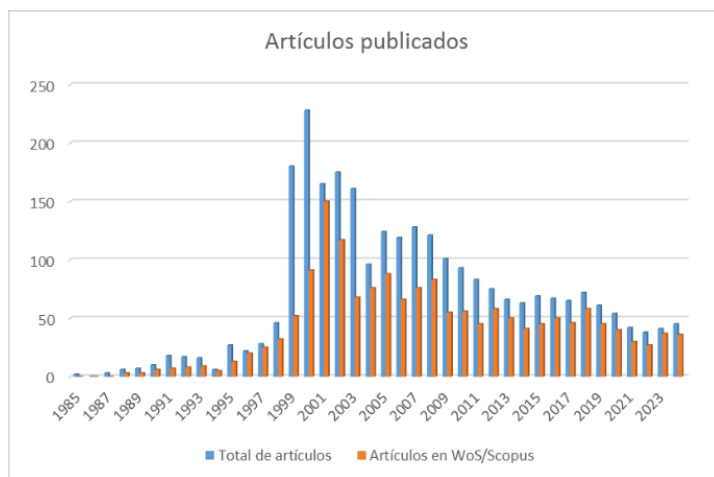


Figura 1. Número de artículos publicados por el IMRE en 1985-2024. Las barras azules representan el total de artículos y las barras naranjas aquellos publicados en revistas indexadas en la Web of Science o Scopus.

En la gráfica se puede apreciar una modesta producción científica en los primeros años del IMRE, similar al de otros centros de investigación de nuestro país en esos años, donde la política científica era dar prioridad a la aplicación concreta de los resultados científicos, y no su visibilidad en forma de publicaciones científicas. Es a partir del comienzo del denominado Período Especial que esta política cambia, y se comienza a promover la publicación de los resultados, incluso a nivel de Ciencia Básica. También influyó el cambio de las relaciones internacionales, que en los primeros años eran primordialmente con la Unión Soviética y los países del Campo Socialista (especialmente Hungría, Polonia y la República Democrática Alemana), naciones que compartían la misma política científica que Cuba, y que comienzan a partir de la década de 1990 a crecer y desarrollarse con países como México, Brasil, España y Francia, donde se priorizaba la publicación de los resultados, lo que también influyó en este cambio.

Es así como a partir de 1995 la producción científica publicada del IMRE se multiplica y comienza a crecer vertiginosamente de año en año. La conexión de Cuba a Internet en 1996 facilitó también el acceso a las revistas científicas internacionales y el envío de artículos a publicar en revistas fuera de Cuba. Este comportamiento alcanza su máximo alrededor del cambio de milenio (en 2000 se publicaron 228 artículos en total y en 2001 150 artículos fueron publicados en revistas indexadas en la Web of Science o Scopus) [7].

A partir de los primeros años del siglo XXI, nuestra producción científica ha mostrado en general una tendencia al decrecimiento. Esto tiene diferentes causas, entre las que se encuentra la obsolescencia, envejecimiento y roturas de nuestro equipamiento científico; y el éxodo de personal calificado, especialmente doctores y jóvenes, que se hizo más notorio justamente después del año 2000. Además, influye el incremento en las dificultades para publicar en revistas de impacto, causado por la promoción de las publicaciones de acceso abierto, cuyos costos no podemos pagar. Igualmente, han influido los vaivenes de las relaciones internacionales de nuestro país, al cancelarse los acuerdos de colaboración con otros países o ser el nuestro sometido a sanciones.

No obstante debe subrayarse una tendencia positiva: a partir de la segunda década de los 2000, hay una tendencia al incremento del por ciento de artículos publicados en la Web of Science o Scopus con respecto al total: es decir, si bien se publican menos artículos, estos tienen más calidad, pues se concentra la mayor parte de ellos en las revistas de mayor impacto y prestigio. Entre 2002 y 2011 en promedio, el 61 % de nuestros artículos fueron publicados en la Web of Science o Scopus. Sin embargo, entre 2012 y 2024, es decir, incluyendo los años de la pandemia del COVID-19, en promedio, esta cifra se incrementa hasta el 75 % [7].

Sin embargo, la tendencia decreciente en la publicación de artículos, anteriormente analizada no ha sido constante. Entre 2002 y 2018 ha habido algunos períodos de recuperación, creciendo nuestras publicaciones varias veces durante dos años seguidos, con nuevos períodos de decrecimiento. Por ejemplo, a partir de 2019, hubo cuatro años seguidos

de decrecimiento, que coincidieron con la pandemia de COVID-19, que implicó el cese de las actividades presenciales debido al confinamiento y el cierre de las fronteras de Cuba, cesando completamente nuestras relaciones internacionales durante más de un año. Ello influyó negativamente sobre nuestras publicaciones, que en 2022 alcanzaron su mínimo: fueron publicados 38 artículos en total, y de ellos sólo 27 en la Web of Science y Scopus [7].

En los años más recientes, 2023 y 2024 se aprecia nuevamente una discreta recuperación de nuestra producción científica, lográndose publicar 45 artículos en total en 2024 y 36 de ellos en la Web of Science o Scopus (en 2023 fueron 41 y 37) [7].

En cuanto a la distribución de los artículos por revistas, encontramos que la revista donde más ha publicado el IMRE ha sido la Revista Cubana de Física, con 120 artículos, que representan el 6,9 % del total de publicaciones del IMRE, sobrepasando ampliamente al resto de las revistas donde se ha publicado [7]. Esto se explica si consideramos que en los años iniciales del IMRE las publicaciones se realizaban mayormente en revistas nacionales, siendo ésta una de las mejores, que en esos años publicaba de forma estable tres números anualmente (actualmente son dos de forma estable). Además, esta revista, a pesar de las dificultades, ha logrado mantenerse editándose a lo largo de más de 40 años (sólo no lo fue en 1994, 1995 y 1997). Además, desde 2012 se encuentra indexada en Scopus, y desde 2023 en el Emerging Sources Citation Index (Clarivate) [8], por lo que constituye una opción atractiva para nuestros investigadores.

Otras revistas nacionales con importante presencia de artículos del IMRE son la Revista Cubana de Química (44 artículos), la Revista CENIC Ciencias Químicas (26), los Anales de la Academia de Ciencias de Cuba (22), y Minería y Geología (17) [7].

En cuanto a revistas internacionales, se destacan Journal of Magnetism and Magnetic Materials (37 artículos), Microporous and Mesoporous Materials (32), Physica C (30), y Journal of Applied Physics (27) [7]. La gráfica con la cantidad de artículos en las veinte revistas donde más ha publicado el IMRE se muestra en la Figura 2.

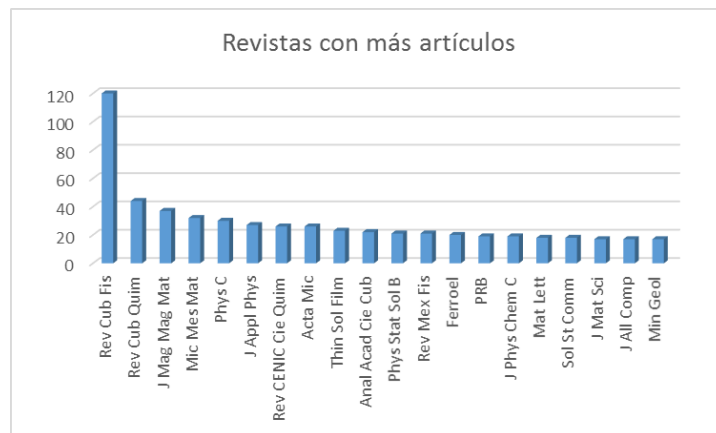


Figura 2. Revistas con más artículos publicados por el IMRE en 1985-2024.

En cuanto al impacto de las revistas donde se ha publicado, se destacan *Reviews of Modern Physics* (1 artículo [9], factor de impacto en 2023 de 36); *Advanced Energy Materials* (4 artículos [10–13]) y 24,4 de factor de impacto); *Nano Energy* (2 artículos [14, 15], factor de impacto 16,8); y *Angewandte Chemie* (3 artículos [16–18], factor de impacto 16,1). La Figura 3 muestra las veinte revistas de más impacto donde ha publicado el IMRE y la cantidad de artículos en cada una de ellas. En todos los casos se han tomado los factores de impacto correspondientes a 2023.

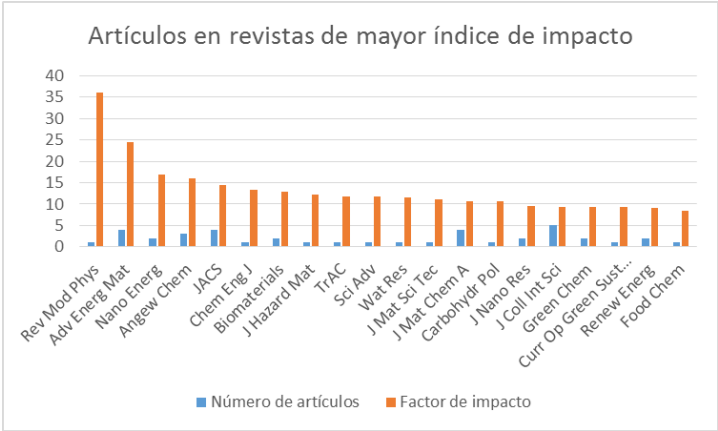


Figura 3. Factor de impacto en 2023 de las revistas de mayor factor de impacto donde ha publicado el IMRE (barras naranjas) y número de artículos publicados en ellas (barras azules) en 1985-2024.

La Figura 4 muestra la distribución de la cantidad de artículos publicados según el impacto de las revistas.

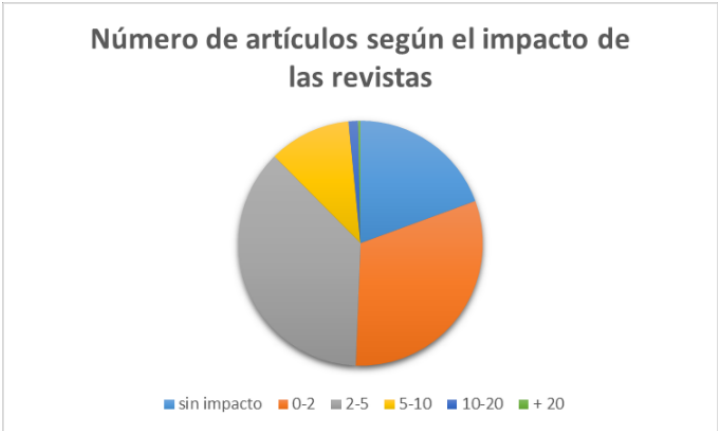


Figura 4. Distribución de la cantidad de artículos publicados por el IMRE en 1985-2024 según del factor de impacto de las revistas en 2023.

En la gráfica se puede apreciar que el 13 % de los artículos del IMRE han sido publicados en revistas con un factor de impacto superior a 5, y si consideramos un factor de impacto superior a 10, este número se eleva hasta el 49. Este análisis se confirma si examinamos las citas recibidas (Figura 5) [7]. 53 artículos han recibido la extraordinaria cifra de más de 100 citas (3 %), y aquellos con más de 10 citas representan el 41 % del total de artículos publicados, mientras que menos de la cuarta parte no ha recibido citas, siendo estos mayormente artículos

publicados en memorias de eventos, con escasa visibilidad [7]. De este modo, el 76 % de los artículos publicados en el IMRE han recibido al menos una cita, confirmando el impacto y calidad de nuestra producción científica. Al cierre de 2024, el IMRE, colectivamente tenía un índice h de 80, un índice i10 de 697 y un factor de impacto de 2,2 [7].



Figura 5. Número de citas recibidas por artículos publicados por el IMRE en 1985-2024.

VI.2. Libros

Otra forma de publicación donde se ha destacado el IMRE ha sido en los libros. Si bien no se cuenta con datos anteriores a 1999, entre ese año y 2024 han sido publicados 60 libros y capítulos de libros, cuya producción anual se aprecia en la Figura 6 [19].

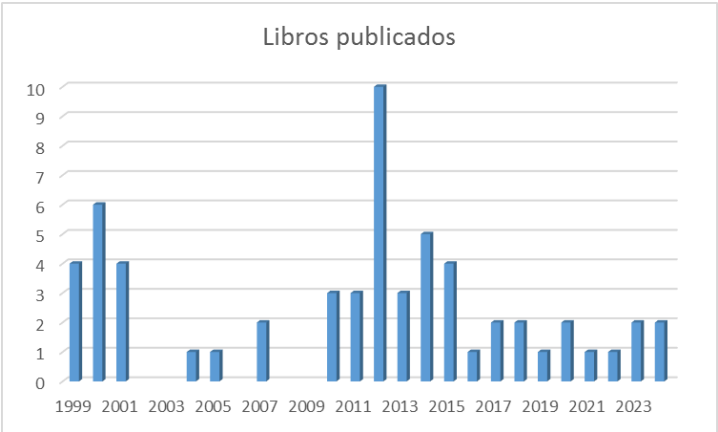


Figura 6. Publicación de libros por el IMRE en 1999-2024.

La gráfica muestra cómo desde la fecha inicial de análisis, en la mayoría de los años se han publicado libros y capítulos de libros, estabilizándose desde 2016 su número en 1-2 libros o capítulos por año. Entre las editoriales donde han sido publicados nuestros libros o capítulos, se encuentran algunas de las más importantes editoriales de literatura científica del mundo, como Springer [1, 20], Elsevier [21], Reverté [22], y

CRC [23,24], y entre las nacionales, las editoriales Pueblo y Educación [25], UH [26–28], y Academia [29].

VI.3. Participación en eventos científicos

Uno de los aspectos más destacados de la producción científica del IMRE es el alto número de trabajos que se presentan anualmente en eventos científicos nacionales e internacionales, ya sea como conferencias magistrales o invitadas, presentaciones orales, o carteles. Entre 1999 y 2024 se contabilizan 3 200 trabajos en eventos científicos, de ellos 1 802 en eventos de carácter internacional, tanto en Cuba como en el extranjero, para un promedio anual de 133 y 75 respectivamente [19].

VI.4. Patentes, registros y normas

El IMRE también ha obtenido importantes resultados en la actividad de patentes, registros y normas. Entre 1999 y 2024 se han solicitado 79 patentes, registros y normas, y se nos han concedido 40 de ellos. Entre estos se destacan: los registros en Cuba y Canadá de la marca “Nerea”; el registro sanitario del equipo médico “FOTOTER”; las patentes: “Procedimiento para la obtención de sustratos y fertilizantes zeolíticos de liberación controlada y métodos de tratamiento de las plantas”, “Mezcla transductora epoxi-grafito para sensores electroquímicos aplicados a ensayos de afinidad”, “Cavidad para dispositivo láser de limpieza”, “Procedimiento para el tratamiento del agua residual de la destilación del licor producto de la lixiviación amoniacal de las lateritas”, “Método de lixiviación amoniacal de lateritas con activación mecánica”, “Composición formadora de película para protección contra corrosión”, “Método y aparato para el crecimiento de capas semiconductoras muy finas en régimen de epitaxia a capas atómicas”; y la norma “Zeolitas Naturales – Requisitos” [19]. Queremos destacar que los productos zeolíticos derivados de las patentes aquí mencionadas se encuentran introducidos en la agricultura de nuestro país y han sido incluso exportados [19].

El comportamiento de las patentes, registros y normas en el período analizado se muestra en la Figura 7 [19].

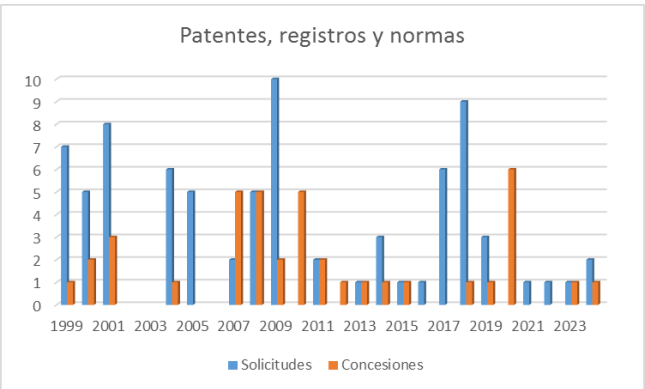


Figura 7. Patentes, registros y normas solicitados por y concedidos al IMRE en el período 1999-2024.

VI.5. Desarrollo de equipamiento científico

El IMRE también se ha destacado en el desarrollo de equipamiento científico. El equipo para terapia luminosa “FOTOTER” tiene registro sanitario y ha sido introducido en nuestro sistema de salud pública.

Se han construido láseres, así como equipos basados en éstos como el espectroscopio de plasma inducido por láser (LIBS) [30,31] y el dispersómetro láser (ALS) [32], ambos empleados en el IMRE, la desespinadora láser [33], y el microscopio de barrido por efecto túnel (STM), con el que se obtuvieron las primeras imágenes de resolución atómica en nuestro país [34,35].

VI.6. Premios

La calidad y novedad de los resultados científicos del IMRE está avalada por el alto número de premios recibidos. Solamente entre 1999 y 2024 se han recibido 394 premios, de ellos 73 Premios Nacionales de Investigación de la Academia de Ciencias de Cuba, 129 premios de la Universidad de La Habana, 10 premios del MES, 29 premios en los diferentes niveles del Foro de Ciencia y Técnica, 9 premios CITMA y 13 premios internacionales, entre los que se destacan 3 premios Sofia Kovalevskaya, el premio de la Academia de Ciencias del Tercer Mundo para las Mujeres en Ciencias (TWOWS) y la categoría de Centro STAR de la Alianza Solar Internacional concedida Laboratorio de Fotovoltaica [19]. Miembros del claustro y adjuntos del IMRE han recibido los Premios Nacionales de Física y Química.

El comportamiento anual del total de premios recibidos por el IMRE en 1999-2024 se muestra en la Figura 8 [19].

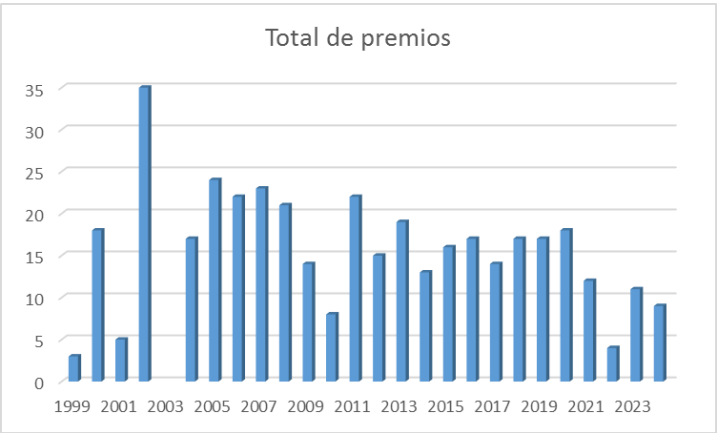


Figura 8. Premios recibidos por el IMRE en 1999-2024.

VII. CONCLUSIONES

Hoy en día el IMRE confronta, como muchas instituciones del país, dificultades para adquirir equipamiento e insumos. A las trabas del bloqueo, se le suman las propias dificultades generadas por el burocratismo interno y la deficiente gestión

económica, todo lo cual en muchas ocasiones paraliza la ejecución de proyectos, a lo que se suma el continuo deterioro de buena parte del ya obsoleto equipamiento.

No obstante, en estos años, la inventiva de los investigadores, especialistas y técnicos se ha puesto a prueba, rescatando para su uso muchos viejos equipos y creando otros nuevos “frankensteins” a partir de viejos equipos. En esto destacaremos que varios investigadores de diferentes laboratorios han adquirido de forma autodidacta experiencia en la automatización de equipos utilizando las más modernas técnicas, que han logrado aplicar a los viejos equipos, como, por ejemplo, el uso de la instrumentación virtual en la automatización. La realización de investigaciones conjuntas con instituciones extranjeras, especialmente europeas y latinoamericanas, ha permitido financiar varias investigaciones mutuamente beneficiosas y poder, mediante donaciones o financiamiento de proyectos internacionales adquirir equipos, reactivos y resolver algunas otras necesidades.

La excelencia del claustro del IMRE es avalada por sus resultados investigativos, que superan a los obtenidos por centros del país que disponen incluso de mejor y más moderno equipamiento, o mejor financiación. Con los resultados aquí presentados, el IMRE arriba a su XL aniversario, con la vista en continuar superando lo alcanzado y continuar aportando al conocimiento científico y a la solución de los problemas de nuestro país.

REFERENCIAS

- [1] A. Baracca, J. Renn, and H. Wendt (eds.), *The History of Physics in Cuba* (Springer, Dordrecht, 2014).
- [2] C. Rodríguez, *El IMRE en su XV aniversario* (La Habana, 2000).
- [3] C. Rodríguez, *El IMRE veinte años después* (La Habana, 2005).
- [4] R. de Armas, E. Torres-Cuevas, and A. Cairo Ballester, *Historia de la Universidad de La Habana* (Editorial de Ciencias Sociales, La Habana, 1984).
- [5] J. G. Bednorz and K. A. Müller, *Z. Phys. B* **64**, 189 (1986).
- [6] M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. J. Torng, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, Y. Q. Wang, and C. W. Chu, *Phys. Rev. Lett.* **58**, 908 (1987).
- [7] Información compilada mediante Google Académico. Consultado el 1 de abril de 2025.
- [8] E. Ramírez-Miquet and E. Altshuler, *Rev. Cub. Fis.* **40**, 59 (2023).
- [9] E. Altshuler and T. H. Johansen, *Rev. Mod. Phys.* **76**, 471 (2004).
- [10] O. Almora, D. Baran, G. C. Bazan, C. Berger, C. I. Cabrera, K. R. Catchpole, S. Erten-Ela, F. Guo, J. Hauch, A. W. Y. Ho-Baillie, T. J. Jacobsson, R. A. J. Janssen, T. Kirchartz, N. Kopidakis, Y. Li, M. A. Loi, R. R. Lunt, X. Mathew, M. D. McGehee, J. Min, D. B. Mitzi, M. K. Nazeeruddin, J. Nelson, A. F. Nogueira, U. W. Paetzold, N.-G. Park, B. P. Rand, U. Rau, H. J. Snaith, E. Unger, L. Vaillant-Roca, H.-L. Yip, and C. J. Brabec, *Adv. Energy Mater.* **11**, 2002774 (2021).
- [11] O. Almora, D. Baran, G. C. Bazan, C. Berger, C. I. Cabrera, K. R. Catchpole, S. Erten-Ela, F. Guo, J. Hauch, A. W. Y. Ho-Baillie, T. J. Jacobsson, R. A. J. Janssen, T. Kirchartz, N. Kopidakis, Y. Li, M. A. Loi, R. R. Lunt, X. Mathew, M. D. McGehee, J. Min, D. B. Mitzi, M. K. Nazeeruddin, J. Nelson, A. F. Nogueira, U. W. Paetzold, N.-G. Park, B. P. Rand, U. Rau, H. J. Snaith, E. Unger, L. Vaillant-Roca, H.-L. Yip, and C. J. Brabec, *Adv. Energy Mater.* **11**, 2102526 (2021).
- [12] O. Almora, D. Baran, G. C. Bazan, C. Berger, C. I. Cabrera, S. Erten-Ela, K. Forberich, F. Guo, J. Hauch, A. W. Y. Ho-Baillie, T. J. Jacobsson, R. A. J. Janssen, T. Kirchartz, N. Kopidakis, M. A. Loi, R. R. Lunt, X. Mathew, M. D. McGehee, J. Min, D. B. Mitzi, M. K. Nazeeruddin, J. Nelson, A. F. Nogueira, U. W. Paetzold, B. P. Rand, U. Rau, H. J. Snaith, E. Unger, L. Vaillant-Roca, C. Yang, H.-L. Yip, and C. J. Brabec, *Adv. Energy Mater.* **13**, 2203313 (2023).
- [13] O. Almora, C. I. Cabrera, S. Erten-Ela, K. Forberich, K. Fukuda, F. Guo, J. Hauch, A. W. Y. Ho-Baillie, T. J. Jacobsson, R. A. J. Janssen, T. Kirchartz, M. A. Loi, X. Mathew, D. B. Mitzi, M. K. Nazeeruddin, U. W. Paetzold, B. P. Rand, U. Rau, T. Someya, E. Unger, L. Vaillant-Roca, and C. J. Brabec, *Adv. Energy Mater.* **14**, 2303173 (2024).
- [14] L. Zhao, J. Duan, L. Liu, J. Wang, Y. Duan, L. Vaillant-Roca, X. Yang, and Q. Tang, *Nano Energy* **82**, 105773 (2021).
- [15] J. Yuan, X. Yang, D. Zheng, J. Guo, W. Lin, J. Liao, Y. Wang, L. Vaillant-Roca, J. Duan, and Q. Tang, *Nano Energy* **110**, 108341 (2023).
- [16] O. Arias de Fuentes, T. Ferri, M. Frasconi, V. Paolini, and R. Santucci, *Angew. Chem. Int. Ed.* **50**, 3457 (2011).
- [17] C. L. I. M. White, A. R. Ruiz-Salvador, and D. W. Lewis, *Angew. Chem. Int. Ed.* **43**, 469 (2004).
- [18] T. Ferri, D. Frasca, O. Arias de Fuentes, R. Santucci, and M. Frasconi, *Angew. Chem. Int. Ed.* **50**, 7074 (2011).
- [19] IMRE-UH, *Balances Anuales de Investigación* (La Habana, 1999-2024).
- [20] O. V. Kharisova, L. M. Torres-Martínez, and B. I. Kharisov (eds.), *Handbook of Nanomaterials and Nanocomposites for Energy and Environmental Applications* (Springer, Cham, 2020).
- [21] G. Doxastakis and V. Kiosseoglou (eds.), *Novel Macromolecules in Food Systems* (Elsevier, Amsterdam, 2000).
- [22] L. Leija (coord.), *Métodos de procesamiento avanzado e inteligencia artificial en sistemas sensores y biosensores* (Editorial Reverté, Barcelona, 2009).
- [23] D. E. Reisner and T. Pradeep (eds.), *Aquano technology: Global Prospects* (CRC Press, Boca Raton, 2015).
- [24] P. Prokopovich (ed.), *Biological and Pharmaceutical Applications of Nanomaterials* (CRC Press, Boca Raton, 2016).
- [25] P. Y. Reyes (coord.), *Fundamentos de la Metrología* (Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 2012).

- [26] E. Pedrero González and F. C. Zawislak, *Cien años de colisiones nucleares* (Editorial UH, La Habana, 2011).
- [27] M. A. Chávez Planes, J. Díaz Brito, and O. Arias de Fuentes (coords.), *Nano-micro-biotecnologías y sus aplicaciones* (Editorial UH, La Habana, 2019).
- [28] G. Dutrénit and J. Núñez Jover (coords.), *Vinculación universidad-sector productivo para fortalecer los sistemas nacionales de innovación: experiencias de Cuba, México y Costa Rica* (Editorial UH, La Habana, 2017).
- [29] E. Pedrero González, *¿De qué están hechas las cosas?* (Editorial Academia, La Habana, 2019).
- [30] L. Moreira Osorio, L. V. Ponce Cabrera, M. A. Arronte García, T. Flores Reyes, and I. Ravelo, J. Phys.: Conf. Series **274**, 012093 (2011).
- [31] L. Moreira, L. Ponce, C. Valdés, F. Corvo, M. Arronte, E. de Posada, Y. Pérez, T. Flores, I. Ravelo, O. Cruzata, B. Lambert, J. L. Cabrera, A. Borges, A. Ponce, and L. C. Hernández, Rev. Cub. Fis. **28**, 87 (2011).
- [32] Y. Pérez-Moret, J. A. Martínez, M. P. Hernández, J. O. Abad, R. Sis, E. Lo Gioudice, H. Yee-Madeira, and J. A. Díaz-Góngora, Proc. SPIE **8011**, 801104 (2011).
- [33] L. Ponce, M. Arronte, E. de Posada, and T. Flores, Ind. Laser Solut. Manuf. **24**, 6 (2009).
- [34] J. A. Martínez, J. Valenzuela, M. P. Hernández, and J. Herrera, Rev. Mex. Fis. **62**, 45 (2016).
- [35] M. P. Hernández and J. A. Martínez, Rev. Cub. Fis. **42**, 67 (2025).

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) license.



OLIMPISMOS CUBANOS EN 2025



Olimpismo físico cubano en 2025. Panel izquierdo: Inauguración de la Olimpiada Científica Internacional de Física (Rusia, 2025) ; nótese el equipo cubano abajo, cerca del centro. Panel derecho: fila delantera: José Ángel Machín, Roimer Capote, Rosmary Fernández; detrás: Sergio Daneel Santiesteban y Leiniel Valdés.

Entre el 27 de junio y el 7 de julio, un equipo de estudiantes cubanos conformado por Roimer Capote Brizuela y Sergio Daneel Santiesteban Sarmiento participaron en la Olimpiada Científica Internacional de Física (ISPhO), organizada por el Instituto de Física y Tecnología de Moscú (MIPT) que tuvo lugar en la ciudad de Kanthy-Mansyisk, Rusia. Estos muchachos siguieron camino posteriormente para la Ciudad de París, donde, entre el 17 y el 25 de Julio tuvo lugar la Olimpiada Internacional de Física (IPhO) 2025. Previo a ello, entre el 8 y el 16 de julio habían participado del entrenamiento experimental que ofrece el MIPT a los participantes de su olimpiada, que seguirán camino a la IPhO en las instalaciones de ese Instituto.

Los resultados para Cuba fueron este año significativos. En la ISPhO ya se había participado el pasado año de forma online, pero por primera vez ahora los cubanos teníamos conocimientos y experiencia directa de lo que ocurre en la sede del evento y se participaba del ejercicio experimental de esa olimpiada. Dos terceros premios en la competencia especial de Teoría y Modelación de la ISPhO (Roimer y Sergio Daneel) constituyen un importante resultado para la que es, por mucho, dado su carácter único, la Olimpiada más compleja. Su corte científico acerca a los muchachos a este

tipo de actividad tanto en lo teórico como lo experimental, exigiendo habilidades propias de quien se inicia en la Física como investigador.

En la IPhO 2026, en París, Sergio logró una *Mención Honorífica* después de 6 años sin que Cuba lograra resultado alguno en la competencia más prestigiosa del planeta en su tipo: Roimer quedó a menos de un punto de lograr medalla. El entrenamiento para estas competencias inició el 3 de marzo en las aulas y laboratorios de la Facultad de Física de la Universidad de la Habana, y contó con la colaboración de no pocos profesores de la Facultad. Del entrenamiento participaron también los estudiantes Rosmary Fernández (IPVCE *Vladimir Ilich Lenin* de La Habana) que logró una medalla de Plata en la Olimpiada centroamericana y del Caribe que tuvo lugar en República Dominicana, Leiniel Valdés (IPVCE *Ernesto Guevara* de Villa Clara), y José Angel Machín (IPVCE *Antonio Maceo Grajales* de Santiago de Cuba) que habían logrado medalla de Bronce en la misma olimpiada. El mismo equipo había participado en marzo en la Olimpiada Mesoamericana organizada por el Instituto de Física Teórica de Méjico, en la que todos los muchachos lograron *Mención Honorífica*, mientras que Sergio logró una medalla de Oro.

Dr. Saúl Larramendi Valdés

Facultad de Física, Universidad de La Habana

III WORKSHOP MAINSTREAMING GENDER TOPICS IN STEM

Los días 27 y 28 de noviembre celebramos la tercera edición del Workshop Mainstreaming Gender Topics in STEM, un espacio que desde 2023 coincide con la jornada internacional por la eliminación de la violencia contra la mujer.

Este taller forma parte de un proyecto conjunto entre la Universidad Goethe de Frankfurt y el ICIMAF, con el apoyo de la DAAD. También fue auspiciado por la Sección de Mujeres de la Sociedad Cubana de Física y el Capítulo Nacional de la OWSD. Esta edición contó con 35 participantes presenciales y alrededor de 10 en modalidad online, además de cuatro conferencias virtuales que aportaron una visión internacional con líderes científicas de España, Argentina, África y la India.

Las conferencistas nos llevaron por un recorrido diverso a través de las ciencias. Grisell Almagro (Cuba–Bermudas), del ICIMAF y el Bermuda College, y Angela Taibari, del African Institute for Mathematical Sciences (Ghana), compartieron sus historias de vida y su pasión por las matemáticas. En el caso de Angela, esa pasión la llevó a fundar una ONG en su país para promover la enseñanza de esta disciplina.

La física experimental María Teresa Dova, de la Universidad de La Plata y Premio L'Oréal 2025, explicó magistralmente para un público amplio los nuevos desafíos del experimento ATLAS del LHC–CERN. Destacó cómo el CERN, pionero en el desarrollo de tecnologías de frontera, lleva más de 13 años incorporando técnicas de machine learning e inteligencia artificial en el manejo de datos. Con ella reflexionamos sobre la vivencia única que constituye un experimento donde conviven 3000 personas de credos, nacionalidades, culturas, razas e ideologías diversas.

María Jesús López, de la Universidad de La Coruña y jefa del Grupo de Mujeres de la Real Academia de Física de España, presentó un análisis de los obstáculos universales que enfrentan las físicas, apoyada en una encuesta realizada por la APS.

La etóloga Anindita Bhadra, del Indian Institute for Science

Education and Research, relató su empeño en equilibrar su carrera científica y su vida familiar, así como sus investigaciones sobre los perros de vida libre en la India, y su propio camino de lucha para lograr que este tema fuera reconocido como investigación científica legítima.

También dedicamos una hora al documental sobre el caso de Giselle Pelicot, que invita a reflexionar sobre cómo la violencia en el ámbito privado puede ser especialmente sórdida. La sensibilidad de un guardia de seguridad fue clave para sacar a la luz este drama, y la valentía de Giselle al exigir un juicio público transformó la vergüenza de la víctima en la de los victimarios. La actriz y terapeuta Eva González, española de nacimiento y cubana de corazón, de Irreverencia Producciones, nos ofreció un espacio de terapia dramática magistral y único, enfocado en fortalecer la autoconfianza y promover ambientes de respeto. De la mano de las médicas Sara Gilda Argudín (Hospital Amejeras) y Amalia Peix (Instituto de Cardiología y Cirugía Cardiovascular), aprendimos sobre la complejidad de nuestros cuerpos y mentes, y cómo las mujeres enfrentan mayores riesgos biológicos de enfermedades cardíacas y mentales, incluso desde edades tempranas.

Las investigadoras Bárbara Benítez y Omaira Marrero Chapman mostraron cómo las ciencias agrarias en Cuba están incorporando el enfoque de género en sus proyectos.

No menos relevante fue la presencia de Mayda Álvarez, directora del Instituto de Investigaciones de la Mujer de la FMC, quien presentó el Observatorio de Violencia de Género creado en el país, disponible en <https://www.genero.onei.gob.cu>.

Fue un evento donde hubo grandes debates y un espíritu enriquecedor y multiplicador, que nos unió y reforzó en la lucha por sociedades más justas, donde la visión femenina en las ciencias sea cada vez más visible, reconocida y capaz de contribuir a desmontar el mundo patriarcal en el que aún vivimos.

Dra. Aurora Pérez Martínez

Instituto de Cibernética Matemática y Física (ICIMAF)

LV ANIVERSARIO DE LA PRIMERA GRADUACIÓN DE FÍSICOS EN LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE

En marzo de 1970 se funda la Escuela de Física de la Universidad de Oriente (UO), celebrándose en la tarde del martes 8 de diciembre del mismo año en su emblemático e histórico Teatro Universitario el acto de graduación de sus primeros y únicos 17 Ingenieros Físicos; cumpliéndose en este año 2025 el LV aniversario de ambos hechos.

Desde antes del inicio de la carrera de Física en la UO, ya profesores fundadores de la misma publicaban los textos de los cursos que impartían a los estudiantes de las carreras de Ingeniería y esta tradición se ha mantenido por los primeros graduados de dicha carrera, incluyéndose además diversos materiales de información científica y/o de la ciencia.

La primera publicación se realiza en 1980 por el Ingeniero Pedro Houruitinier Silva, titulado *Curso de Mecánica*, en ese mismo año la ya Candidata a Doctor Margarita Cobas Aranda publica un resumen de su Tesis, que tituló *Métodos de determinación de oro en Minerales*.

Luis Manuel Méndez-Pérez
Universidad de Oriente

En los años desde el 1980 hasta el año 2022, esos primeros graduados, como autores o coautores han publicado 22 libros de textos o de divulgación, siendo el último el libro digital *Esquicio histórico de la Física. Conferencias conmemorativas* de Luis M. Méndez Pérez, que constituye un compendio de conferencias dictadas en fechas conmemorativas de hechos trascendentales en la historia de la Física. Se incluye entre esas 22 obras el capítulo *La Física en la Universidad de Oriente* de Luis M. Méndez Pérez y Carlos A. Cabal Mirabal publicado en el libro on line *Historia de la física en Cuba (siglo XX)* en el MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR WISSENSCHAFTSGESCHICHTE Max Planck Institute for the History of Science.

Estas obras han servido para divulgar la Física en sentido general y en particular formar más de 465 Físicos en los 55 años de la Escuela de Licenciatura en Física de la UO en las provincias orientales del país.

FÍSICA DE LOS HADRONES EN CUBA



La doctora Katherine Shtejer-Díaz (CEADEN) se dirige a la audiencia de la Escuela "Hadron structure and hadronic matter physics"(Hotel Capri, La Habana, 1-5 de diciembre de 2025).

Entre el 1 y el 5 de diciembre de 2025 sesionó, en el Hotel Capri, de La Habana, la Escuela structure and hadronic matter physics" entre el Instituto Unificado de Investigaciones Nucleares (IUIIN) e instituciones cubanas. El evento tuvo lugar en el contexto del aniversario 50 de la incorporación de Cuba

como estado miembro al IUIIN, de Dubna, Rusia. El objetivo básico consistió en informar sobre el estado contemporáneo de la Física de las altas energías, con énfasis en las colisiones de iones pesados y hadrones, así como ofrecer una visión de los tópicos de investigación del colisionador NICA en el JINR.

CITMA, Cuba

FEDERICO GARCÍA-MOLINER (4 DE MARZO DE 1930-14 DE AGOSTO DE 2025)



Federico García-Moliner (a la izquierda) recibiendo el doctorado *Honoris Causa* de la Universidad de La Habana, el 8 de diciembre de 1994.

Después de una larga y muy fructífera vida, el pasado 14 de agosto falleció el profesor Federico García Moliner, uno de los amigos que más ha hecho por el desarrollo de la física en Cuba.

Había nacido el 4 de marzo de 1930 en Burriana (Valencia, España). Destacó como alumnos de bachillerato en el Instituto “Francesc Ribalta de Castellón de la Plana”: años más tarde sería seleccionado como el mejor estudiante de esa institución en sus más de cien años de existencia. En 1954 se licenció en Física por la Universidad Complutense de Madrid, trasladándose posteriormente a Cambridge (Inglaterra) para realizar estudios de doctorado, supervisado por el célebre físico John Ziman. Allí conoció a otra investigadora española, la viróloga Carmen Gil Fernández, con quien se casó en abril de 1959. Tuvieron tres hijos.

Se doctoró en Ciencias (Ph.D.) por la Universidad de Cambridge en 1958. Tras su regreso a España en 1959 se integró al Instituto de Física “Alonso de Santa Cruz” del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Allí coincidió con Frederick Seitz, que visitaba en esa época dicho instituto, y en 1961 se trasladó para trabajar con él en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, donde permaneció más de tres años. Tras ello, se reincorporó al CSIC, desde donde desarrolló una ardua, amplia y pionera labor creando grupos de investigación en física del estado sólido. En este sentido es destacable su incorporación al proyecto del profesor Nicolás Cabrera para crear un grupo de investigación en física de la materia condensada en la Universidad Autónoma de Madrid, en un momento en el que las ciencias físicas estaban muy poco desarrolladas en España. Federico realizó importantes contribuciones a la física teórica de la materia condensada, en particular a las propiedades electrónicas de superficies e interfaces, así como a las propiedades dinámicas de las mismas. Desarrolló el Método de Funciones de Green Superficiales (SGFM en inglés) para el estudio de excitaciones elementales en superficies. Fue autor de cinco libros de carácter científico y de numerosas publicaciones en revistas

de prestigio. Tres de estos libros y varias decenas de artículos se publicaron con la co-autoría de físicos cubanos. Entre las muchas responsabilidades que desempeñó el profesor García Moliner, cabe destacar la vicepresidencia de la Unión Internacional de Física Pura y Aplicada (IUPAP). A instancias suyas se creó el Comité Cubano de la IUPAP.

Fue Fundador del Comité de Materia Condensada del Centro Internacional de Física Teórica Abdus Salam (ICTP), desde donde jugó un papel crucial en las actividades dirigidas a los países en vías de desarrollo. Es de destacar también la presidencia de la Asociación Cultural Hispanoamericana en Madrid. Desde estas responsabilidades, incentivó el desarrollo científico en España, así como en diversos países de África, Asia, Europa y América Latina, teniendo particular impacto en los jóvenes científicos de estos países. Estimuló el desarrollo del convenio entre la Facultad de Física de la Universidad de La Habana y el ICTP, y se concretaron varias acciones de colaboración.

Fue también Miembro de Consejos Editoriales de varias de las revistas científicas más importantes relevante de su campo. Federico tuvo una amplia lista de colaboraciones y relaciones profesionales dentro y fuera de España. Fue nombrado Doctor Honoris Causa por las Universidades de Lille en Francia y de La Habana en Cuba. Asimismo, fue nombrado Visitante Ilustre de la Ciudad de Santiago de Cuba por su labor efectiva y desinteresada en el desarrollo de varias instituciones científicas de dicha ciudad del oriente de Cuba. Fue Honorary Fellow del Fitzwilliam College de la Universidad de Cambridge y miembro fundador del Cambridge European Trust de dicha universidad. Entre sus múltiples distinciones y premios sobresalen el Premio Príncipe de Asturias de Investigación Científica y Técnica en 1992 y la medalla de la Real Sociedad Española de Física, de la que fue socio de honor.

Realizó una decena de estancias en Cuba y recibió a muchos cubanos en su grupo de Madrid primero, y en Castellón después. Un episodio que mide su actitud hacia nuestro país fue cuando España limitó seriamente su colaboración con Cuba por temas políticos en 1995 y 1996. Federico se dirigió al entonces Ministro de Relaciones Exteriores español, haciéndole notar las pérdidas que tenía España como consecuencia de tales políticas.

Pero su actividad profesional no se limitó a la Física. Se puede mencionar que además de sus contribuciones científicas, escribió el libro “La Ciencia Descolocada”, y su destacadísima membresía en el movimiento PUGWASH por la Paz. Sus reflexiones sobre las patologías de la comunidad científica y, particularmente, los problemas de orden ético que se dan en la profesión constituyen joyas de autorreflexión para la comunidad científica. A su capacidad de trabajo, nivel científico y maestría docente, Federico unió una sensibilidad

exquisita por todo lo humano, cualidad que está muy lejos de significar complacencia fatua ante los problemas ajenos, o triunfalismo ante los éxitos. Todo lo contrario, sus relaciones humanas se basaron en la búsqueda incesante y estímulo de la virtud.

Con su muerte, la comunidad científica y la sociedad han perdido a una persona brillante cuya huella perdurará en las varias instituciones que ayudó a crear y/o desarrollarse, así como en sus alumnos y compañeros –especialmente cubanos–

que disfrutamos de su presencia, siempre estimulante y amistosa.

Rolando Pérez-Álvarez

*Centro de Investigación en Ciencias
Universidad Autónoma del Estado de Morelos
México*

Carlos Trallero-Giner

*Universidade Federal de São Carlos
São Carlos, São Paulo, Brasil*

IRMA GLADYS GONZÁLEZ-CARMENATE (16 DE JUNIO DE 1945 - 14 DE JULIO DE 2025)



Irma (al centro) durante un encuentro de exalumnos del "Cepero Bonilla" en la casa de la FEU de la UH, en 2025.

Nuestra querida profesora nació en la región oriental de Cuba, y se trasladó a La Habana desde los tempranos años 1960's para estudiar en el Instituto Preuniversitario "Saúl Cepero-Bonilla", de donde se graduó como Bachiller en Ciencias y Letras.

A continuación, pasó a estudiar la carrera de licenciatura en

Física en 1965. Al terminar allí sus estudios, es ubicada en la Universidad Central de las Villas "Marta Abreu".

Años más tarde, pasa a trabajar al Departamento de Física Aplicada de la Facultad de Física de la Universidad de La Habana, hasta su jubilación. Allí impartió, durante varias décadas, docencia de Física General fundamentalmente para facultades del servicio exterior de la Facultad de Física. A lo largo de su carrera, tuvo a su cargo todas las modalidades de la docencia –conferencias, clases prácticas y laboratorios, aunque desarrolló un especial interés por esos últimos. Fue una entusiasta de los llamados "laboratorios virtuales" –o sea, de la realización de prácticas docentes desde la computadora, ante la carencia o deterioro del instrumental real de laboratorio.

Primero como estudiante y después como investigadora y profesora, fue una persona callada, tranquila y sosegada. Una gran compañera y amiga. Asimismo, era laboriosa y observadora de todos los detalles en cuanto actividad académica y laboral se le asignaba. También participó, con buen desempeño, como dirigente sindical en varias etapas y diferentes cargos.

Félix Martínez-Oliva
Facultad de Física
Universidad de La Habana
La Habana, Cuba

