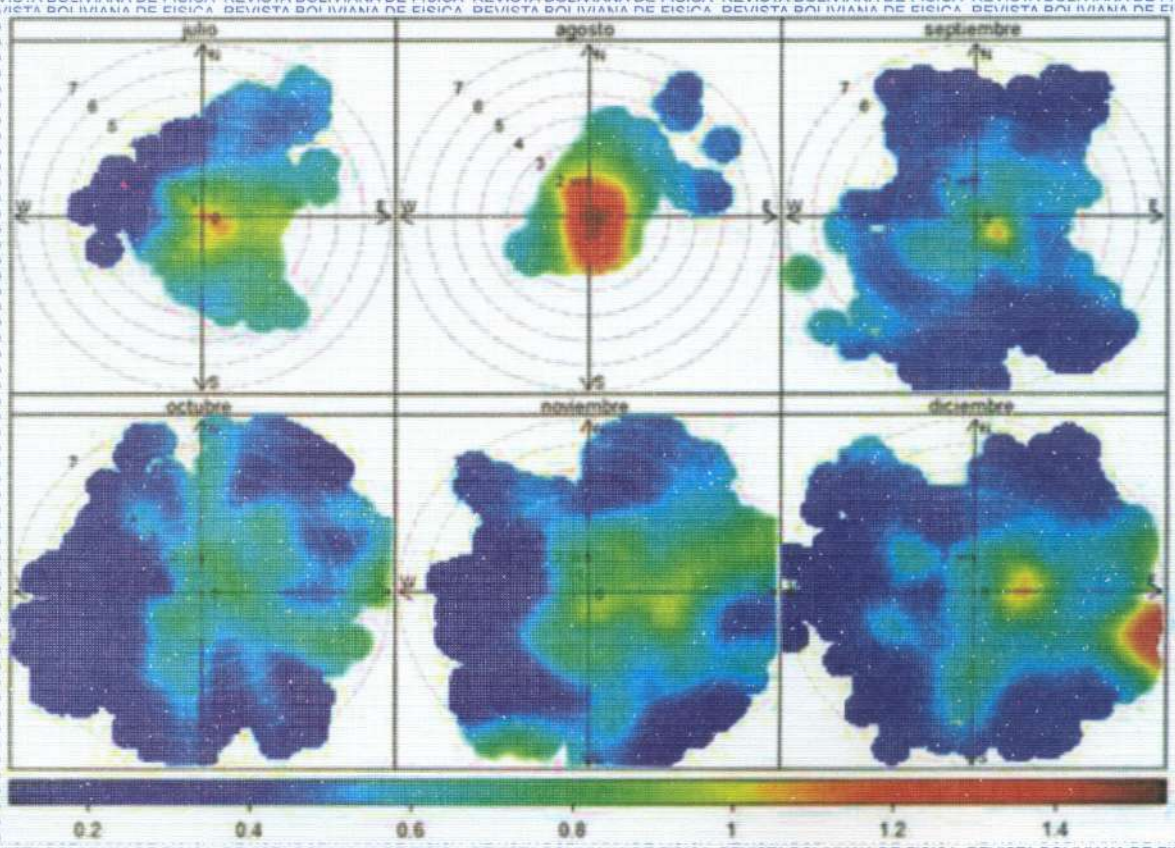


ISSN - 1562 - 3823

# REVISTA BOLIVIANA DE FÍSICA

NÚMERO 30

NOVIEMBRE 2017 • LA PAZ - BOLIVIA



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES FÍSICAS  
CARRERA DE FÍSICA - UMSA

SOCIEDAD BOLIVIANA DE FÍSICA

---

**REVISTA BOLIVIANA DE FÍSICA**

**Ésta es una revista de la Unión Iberoamericana de Sociedades de Física**

**COMITÉ EDITORIAL**

**Sociedad Boliviana de Física**

**Dr. Diego Sanjinés Castedo**

Email: sanjines@fiumsa.edu.bo

**Instituto de Investigaciones Físicas**

**Lic. Alfonso Velarde Chávez**

Email: avelarde@fiumsa.edu.bo

**Dr. Flavio Ghezzi Moris**

Email: fghezzi@fiumsa.edu.bo

**Carrera de Física**

**Dr. Armando R. Ticona Bustillos**

Email: aticona@fiumsa.edu.bo

Casilla 8635, La Paz – Bolivia. Tel.: (591-2) 2792999, Fax: (591-2) 2792622

---

**CONSEJO EDITORIAL**

**Dr. Oscar Antonio Rondón**

Institute of Nuclear and Particle Physics

University of Virginia

McCormick Road, Charlottesville, VA 22901

804 924-6787, USA

Email: or@virginia.edu

**Dr. Carlos Navia**

Instituto de Física

Universidade Federal Fluminense

Av. Gen. Milton Tavares de Souza

24210-340, Niterói, RJ-Brasil

Email: gfcnoj@if.uff.br

**Dr. Jason Alfredo Carlson Gallas**

Departamento de Física

Universidade Federal da Paraíba

58051-970, João Pessoa

Brasil

Email: jgallas@fisica.ufpb.br

**Dr. Nuno Miguel Melo Crokidakis Peregrino**

Instituto de Física

Universidade Federal Fluminense

Av. Gen. Milton Tavares de Souza

24210-340, Niterói, RJ-Brasil

Email: nuno@if.uff.br

**Dr. Jorge Luiz Fernandes de Oliveira**

Instituto de Geociências

Universidade Federal Fluminense

Campus Praia Vermelha

Av. Gen. Milton Tavares de Souza

24210-346, Niterói, RJ-Brasil

Email: jolufo@vm.uff.br

---

ISSN 1562-3823



# Revista Boliviana de Física

PUBLICACIÓN DE  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES FÍSICAS  
CARRERA DE FÍSICA  
UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
Y  
SOCIEDAD BOLIVIANA DE FÍSICA

NÚMERO 30  
NOVIEMBRE DE 2017

## **Revista Boliviana de Física**

**ISSN 1562-3823**

**Indexada en: SciELO, Latindex, Periódica**

<http://www.scielo.org.bo>

<http://www.latindex.unam.mx>

Publicación del Instituto de Investigaciones Físicas, la Carrera de Física de la Universidad Mayor de San Andrés y de la Sociedad Boliviana de Física.  
Casilla 8635, La Paz, Bolivia.

*Diseño:* A. Ticona

*Dirección:* Carrera de Física, Campus Universitario, Calle 27, Cota Cota, La Paz.

Tel: (591 2) 2792999; FAX: (591 2) 2792622.

*Portada:* Diagrama polar de la variación mensual de la concentración de Carbono Negro medida desde el observatorio de Huancayo - Perú.

*Formato*  $\LaTeX 2_{\epsilon}$ . *Tipo de fuente utilizada:* newcentury

IMPRESO EN BOLIVIA — PRINTED IN BOLIVIA

## CONTENIDO

EDITORIAL	<i>Editor</i>	1
-----------	---------------	---

### A. ARTÍCULOS

SINCRONIZACIÓN DE NEURONAS MODELADAS POR MAPAS Y CARACTERIZADAS POR PERIODICIDADES		
<i>Ignacio Calderon de la Barca &amp; Gonzalo Marcelo Ramírez-Ávila</i>		3

MEDICIÓN Y ANÁLISIS DEL AEROSOL DE CARBONO NEGRO EN EL OBSERVATORIO DE HUANCAYO, PERÚ		
<i>Luis Suarez, Christian Torres, Detlev Helmig &amp; Jacques Hueber</i>		9

INTERACCIONES EFECTIVAS DE LARGO ALCANCE EN UNA RED EN LA APROXIMACIÓN SEMICLÁSICA		
<i>Evaristo Mamani, M. Calcina-Nogales &amp; Diego Sanjinés</i>		18

### D. ENSEÑANZA DE LA FÍSICA

ESTADO Y TENDENCIA DE LA EDUCACIÓN NUCLEAR EN EL ESTADO PLURINACIONAL DE BOLIVIA	<i>Bustos R. et al.</i>	31
--	-------------------------	----

### E. HISTORIA

EL CAOS Y SU TRASCENDENCIA: ENTREVISTA CON JAMES YORKE	<i>Gonzalo Marcelo Ramírez-Ávila</i>	57
--	--------------------------------------	----



## EDITORIAL

El Comité Editorial de La Revista Boliviana de Física (RBF), después de un análisis de la situación actual de la RBF, ha decidido darle una nueva tónica a la misma. Lo anterior implica entre otras cosas, el adecuarse a los requerimientos de SciELO Bolivia, tanto en aspectos relacionados a la forma que deben presentar los artículos que deben incluir una nota con respecto al conflicto de intereses, como a los plazos exigidos para las publicaciones. Por otra parte, dentro del contenido de la RBF, a partir de este número, se incluirá una nota editorial tanto en castellano como en inglés, la cual reflejará principalmente el contenido del número correspondiente y eventualmente nuestra opinión acerca de temas científicos de actualidad e interés tanto en Bolivia como en el mundo.

Una novedad importante a partir de este número es que la información básica de la RBF se ha modificado ligeramente y ahora, esta queda como:

- La RBF es el órgano oficial de la Sociedad Boliviana de Física (SOBOFI) y se publica en forma conjunta con el Instituto de Investigaciones Físicas de la Universidad Mayor de San Andrés (IIF-UMSA).
- La RBF busca difundir la producción científica de la comunidad de físicos y profesionales de ciencias afines, especialmente dentro de Iberoamérica.
- La RBF publica artículos científicos sometidos a arbitraje, colaboraciones, revisiones, artículos relacionados a la enseñanza de la física, entrevistas y aspectos históricos de la física y la ciencia en general. Se reciben artículos escritos en castellano, inglés y portugués. Los artículos publicados tendrán un resumen en castellano y su versión en inglés. Se publicarán al menos dos números por volumen por año.

Por otra parte, el Comité Editorial está trabajando activamente para tener una versión digital de la RBF, donde se incluyan todos los números y todos los artículos en formato PDF. Esperamos concluir en breve este emprendimiento. También se está gestionando la posibilidad de identificar todos los artículos publicados en la RBF con el identificador DOI; este objetivo se coordina con el Comité de SciELO Bolivia.

En este número tenemos cinco contribuciones, de las cuales tres corresponden a artículos científicos que fueron revisados por árbitros internacionales, un artículo relacionado con enseñanza de la física y otro que corresponde a una entrevista de un personaje prominente de la ciencia. La sincronización de dos neuronas acopladas eléctricamente es estudiada y caracterizada por Calderón de la Barca & Ramírez-Ávila (2017) quienes utilizan el sencillo modelo de Rulkov para la descripción dinámica de cada una de las neuronas. Un trabajo de medición y análisis del carbono negro en el Observatorio de Huancayo, Perú es expuesto por Suarez et al. (2017) quienes sostienen que sus observaciones serían explicadas por las quemadas de biomasa en la cuenca del Amazonas correspondiente a Brasil, Bolivia y Perú. Considerando el modelo semiclásico de enlace fuerte extendido, Mamani, Calcina-Nogales & Sanjinés (2017) estudian las interacciones de largo alcance en una red por el mecanismo de hopping. Una contribución referente a los aspectos educativos de la ciencia nuclear es presentado por Bustos-Espinoza et al. (2017) quienes revisan con detalle los aspectos históricos de la física nuclear en Bolivia y plantean las tendencias de cara al programa nuclear boliviano, el cual se consolidó con la creación de la Agencia Boliviana de Energía Nuclear y la futura construcción de un centro de investigación y aplicaciones nucleares. Finalmente, Ramírez Ávila (2017) presenta una entrevista a James Yorke, personaje muy importante en la dinámica no lineal y quien introdujo el término “caos” en la jerga científica.

Esperamos que el presente número de la RBF sea de interés para la comunidad científica y que al mismo tiempo motive a los científicos a enviar su producción intelectual que gracias a la plataforma SciELO es de libre acceso para toda la comunidad científica y el público en general.

- Bustos-Espinoza R. O. E., A. Burgoa-Mariaca, I. Poma-Mamani, R. D. Ticona-Peralta, M. Subieta-Vasquez, G. M. Ramírez-Ávila, M. Raljevic-Ergueta, M. Lucano-Lucano, R. Mamani, M. Vargas-Lucana, S. Chávez-Ríos, Torrico-Ferrufino S., D. Coca-Valdez & L. Romero-Bolaños (2017). “Estado y Tendencias de la Educación Nuclear en el Estado Plurinacional de Bolivia”, Revista Boliviana de Física: **30** 31-55.
- Calderón de la Barca I. & G. M. Ramírez-Ávila (2017). “Sincronización de Neuronas Modeladas por Mapas y Caracterizadas por Periodicidades”, Revista Boliviana de Física: **30** 3-8.
- Mamani E., M. Calcina-Nogales & D. Sanjinés (2017). “Interacciones Efectivas de Largo Alcance en una Red en la Aproximación Semiclásica”, Revista Boliviana de Física: **30** 18-29.
- Ramírez Ávila G. M. (2017). “El Caos y su Trascendencia: Entrevista con James Yorke”, Revista Boliviana de Física: **30** 57-61.
- Suarez L., C. Torres, D. Helmig & J. Hueber (2017). “Medición y Análisis del Aerosol de Carbono Negro en el Observatorio de Huancayo, Perú”, Revista Boliviana de Física: **30** 9-17.

## EDITORIAL

The Editorial Committee of the Revista Boliviana de Física (RBF), looking at the current status of the RBF, have decided to give it a new scope. This involves, amongst other things, adapting to the requirements of SciELO Bolivia, in aspects related to the form in which articles must be presented including a declaration regarding conflict of interest and specific deadlines required for publication. In addition, the format and content of the RBF is undergoing small changes. From this issue onwards the editorial note will appear in both Spanish and English. The Editorial will reflect on the content of each particular issue and eventually give the RBF's opinion on current scientific themes of interest in Bolivia and further afield.

The following changes and adjustments are in place

- The RBF is an official body of the Bolivian Physics Society (SOBOFI) and is published jointly with the Institute of Physics Research of the Universidad Mayor de San Andrés (IIF-UMSA).
- The RBF seeks to disseminate the scientific production of the physics community and professionals from related sciences, especially within Ibero-America.
- The RBF will publish at least two issues per year. Scientific articles may include; those submitted to arbitration, the result of collaborations, reviews, historical accounts, interviews of scientific interest and physics teaching. Articles are received in Spanish, English and Portuguese and will eventually have a summary abstract in all three languages.

Furthermore, the Editorial Committee is actively working to have an electronic version of the RBF, where all the numbers and all the articles are included in PDF format. We hope to conclude this initiative shortly. The possibility of identifying all articles published in the RBF with the DOI identifier is also being looked into; this initiative is in coordination with the SciELO Bolivia Committee.

In this issue we have five contributions, of which three correspond to scientific articles that were reviewed by international referees; an article related to physics teaching and another that corresponds to an interview of a prominent scientist. The synchronization of two electrically coupled neurons is studied and characterised by Calderón de la Barca & Ramírez-Ávila (2017) who use the simple Rulkov model for the dynamic description of each of the neurons. A study of black carbon measurements and analysis at the Huancayo Observatory, Peru, is presented by Suarez et al., (2017) who maintain that their observations can be explained by the biomass burnings in the Amazon basin corresponding to Brazil, Bolivia and Peru. Considering the semiclassical model of an extended tight-binding Hamiltonian, Mamani, Calcina-Nogales & Sanjinés (2017) study the long-range interactions for a charged particle hopping in a lattice. A contribution referring to the educational aspects of nuclear science is presented by Bustos-Espinoza et al., (2017) who review in detail the historical aspects of nuclear physics in Bolivia and outline the trends for the Bolivian nuclear program, which have been consolidated with the creation of the Bolivian Nuclear Energy Agency and the future construction of a nuclear research and applications center. Finally, Ramírez Ávila (2017) presents an interview with James Yorke, a very important character in nonlinear dynamics and who introduced the term “chaos” in scientific jargon.

We hope that this issue of the RBF is of interest to the scientific community and that at the same time it motivates scientists to send their intellectual work for publication. We are grateful for the SciELO platform which is freely accessible to the entire scientific community and the general public.

- Bustos-Espinoza R. O. E., A. Burgoa-Mariaca, I. Poma-Mamani, R. D. Ticona-Peralta, M. Subieta-Vasquez, G. M. Ramírez-Ávila, M. Raljevic-Ergueta, M. Lucano-Lucano, R. Mamani, M. Vargas-Lucana, S. Chávez-Ríos, Torrico-Ferrufino S., D. Coca-Valdez & L. Romero-Bolaños (2017). “State and Trend of the Nuclear Education in the Plurinational State of Bolivia”, *Revista Boliviana de Física*: **30** 31-55.
- Calderón de la Barca I. & G. M. Ramírez-Ávila (2017). “Synchronization of Map Modeled Neurons and Characterized by Periodicities”, *Revista Boliviana de Física*: **30** 3-8.
- Mamani E., M. Calcina-Nogales & D. Sanjinés (2017). “Long-Range Effective Interactions in a Lattice in the Semiclassical Approximation”, *Revista Boliviana de Física*: **30** 18-29.
- Ramírez Ávila G. M. (2017). “Chaos and its Transcendence: Interview with James Yorke”, *Revista Boliviana de Física*: **30** 57-61.
- Suarez L., C. Torres, D. Helmig & J. Hueber (2017). “Measurement and Analysis of Black Carbon Aerosols at Observatory of Huancayo, Perú”, *Revista Boliviana de Física*: **30** 9-17.

## SINCRONIZACIÓN DE NEURONAS MODELADAS POR MAPAS Y CARACTERIZADAS POR PERIODICIDADES

### SYNCHRONIZATION OF MAP MODELED NEURONS AND CHARACTERIZED BY PERIODICITIES

IGNACIO CALDERON DE LA BARCA<sup>‡</sup> & GONZALO MARCELO RAMÍREZ-ÁVILA<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Instituto de Investigaciones Físicas, Carrera de Física  
Universidad Mayor de San Andrés

c. 27 Cota-Cota, Campus Universitario, Casilla de Correos 8639  
La Paz - Bolivia

(Recibido 22 de agosto de 2017; aceptado 27 de septiembre de 2017)

#### RESUMEN

Se estudia la sincronización de dos neuronas acopladas eléctricamente en función de la intensidad de acoplamiento y periodicidad que las caracteriza, empleando como indicador el error medio de sincronización. La actividad neuronal presenta dos dinámicas: una rápida en la cual se producen impulsos de los potenciales de acción y otra lenta que los modula, produciendo como resultado un comportamiento de gran importancia fisiológica denominado ráfagas de picos. Estos comportamientos intrínsecos de las neuronas están bien caracterizados en el plano de parámetros por periodicidades. Se ha encontrado que valores altos de la intensidad de acoplamiento llevan al sistema a perder regularidad en sus oscilaciones, por lo que se limita el intervalo de análisis. Así, se observa que se alcanza una sincronización completa sólo entre neuronas idénticas acopladas; mientras que en otras situaciones, se manifiesta una sincronización en fase. Además, en el caso de neuronas de igual periodicidad, la serie temporal del error medio de sincronización muestra oscilaciones periódicas y con periodicidades similares a las señales neuronales.

Código(s) PACS: 05.45.-a — 05.45.Xt — 02.70.-c — 87.19.L-

*Descriptores:* Dinámica no lineal y caos — Sincronización; osciladores acoplados — Técnicas computacionales; simulación — Neurociencia.

#### ABSTRACT

We studied the synchronization of two electrically coupled neurons as a function of the coupling strength and their characteristic periodicities, using as an indicator the mean synchronization error. The neural activity presents two dynamical features: a fast one in which impulses are produced from the action potentials and a slow one that modulates them; together these result in a behavior of great physiological importance here called bursts of spikes. These intrinsic neural behaviors are well characterized by periodicities in the parameter plane. We found that high coupling strength values provoke a loss of regularity in the oscillations which delimit the interval analysis. Thus, we observed that complete synchronization is only achieved when coupled neurons are identical, whereas in other situations phase synchronization is manifested. Moreover, in the case of non-identical coupled neurons with the same periodicity, the time series of the mean synchronization error exhibit periodic oscillations with similar periodicities of the neuron's signals.

*Subject headings:* Nonlinear dynamics and chaos — Synchronization; coupled oscillators — Computational techniques; simulation — Neuroscience.

#### 1. INTRODUCCIÓN

El estudio de redes complejas se ha extendido ampliamente en las últimas décadas y está relacionado con múltiples disciplinas científicas, como ser la neurociencia. Responsables del procesamiento de infor-

mación y de la ejecución de actividades funcionales las redes neuronales son específicas a ciertas regiones y funciones como lo señalan Azevedo et al. (2009). A grandes rasgos, se distinguen tres partes en una neurona: las dendritas, la terminal de axón (ambas terminaciones nerviosas) y una membrana conductora llamada axón. Para que una colección de estas células procese información las mismas deberán conectarse, este es el proceso conocido como

<sup>‡</sup>icalderon@fiumsa.edu.bo

<sup>†</sup>mravila@fiumsa.edu.bo

<http://www.fiumsa.edu.bo/docentes/mramirez/>

sinapsis y sucede cuando se aproximan las terminaciones nerviosas del axón con las dendritas, transfiriéndose una señal electroquímica, comúnmente una corriente iónica. Dicha señal se conduce a través de las neuronas receptoras a causa de una diferencia de potencial eléctrico entre los extremos del axón y sus terminales, producida por la diferencia de concentración de iones en la frontera de la membrana como se describe en Girardi et al. (2013). Formalmente, tal conducción está ligada con lo que se conoce como potenciales de acción. Cada tipo de neurona posee un umbral de excitación característico, el cual debe ser superado para permitir un potencial de acción, esto fue reportado por primera vez por Hodgkin & Huxley (1952).

Desde los trabajos experimentales con redes neuronales artificiales desarrollados por Sarbadhikari & Chakrabarty (2001), se sabe que la dinámica neuronal puede presentar comportamientos periódicos y caóticos. Las oscilaciones periódicas se manifiestan en dos procesos: la descarga de iones en el axón que ocurre rápidamente y en repetidas ocasiones, y el alcance de valores umbral de excitación que modulan el tiempo de conducción. Los comportamientos intrínsecos de las neuronas son: oscilaciones sostenidas, ráfagas de impulsos o picos, oscilaciones caóticas y silencio o ausencia de oscilaciones. Adicionalmente a los mecanismos mencionados anteriormente, se puede considerar una red neuronal como un sistema de entrada y salida (input/output) conformado por osciladores; es decir, un sistema al que ingresa una señal y del que sale otra diferente. Tales aspectos posibilitan el estudio de redes neuronales con la dinámica no lineal.

A partir de observaciones fisiológicas, en el trabajo de Hodgkin & Huxley (1952) se propuso un modelo de ecuaciones en derivadas parciales, siendo pioneros en abordar una descripción matemática del comportamiento neuronal. Posteriores trabajos realizados por FitzHugh (1955), Nagumo et al. (1962), Hindmarsh & Rose (1984) e Izhikevich (2003), redujeron el sistema anteriormente mencionado a variantes más sencillas como se muestra en Girardi et al. (2013). Adaptaciones de los modelos basados en ecuaciones diferenciales ordinarias y/o en derivadas parciales, permitieron discretizar las ecuaciones, lo que constituye una simplificación importante. Estos nuevos sistemas con tiempos discretos, llamados mapas, presentan ventajas teóricas por tener formas matemáticas más sencillas y seguir mostrando los comportamientos dinámicos de relevancia, como se expone en Ibarz et al. (2011).

Las simulaciones computacionales constituyen la herramienta ideal para estudiar los comportamientos oscilatorios de las neuronas. En las últimas décadas se han desarrollado varios modelos que exhiben comportamientos oscilatorios observables en neuronas reales, tales como: *ráfagas de impulsos o picos* o más conocidas como “bursts of spikes” en la literatura en inglés, que son trenes de impulsos seguidos de desexcitaciones y excitaciones; *oscilaciones sostenidas* o “spikes”, que son impulsos con

cierto período; *silencio*, que es un estado estacionario caracterizado dinámicamente por puntos fijos y por último, *oscilaciones caóticas*.

Uno de los propósitos más importantes de los modelos basados en mapas es el de entender los mecanismos que subyacen en el procesamiento de información y actividades funcionales de las neuronas. Estudiar la sincronización de una red entre varias de estas subregiones es relevante por que aporta al concimiento de codificación y procesamiento de información en neuronas, estrechamente relacionado con la memoria a corto plazo como se expone en Sausedo-Solorio & Pisarchik (2014).

El comportamiento sincrónico de ráfagas de impulsos está relacionado con ciertas patologías como lo indican de Pontes et al. (2008), por lo que su estudio es de suma importancia como lo plantea Rulkov (2001). La gran mayoría de trabajos se enfocan en redes neuronales con conexiones que cumplen la propiedad de escalamiento libre, donde el acoplamiento se reduce mientras incrementa el tamaño de la red según una ley de potencias como lo señalan Batista et al. (2009), de Pontes et al. (2008) y considerando un retardo sináptico entre las señales estudiado por Sausedo-Solorio & Pisarchik (2014).

El artículo está estructurado de la siguiente manera: en la Sección 2. se introduce todas las propiedades y aspectos concernientes al análisis del modelo que se emplea. La Sección 3. muestra los resultados más importantes entre los que destacan la dependencia del error de sincronización con la intensidad de acoplamiento y la serie temporal del mismo para neuronas que presentan comportamientos diferentes. Finalmente, en la Sección 4. se exponen las conclusiones del trabajo, así como perspectivas para posibles extensiones de la investigación.

## 2. MODELO DE RULKOV

La forma matemática del modelo de neurona de Rulkov es sencilla; sin embargo, este es capaz de describir diversidad de comportamientos, incluyendo los cuatro mencionados en la Sección 1. Modelar neuronas que presentan el comportamiento de ráfagas de impulsos implica la dinámica de dos variables, una de ellas,  $y$  cambia su valor lentamente con el tiempo discreto  $n$  y modula el período de otra variable,  $x$  que produce ráfagas de impulsos. El mapa bidimensional planteado por Rulkov (2002) está dado por

$$x_{n+1} = f(x_n, y_n + \beta_n), \quad (1)$$

$$y_{n+1} = y_n - \mu(x_n + 1) + \mu\sigma + \mu\sigma_n,$$

donde  $f(x_n, y_n)$  es una función por partes, de la forma

$$f(x_n, y_n) = \begin{cases} \alpha/(1 - x_n) + y_n, & \text{si } x_n \leq 0 \\ \alpha + y_n, & \text{si } 0 < x_n < \alpha + y_n \\ -1, & \text{si } x_n \geq \alpha + y_n. \end{cases} \quad (2)$$

Varios de los parámetros tienen una relación directa con aspectos biológicos,  $\beta_n$  y  $\sigma_n$  representan influencias externas (interacción con otras neuronas) co-

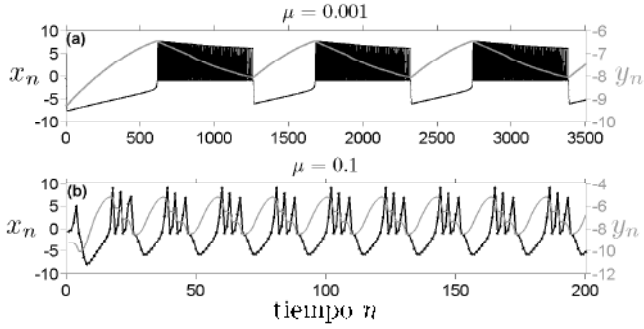


FIG. 1.— Series temporales de la variable rápida (línea negra y eje vertical izquierdo) y variable lenta (línea gris y eje vertical derecho) del modelo de Rulkov, para intensidades de actividad neuronal (a)  $\mu = 0.001$  y (b)  $\mu = 0.1$ . Nótese que el dominio del tiempo en las figuras es distinto, con el fin de mostrar el comportamiento de ráfagas y que ambas variables: rápida y lenta, presentan la misma periodicidad.

rrespondientes a la sinapsis y conducción respectivamente. En tanto que  $\sigma$  es un parámetro característico de cada neurona aislada, relacionado con los potenciales de acción y el desplazamiento vertical del umbral de excitación en el plano de parámetros; mientras que  $\alpha$  repolariza la membrana, delimitando los comportamientos de impulsos y ráfagas. Finalmente, el parámetro  $\mu$  está relacionado con la intensidad de actividad; es decir, mientras mayor sea su valor, más frecuente será la actividad neuronal. La Fig. 1 muestra las series temporales de las variables rápida y lenta en un comportamiento de ráfagas de picos para valores de  $\mu = 0.001$  y  $\mu = 0.1$ . En las dos situaciones puede observarse que ambas variables comparten periodicidad. Como consecuencia del valor de la intensidad de actividad, nótese que la escala temporal para la Fig. 1(b) es menor y a pesar de ello se tienen más trenes de ráfagas, pero con mucha menor cantidad de picos que en la Fig. 1(a).

### 2.1. Caracterización mediante periodicidades

Los comportamientos neuronales quedan caracterizados en un plano de parámetros, para  $\alpha$  y  $\sigma$ , en el cual se distinguen tres regiones bien definidas correspondientes al silencio (puntos fijos), ráfagas de impulsos y oscilaciones sostenidas, tal como lo introdujo Rulkov (2002). Por otra parte la caracterización de mapas mediante periodicidades muestra ser un método alternativo al empleo de exponentes de Lyapunov siendo más ventajoso en el sentido que describe con mayor detalle las dinámicas oscilatorias de los sistemas, como se reporta en Ramírez-Ávila & Gallas (2011). También utilizando éste método, se obtiene un plano de parámetros extendido para el mapa de Rulkov caracterizado por periodicidades, modelado para un valor no tradicional de intensidad de actividad  $\mu = 0.1$  estudiado por Ramírez-Ávila et al. (2015). Aquí, cabe resaltar que todos los trabajos mencionados se han dedicado a estudiar sincronización de neuronas caracterizadas solamente por su comportamiento de ráfagas para un valor de uno de los parámetros, dado por  $\mu = 0.001$ . El presente trabajo tiene como objetivo es-

tudiar la sincronización de dos neuronas caracterizadas por periodicidades para un valor de  $\mu = 0.1$ , haciendo una selección de: neuronas idénticas, que comparten periodicidad y de otras que difieren en periodicidad y comportamiento. Volviendo al plano de parámetros, se muestra el mismo en la Fig. 2, observándose una gran riqueza de comportamientos dinámicos (múltiples regiones). El código de colores indica la periodicidad en las diferentes regiones del plano, correspondiendo además la región blanca y la más oscura al silencio y caos respectivamente. Para los análisis que siguen, elegimos como referencia una neurona en la región de periodicidad 21, caracterizada por  $\alpha = 14.13$  y  $\sigma = 0.3622$ .

### 2.2. Indicadores de sincronización

Como consecuencia de la interacción de elementos en un sistema complejo compuesto de osciladores, se puede producir la sincronización, fenómeno emergente omnipresente en la naturaleza en diversidad de ciencias. Este fenómeno puede surgir abruptamente en una red compleja, como reporta Boccaletti et al. (2016). Se pueden distinguir diferentes tipos de sincronización tales como la sincronización completa, en fase, generalizada, con retardo, entre otras, como lo señala Ramírez-Ávila (2007). Para estudiar la sincronización empleamos dos cantidades: (i) El *error medio de sincronización* que se define como la distancia promedio a la variedad de sincronización, lo cual implica que las diferencias de las variables para cada oscilador en cada tiempo  $n$  sean nulas o próximas a cero; en otras palabras, que la distancia euclidiana entre las señales de los osciladores sean próximas a cero en el caso de la sincronización

$$\langle \epsilon \rangle = \frac{1}{n - n_\tau} \sum_{i=n_\tau}^n \sqrt{(x_i^{(2)} - x_i^{(1)})^2 + (y_i^{(2)} - y_i^{(1)})^2}, \quad (3)$$

donde  $n_\tau$  es un transitorio. (ii) El *error máximo* que es el máximo valor de las distancias euclidianas para los  $n - n_\tau$  valores

$$\epsilon_{\max} = \max \left\{ \sqrt{(x_i^{(2)} - x_i^{(1)})^2 + (y_i^{(2)} - y_i^{(1)})^2} \right\}, \quad (4)$$

$i = n_\tau \dots n.$

### 2.3. Acoplamiento

La interacción sináptica de dos neuronas requiere una conexión entre los mapas que describen a las mismas. El acoplamiento vincula a los elementos de la red mediante interacciones. Dado que estamos interesados en estudiar las interacciones entre dos neuronas empleamos un acoplamiento bidireccional, simétrico y de carácter eléctrico como se expone en Girardi et al. (2013)

$$\begin{aligned} \beta_n^{(i)} &= \beta^e g_{ij} (x_n^{(j)} - x_n^{(i)}), \\ \sigma_n^{(i)} &= \sigma^e g_{ij} (x_n^{(j)} - x_n^{(i)}), \end{aligned} \quad (5)$$

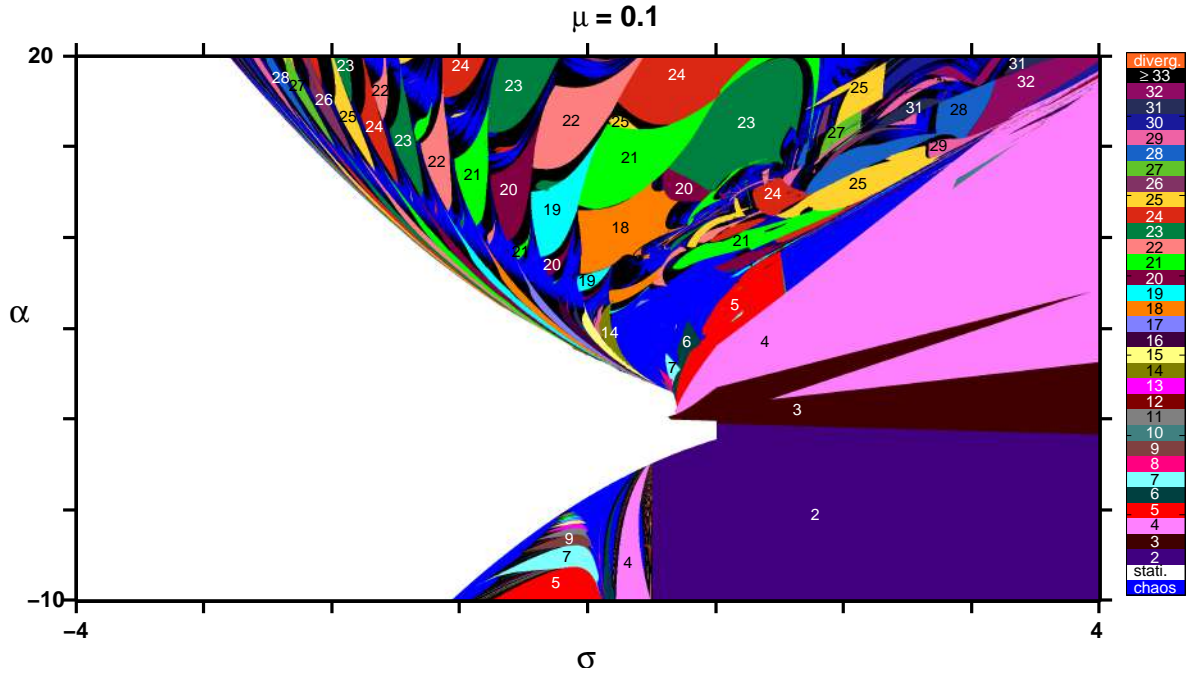


FIG. 2.— (Color online) Plano de parámetros caracterizado por periodicidades con  $\mu = 0.1$ . Las tres regiones que caracterizan el comportamiento neuronal continúan siendo válidas y además se muestran regiones (índices de colores) que indican la periodicidad del comportamiento oscilatorio. Las regiones blanca, azul y negra corresponden respectivamente a silencio, caos y oscilaciones de alta periodicidad ( $\geq 33$ ). La región que tomaremos como referencia es la correspondiente a un comportamiento de ráfagas de picos etiquetada con periodicidad 21. Plano de parámetros tomado de Ramírez-Ávila et al. (2015).

donde  $\beta^e$  y  $\sigma^e$  son cantidades correspondientes a la intensidad de la sinapsis entre neuronas y la magnitud del potencial de acción de entrada, como se explicó previamente. La cantidad  $g_{ij}$  es una matriz simétrica y de diagonal nula que define la conexión entre neuronas. En lo que sigue del trabajo, nos referiremos a la magnitud de los elementos de dicha matriz como la intensidad de acoplamiento  $g$ .

### 3. RESULTADOS

Con el objetivo de observar el efecto de la intensidad de acoplamiento en el comportamiento oscilatorio de las neuronas, analizamos los errores de sincronización, dados por las Ecs. (3) y (4) en función de la intensidad de acoplamiento. Se estudió la interacción de dos neuronas distintas que comparten periodicidad, incrementando el valor de la intensidad de acoplamiento  $g$  en un amplio rango de valores, como se muestra en la Fig. 3. Se observa que si el valor de la intensidad de acoplamiento es alto (próximo a  $g = 1.0$ ), entonces el comportamiento inicial pierde regularidad en el período. En consecuencia, se debe limitar el intervalo de valores de  $g$  para los cuales los errores de sincronización son pequeños.

El análisis de las series temporales del error de sincronización para neuronas distintas que comparten periodicidad y para un valor específico del acoplamiento ( $g = 0.43$ ) se muestran en la Fig. 4. Podemos apreciar las series temporales de ambas neuronas no idénticas acopladas con una intensidad de  $g = 0.001$  Fig. 4(a) donde oscilan con la misma periodicidad y  $g = 0.1$  Fig. 4(c), donde la periodicidad

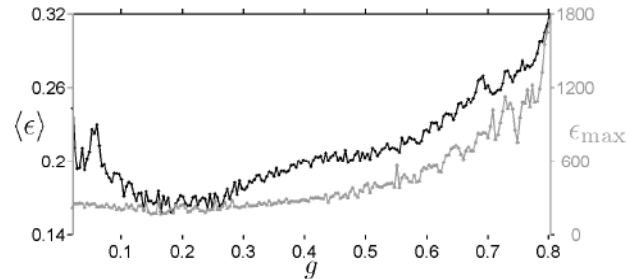


FIG. 3.— Comportamiento del error medio de sincronización (eje vertical izquierdo, línea negra) y del error máximo de sincronización (eje vertical derecho, línea gris) en función de la intensidad de acoplamiento  $g$  para neuronas distintas, ambas en la región de periodicidad 21. Nótese que los errores de sincronización aumentan con  $g$ .

de una de las señales cambia ligeramente debido a un mayor acoplamiento. En ninguno de los casos las señales se superponen. El error medio de sincronización en función del tiempo, Fig. 4(b), presenta oscilaciones periódicas que comparten la periodicidad de las ráfagas que es 21, en concordancia con los resultados obtenidos por Bustos & Ramírez-Ávila (2016) para un mapa unidimensional. En tanto que en la Fig. 4(d) se observa que las oscilaciones del error medio de sincronización cambian su periodicidad a 20. Estos comportamientos son una correspondencia de la naturaleza oscilatoria del fenómeno.

Finalmente, la Fig. 5, muestra la interacción de la neurona de referencia ( $\alpha = 14.13$ ,  $\sigma = 0.3622$ ) con otras neuronas distintas en comportamiento y perio-

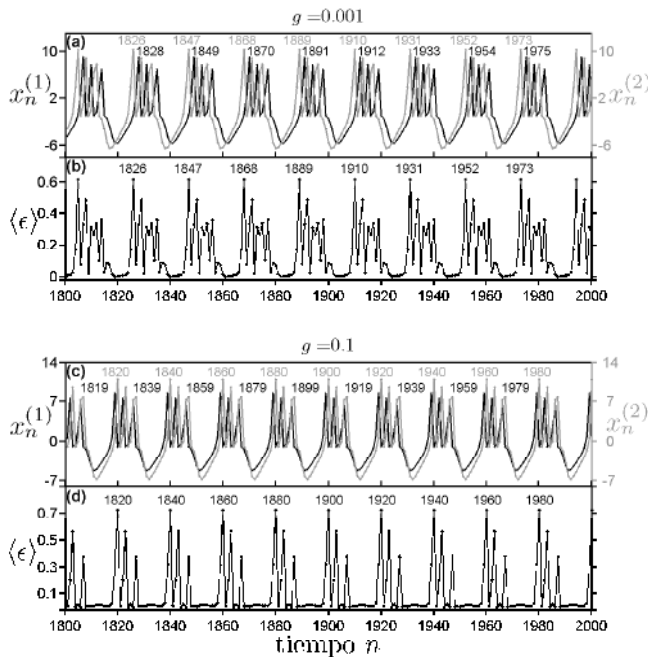


FIG. 4.— (a) y (c) Son series temporales de la variable rápida para dos neuronas no idénticas acopladas y de misma periodicidad, 21. Series temporales del error medio de sincronización, para intensidades de acoplamiento de  $g = 0.001$  (b) y  $g = 0.1$  (d). Donde se nota en ambos casos oscilaciones periódicas para  $\langle \epsilon \rangle$ .

dicidad, como se especifica en la leyenda de la figura. Se puede ver que, a excepción de neuronas idénticas, en ningún caso se consigue una sincronización completa, pero sí se manifiesta una sincronización en fase para los casos: (i) cuando la neurona de referencia interactúa con otra que presenta ráfagas (ver Fig. 5(d)-(f)), (ii) otra en su estado estacionario (ver Fig. 5(j)-(l)) y (iii) una interacción con una neurona caótica (ver Fig. 5(m)-(o)). Sin embargo, el período de  $\langle \epsilon \rangle$  es sensible a cambios de la intensidad de acoplamiento, pese a que esta se encuentre en el intervalo de análisis.

#### 4. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Se profundizó el estudio de las características dinámicas del modelo de Rulkov, tomando en cuenta valores de los parámetros que no se consideran comúnmente pero que tienen una gran riqueza a nivel de comportamiento dinámico sobre todo en lo concerniente a periodicidades. Teniendo en cuenta una neurona de referencia en la región de periodicidad 21, se vio que la sincronización completa solo se presenta con otra neurona idéntica. Sin embargo, la sincronización en fase con otras neuronas que comparten periodicidad es posible y además, se observó que el error de sincronización oscila periódicamente en el tiempo y con periodicidades similares que los trenes de ráfagas de picos. Este comportamiento está en correspondencia con el carácter oscilatorio de las variables dinámicas del modelo. Con respecto a la interacción de la neurona de referencia y otra de periodicidad 4 (oscilaciones sostenidas) no presentan periodicidad, posiblemente debido a que se tiene una importante diferencia en la periodicidad además que la periodicidad de la serie temporal del error medio de sincronización puede desaparecer dependiendo del valor de acoplamiento.

Como perspectivas se pretende extender la investigación y estudiar más exhaustivamente la sincronización en fase y así caracterizar de manera más general el comportamiento del error de sincronización en función de la intensidad de acoplamiento, pudiéndose construir un espacio de parámetros en términos de diferencias de  $\alpha$  y  $\sigma$ . Por último es deseable a corto plazo extender este estudio a sistemas con mayor número de neuronas.

#### Conflicto de intereses

Los autores declaran que no hay conflicto de intereses con respecto a la publicación de éste documento.

#### REFERENCIAS

- Azevedo, F.A.C., Carvalho, L.R.B., Grinberg, L.T., Farfel, J.M., Ferretti, R.E.L., Leite, R.E.P., Filho, W.J., Lent, R., Herculano-Howzel, S. (2009), *Journal of Comparative Neurology* **513**, 532.
- Batista, C.A.S., Batista, A.M., de Pontes, J.C.A., Lopes, S.R., & Viana, R.L. (2009), *Chaos, Solitons & Fractals* **41**, 2220.
- Batista, C.A.S., Lopes, S.R., Viana, R.L., & Batista, A.M. (2010), *Neural Networks* **23**, 114.
- Boccaletti, S., Almendral, J.A., Guan, S., Leyva, I., Liu, Z., Sendin-Nadal, I., Wang, Z. and Zou, Y. (2016), *Physics Reports* **660**, 1.
- Bustos, R.O.E. & Ramírez-Ávila, G.M. (2016), *European Physical Journal Special Topics* **225**, 2697.
- de Pontes, J.C.A., Viana, R.L., Lopes, S.R., Batista, C.A.S. & Batista, A.M. (2008), *Physica A* **387**, 4417.
- FitzHugh, R. (1955), *The Bulletin of Mathematical Biophysics* **17**, 257.
- Girardi, S.M., Tragtenberg, M.H.R. & Kinouchi, O. (2013), *Journal of Neuroscience Methods* **220**, 116.
- Hindmarsh, J.L. & Rose, R.M. (1984), *Proceedings of the Royal Society of London B* **221**, 87.
- Hodgkin, A.L. & Huxley, A.F. (1952), *The Journal of Physiology* **117**, 500.
- Ibarz, B., Casado, J.M. & Sanjuán, M.A.F. (2011), *Physics Reports* **501**, 1.
- Izhikevich, E.M. (2003), *IEEE Transactions on Neural Networks* **14**, 1569.
- Izhikevich, E.M. & Hoppensteadt, F. (2004), *International Journal of Bifurcation and Chaos* **14**, 3847.
- Nagumo, J., Arimoto, S. & Yoshizawa, S. (1962), *Proceedings of the IRE* **50**, 2061.
- Pecora, L.M. & Carroll, T.L. (1990), *Physical Review Letters* **64**, 821.
- Ramírez-Ávila, G.M. (2007), *Revista Boliviana de Educación Superior en Ciencias* **7**, 25.
- Ramírez-Ávila, G.M. & Gallas, J.A. (2011), *Revista Boliviana de Física* **19**, 1.
- Ramírez-Ávila, G.M., Gallas, M.R. & Gallas, J.A. (2015), *Revista Boliviana de Física* **27**, 1.
- Rulkov, N.F. (2001), *Physical Review Letters* **86**, 183.
- Rulkov, N.F. (2002), *Physical Review E* **65**, 041922.
- Sarbadhikari, S.N. & Chakrabarty, K. (2001), *Medical Engineering & Physics* **23**, 447.
- Sausedo-Solorio, J.M. & Pisarchik, A.N. (2014), *Physics Letters A* **378**, 2108.
- Schiff, S.J., Jerger, K., Duong, D.H., Chang, T., Spano, M.L., Ditto, W.L. & et al. (1994), *Nature* **370**, 615.

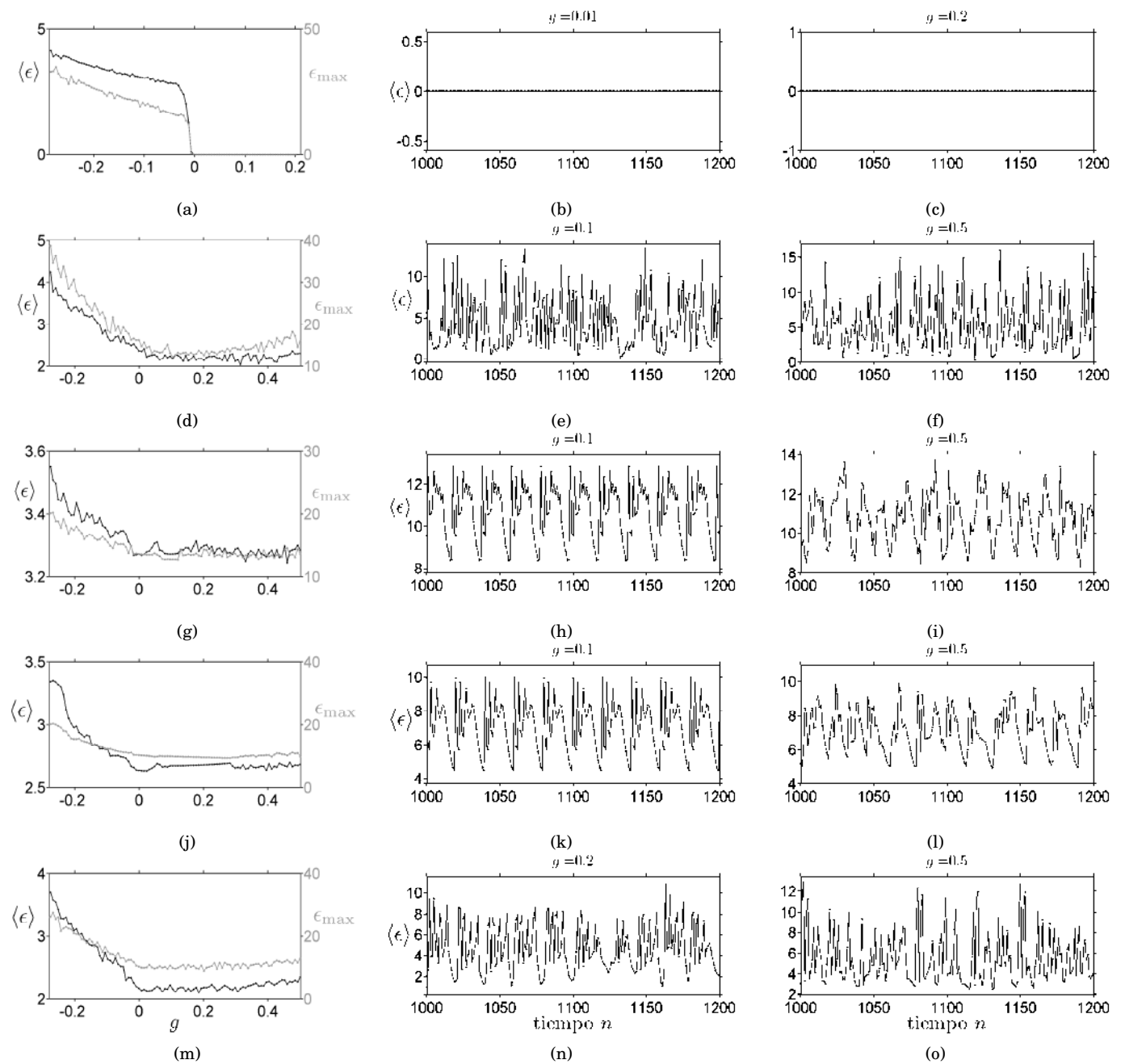


FIG. 5.— Dependencia de los errores de sincronización en función de la intensidad de acoplamiento (primera columna). La primera fila (a)-(c) muestra la sincronización completa entre neuronas idénticas de periodicidad 21, es decir neuronas de referencia  $\alpha = 14.13$   $\sigma = 0.3622$ . En la segunda y tercera columna se aprecia la serie temporal del error medio de sincronización para acoplamientos determinados. La segunda fila (d)-(f) corresponde a neuronas del mismo comportamiento de ráfagas, pero distinta periodicidad, neurona de referencia y neurona de periodicidad 29 ( $\alpha = 14.99$ ,  $\sigma = 2.771$ ). La tercera fila (g)-(i), muestra la interacción con una neurona de comportamiento de oscilaciones sostenidas y periodicidad 4 ( $\alpha = -6.698$ ,  $\sigma = 0.3302$ ). La cuarta fila (j)-(l) describe la interacción con una neurona en silencio, ( $\alpha = 1.031$ ,  $\sigma = 0.5743$ ). La quinta fila corresponde a la interacción de la neurona de referencia con una caótica, ( $\alpha = 8.909$  y  $\sigma = 1.735$ ).

Suykens, J., Yalçın, M. & Vandewalle, J. (2003), *Chaos Control* (New York: Springer), 117.

## MEDICIÓN Y ANÁLISIS DEL AEROSOL DE CARBONO NEGRO EN EL OBSERVATORIO DE HUANCAYO, PERÚ

## MEASUREMENT AND ANALYSIS OF BLACK CARBON AEROSOLS AT OBSERVATORY OF HUANCAYO, PERU

LUIS SUAREZ<sup>1,†</sup>, CHRISTIAN TORRES<sup>1,2</sup>, DETLEV HELMIG<sup>3</sup>, & JACQUES HUEBER<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Observatorio de Huancayo, Instituto Geofísico del Perú, Perú

<sup>2</sup>Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Universidad Alas Peruanas - Filial Huancayo, Perú

<sup>3</sup>National Center for Atmospheric Research, University Corporation for Atmospheric Research, EE.UU. &

<sup>4</sup>Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado, Boulder, EE.UU.

(Recibido 10 de junio de 2017; aceptado 14 de octubre de 2017)

### RESUMEN

El carbono negro (CN) es una fracción de los aerosoles atmosféricos que afecta principalmente al clima y la salud. Este estudio muestra por primera vez los resultados de las mediciones de CN en los aerosoles atmosféricos colectados en el Observatorio de Huancayo (OHY) desde junio a diciembre del 2015. También se realizó una evaluación para identificar las principales áreas desde donde los niveles altos de contaminación del aire podrían ser transportados al OHY. La concentración de CN fue registrado con un etalómetro obteniéndose un promedio de  $0.81 \pm 0.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Además, basado en el algoritmo de Sandradewi, se estimó que el 41.27% del CN se relacionan con las fuentes de quemas de biomasa. Haciendo uso de diagramas polares de dos variables de la librería OpenAir del software estadístico R, fue posible identificar altas concentraciones de CN provenientes de diferentes direcciones, siendo más dominante las provenientes del sector este con vientos que llegan hasta los 4 m/s. En esta dirección se ubican importantes poblaciones urbanas de la región: Huancayo (501 384 habs.), Sicaya (57 324 habs.) al noreste, y Chupaca (53 263 habs.) al sureste. También se observó que altas concentraciones están asociadas a vientos fuertes que van de 5 a 7 m/s y también provienen del sector este. Las quemas de biomasa en la cuenca del Amazonas de (Brasil, Bolivia y Perú) y el transporte transfronterizo de los contaminantes atmosféricos explicarían estas observaciones.

Código(s) PACS: 92.20.Bk — 92.40.Cy — 92.60.Sz

*Descriptores:* Aerosoles — modelaje — cambio climático

### ABSTRACT

Black carbon (BC) is a fraction of atmospheric aerosols that primarily affects climate and health. This study shows for the first time the results of BC measurements in atmospheric aerosols collected at the Huancayo Observatory (OHY), Peru; from June to December 2015. Additionally, an evaluation was carried out to identify the main regions from where the high air pollution was transported to OHY. BC concentration was registered with an aethalometer with a mean of  $0.81 \pm 0.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Also, based on the algorithm of Sandradewi, it is estimated that 41.27% of BC was related to biomass burning sources. Using bivariate polar plots from the “openair” library of R statistical software it was possible to identify, high concentrations of BC coming from all directions, with the most dominant direction being easterly with wind velocities of up to 4 m/s. Within this direction are important populated urban locations: Huancayo (501 384 inh.), Sicaya (57 324 inh.) to the northeast, and Chupaca (53 263 inh.) to the southeast. It was also noted that high concentrations of BC are associated with strong winds ranging from 5 a 7 m/s and also winds with an easterly direction. Biomass burning in the Amazon Basin (Brazil, Bolivia and Peru) and the trans boundary transport of air pollutants could explain these observations.

*Subject headings:* Aerosols — modeling — climate change.

### 1. INTRODUCCIÓN

El carbono negro (CN) es un compuesto carbonáceo, formado en la combustión incompleta de los combustibles fósiles, tiene propiedades físicas

<sup>†</sup>lsuarez@igp.gob.pe

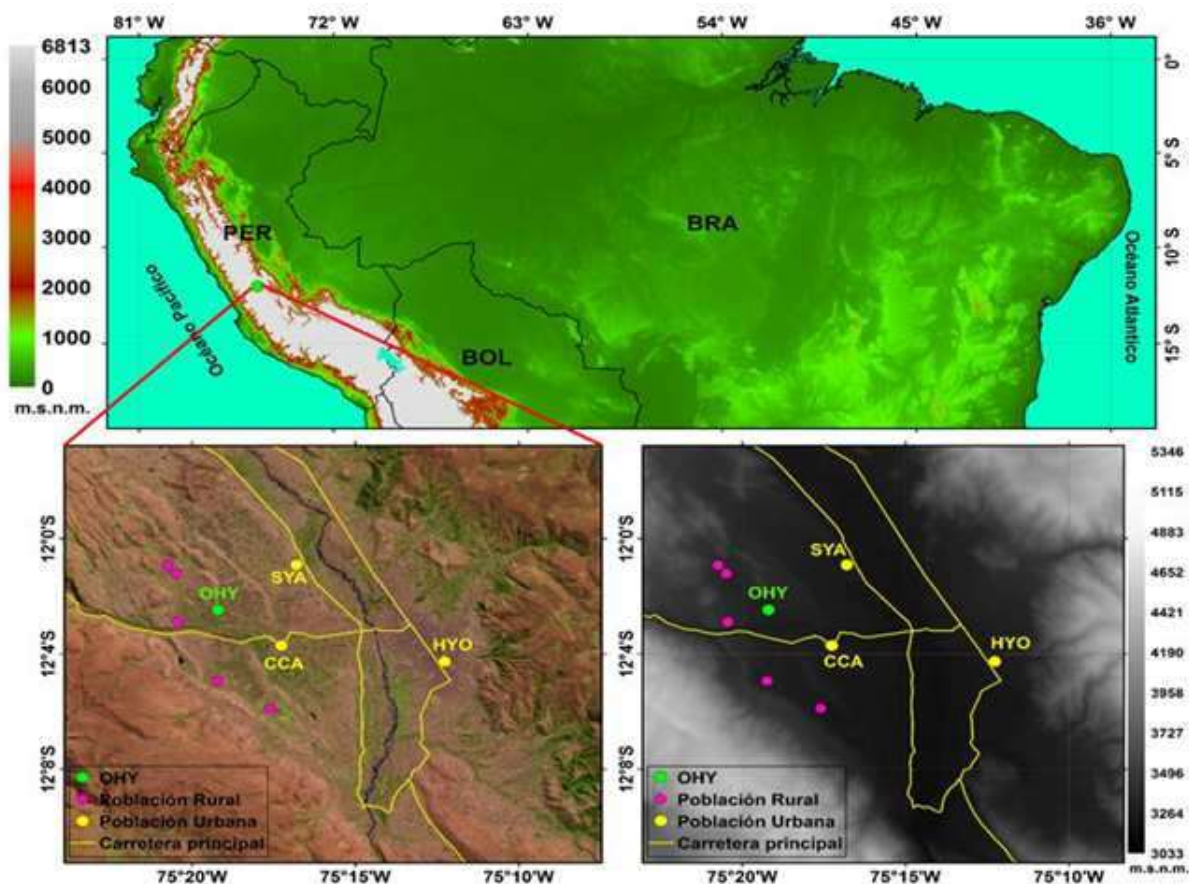


FIG. 1.— Ubicación del Observatorio de Huancayo (punto verde), poblaciones urbanas (puntos amarillos) y poblaciones rurales (puntos rosados) y carreteras principales (líneas amarillas).

únicas, absorbe fuertemente luz visible especialmente a 880 nm, es refractario con una temperatura de vaporización cerca de 4000 K, es insoluble en agua y disolventes orgánicos y en la atmósfera se encuentra en forma de agregados (Bond et al. 2013). Dentro de los compuestos carbonáceos se puede distinguir también al carbono marrón (C<sub>Ma</sub>), formado en la quema de biomasa, absorbe luz visible a 370 nm y también dispersa, el conocimiento de sus propiedades físicas y microfísicas aún son limitadas (Chen et al. 2016).

El CN puede afectar principalmente al clima de dos maneras: Por un lado, al estar suspendido en la atmósfera produce un forzamiento radiativo positivo debido a que absorbe fuertemente la radiación visible haciendo que la atmósfera se caliente. Bond et al. (2013) han evaluado el forzamiento radiativo directo del CN, llegando a estimar  $0.71 \text{ W/m}^2$  con un nivel de incertidumbre del 90%.

De otro lado, al depositarse en la nieve y en el hielo por vía seca o húmeda, reduce el albedo ocasionando mayor calentamiento y por ello mayor fusión. En un estudio realizado por Jacobi et al. (2015) en los glaciares del Himalaya estimaron mediante modelos que la deposición de CN puede reducir el albedo en 2.70% y 6.00% en presencia de 100 y 300  $\text{ng-CN/g}^1\text{-H}_2\text{O}$ . También en otro estudio realizado por Yasunari et al. (2010) en la misma región, esti-

maron mediante modelos que la reducción del albedo en 2.00% y 5.20% siendo esto continuo para todo el año, darían lugar a un aumento de la escorrentía entre 70 - 204 mm de agua.

En la salud, el CN tendría potencialmente serios efectos respiratorios luego de la inhalación a largo plazo debido a su pequeño tamaño (con diámetros del orden de nanómetros), las partículas de CN pueden llegar a la región alveolar, llevando consigo especies químicas tóxicas depositadas sobre su superficie porosa (Janssen et al. (2012)). También, estos tienden a acumularse en los organismos, la limitada evidencia de reacción en humanos y animales sugieren que los efectos pulmonares son significativos e irreversibles, estos pueden ocurrir con exposiciones a altas concentraciones por vía aérea ( $10\text{-}100 \mu\text{g/m}^3$ ), según C.C.O.H.S. (2006).

Debido a su importancia tanto en el clima como en la salud, en este estudio se muestran las primeras mediciones de CN realizadas en el Observatorio de Huancayo desde junio hasta diciembre del 2015; además, se identificaron las principales zonas de donde proviene este compuesto.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Sitio de monitoreo

El Laboratorio de Microfísica Atmosférica y Radiación (LAMAR) se ha instalado el 2015 en el Obser-

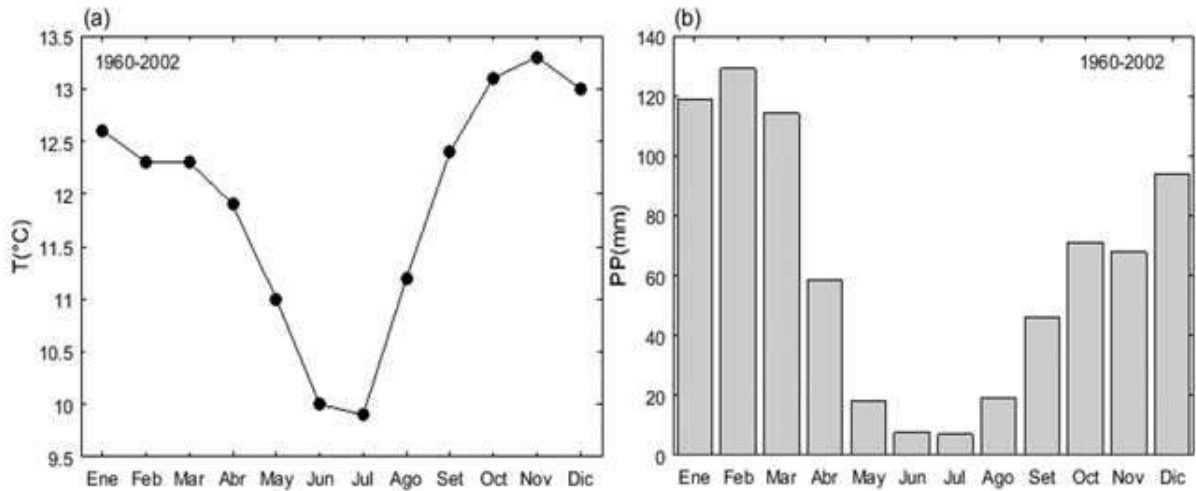


FIG. 2.— Climatología de temperatura media del aire a 2 metros (a) y precipitación (b) en el Observatorio de Huancayo. Fuente: datos del SENAMHI e IGP.

vatorio de Huancayo (OHY), está ubicado a una latitud de  $12^{\circ} 02' 18''$  Sur, longitud  $75^{\circ} 19' 22''$  Oeste y altitud de 3 330.0 msnm. Donde, se vienen realizando mediciones de las propiedades físicas y microfísicas de la atmósfera, dentro de ellas se encuentran los aerosoles atmosféricos, teniendo especial interés por el CN. La Fig. 1 muestra la ubicación del OHY respecto a las poblaciones asentadas a su alrededor, entre las principales las principales poblaciones urbanas se encuentran Huancayo (HYO), Chupaca (CCA), Sicaya (CYA). Cabe indicar también que en las áreas colindantes al OHY se practica la agricultura intensivamente.

### 2.2. Climatología del sitio

La temperatura media del aire presenta valores más bajos en julio y los máximos en noviembre; del mismo modo, las precipitaciones tienen gran variabilidad estacional, estando enmarcados por una estación seca entre mayo y agosto, y una estación lluviosa entre septiembre y abril. Cerca del 86% de la precipitación anual ocurre de septiembre a abril. Casi la mitad de la precipitación anual 49% se concentra en los meses de enero a marzo, considerándolo como el pico de la estación lluviosa (Silva et al. (2008), ambos parámetros se pueden observar en la Fig. 2.

### 2.3. Etalómetro

Mediciones en tiempo real y continuo de CN se llevaron a cabo con un etalómetro (aethalometer) modelo AE33 fabricado por Magee Scientific de Eslovenia. El etalómetro utiliza una técnica de transmisión óptica, mide las pérdidas de señales en 7 longitudes de onda (370, 470, 520, 590, 660, 880 y 950 nm) debido a la absorción de las partículas cargadas en un filtro. El instrumento aspira el aire a través de un tubo montado verticalmente, a una altura de 2 metros del nivel del techo, y de unos 5 metros del nivel del suelo. Esta ubicación fue definida como un lugar sin interferencias cercanas y no tener influen-

cia directa del polvo del suelo ni del techo. En la entrada de la toma de muestra se colocó un ciclón de  $2.5 \mu\text{m}$  para evitar partículas gruesas. Las partículas en el flujo de aire entrante se depositan en el filtro de politetrafluoroetileno (PTFE), que opera continuamente a un flujo de 5 litros por minuto (LMP) y las mediciones se registran para una solución de tiempo de 1 minuto de duración a condiciones estándar (1 013.25 hPa y  $25^{\circ}\text{C}$ ), durante todo el día. Más detalles del instrumento y su funcionamiento se discuten en Drinovec et al. (2015).

La concentración de CN se calcula a partir del cambio de atenuación óptica (ATN) a 880 nm en cualquier intervalo de tiempo seleccionado, con una sección transversal de absorción de masa ( $\sigma$ ) de  $7,77 \text{ m}^2/\text{g}^1$ . A esta longitud de onda, otros aerosoles (carbonáceos o minerales) absorben significativamente menos y la absorción se puede atribuir solo al CN (Fialho et al. 2005; Sandradewi et al. 2008a,b). Para calcular la ATN en el filtro cargado de partículas, se emplea la Ec. (1).

$$ATN = -100 \cdot \ln \left( \frac{I}{I_0} \right), \quad (1)$$

donde  $I$  es la intensidad de señal que ha interactuado con el filtro cargado de partículas e  $I_0$  es la intensidad de señal que ha interactuado con el filtro sin partículas; siendo 100 el factor por conveniencia (Gundel et al. 1984).

Muchos trabajos estaban orientados a corregir el efecto de carga en el filtro, para compensar las subestimaciones con respecto a otros aerosoles presentes en la muestra que tienen la capacidad de dispersar la energía en la misma longitud de onda y también al momento de avance del filtro; entre estos trabajos se puede mencionar los de Weingartner et al. (2003); Virkkula et al. (2007); Rizzo et al. (2011). El nuevo modelo AE33 ha implementado una nueva forma para corregir el efecto de carga en el filtro en tiempo real; se trata de la nueva tecnología “dual-spot”, la cual hace que la misma muestra pase por dos puntos

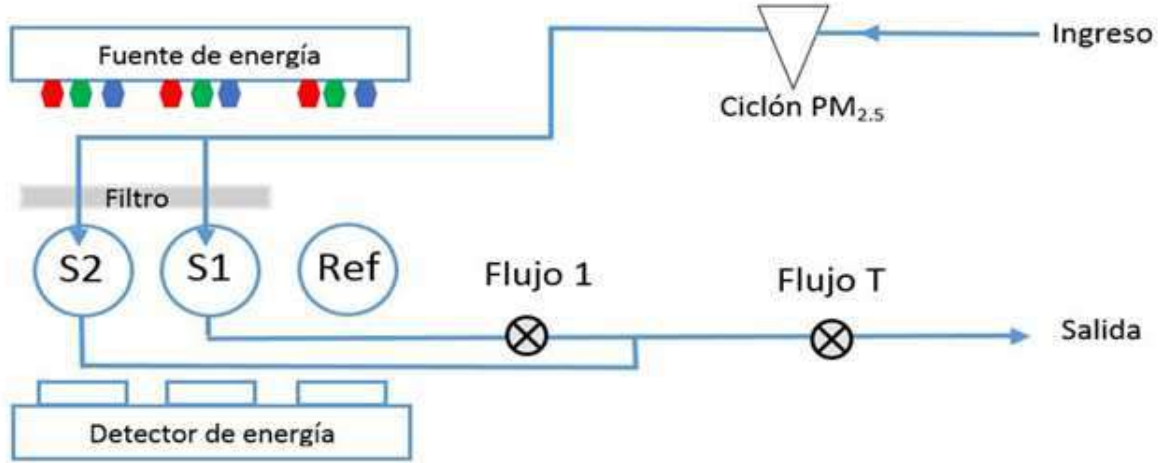


FIG. 3.— Diagrama básico del aethalometer modelo AE33.

a diferentes flujos. Lo anterior, se puede observar el esquema básico representado en la Fig. 3, y con base en ello se construyen empíricamente las Ecs. (2) y (3) que se muestran a continuación:

$$e^{-\sigma k B_1} = (1 - k \cdot ATN_1), \quad (2)$$

$$e^{-\sigma k B_2} = (1 - k \cdot ATN_2), \quad (3)$$

donde  $B_1$  y  $B_2$  son velocidades de cambio del filtro,  $k$  es el parámetro del efecto de carga,  $ATN_1$  y  $ATN_2$  son las atenuaciones determinadas por la Ec. 1. Resolviendo las Ecs. (2)–(3) por algún método numérico, se determina  $k$ , siendo este autoadaptable para cada situación de muestreo.

Para identificar las fuentes de emisión de combustión incompleta ( $ci$ ) y quema de biomasa ( $qb$ ), se recurrió al algoritmo de Sandradewi et al. (2008a) el cual plantea, que identificar estas fuentes es posible debido a su dependencia espectral. Basado en sus resultados plantea las Ecs. (4), (5) y (6) que se muestran a continuación:

$$\frac{b_{abs}(370nm)_{ci}}{b_{abs}(950nm)_{ci}} = \left( \frac{370nm}{950nm} \right)^{-\alpha_{ci}}, \quad (4)$$

$$\frac{b_{abs}(370nm)_{qb}}{b_{abs}(950nm)_{qb}} = \left( \frac{370nm}{950nm} \right)^{-\alpha_{qb}}, \quad (5)$$

$$b_{abs}(\lambda) = b_{abs}(\lambda)_{ci} + b_{abs}(\lambda)_{qb}, \quad (6)$$

donde  $b_{abs}$  es el coeficiente de absorción,  $\alpha_{ci}$  y  $\alpha_{qb}$  son los exponentes de absorción de combustión incompleta y quema de biomasa respectivamente. Este algoritmo está implementado en el etalómetro modelo AE33, donde se registra, medidas de porcentaje y así saber cuánto es el aporte por quema de biomasa (%qB) en la concentración del CN.

#### 2.4. Anemómetro ultrasónico

Mediciones continuas de velocidad y dirección de viento se llevaron a cabo con un anemómetro ultrasónico modelo 81000 fabricado por Young de Esta-

dos Unidos. Este anemómetro opera en modo de impulsos acústicos, mide las tres componentes ortogonales ( $u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$ ) del viento y la velocidad del sonido ( $C$ ) a una frecuencia máxima de 32 Hz.

#### 2.5. Modelo de dispersión

Para identificar las zonas de donde proviene el CN al OHY. Se utilizó un modelo de dispersión que representa diagramas polares de dos variables, el cual consiste en mostrar la evolución de algún contaminante con respecto a la distribución de la velocidad y dirección del viento. Para determinar las componentes bivariantes del viento ( $u$ ) y ( $v$ ) se emplea la Ec. (7).

$$\begin{aligned} u &= \bar{u} \cdot \cos(2\pi\theta), \\ v &= \bar{u} \cdot \sin(2\pi\theta), \end{aligned} \quad (7)$$

donde  $\bar{u}$  es la velocidad media del viento y  $\theta$  es la dirección media del viento por hora. Para evaluar la evolución de algún contaminante con respecto a la interacción con la velocidad y dirección del viento se emplea la Ec. (8).

$$\sqrt{C_i} = f(u, v) + e_i, \quad (8)$$

donde  $C_i$  es la concentración del contaminante y  $e_i$  es un residual. Aplicando un modelo aditivo generalizado se encuentran las frecuencias para las mediciones realizadas.

Para nuestro estudio se empleó la librería Openair desarrollada por Carslaw et al. (2006) en lenguaje R y dentro de esta se encuentra la función polarplot, la cual contiene todas las ecuaciones mencionadas para identificar las zonas de donde provienen los contaminantes.

#### 2.6. Procesamiento de datos

Para el procesamiento de los datos de CN adquiridos con el etalómetro se siguió el procedimiento establecido por Rizzo et al. (2011), el cual plantea tres niveles. En este estudio se realizó solo el nivel 1, donde se revisó el flujo de la muestra, debiendo estar entre 1 LMP y 8 LMP, también se revisó las con-

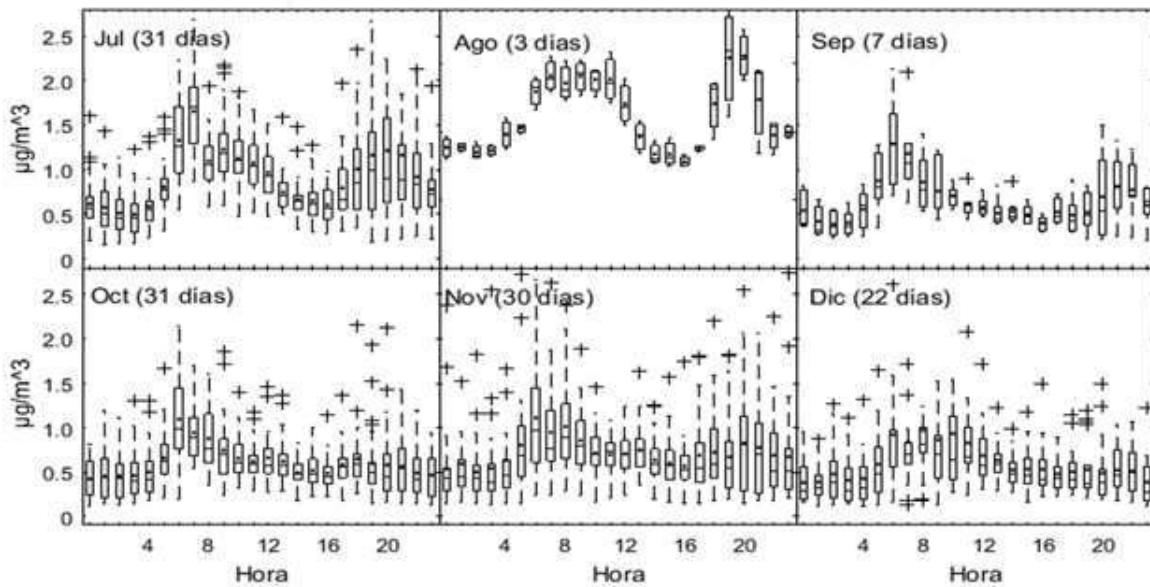


FIG. 4.— Variación horaria de la concentración de CN en el Observatorio de Huancayo.

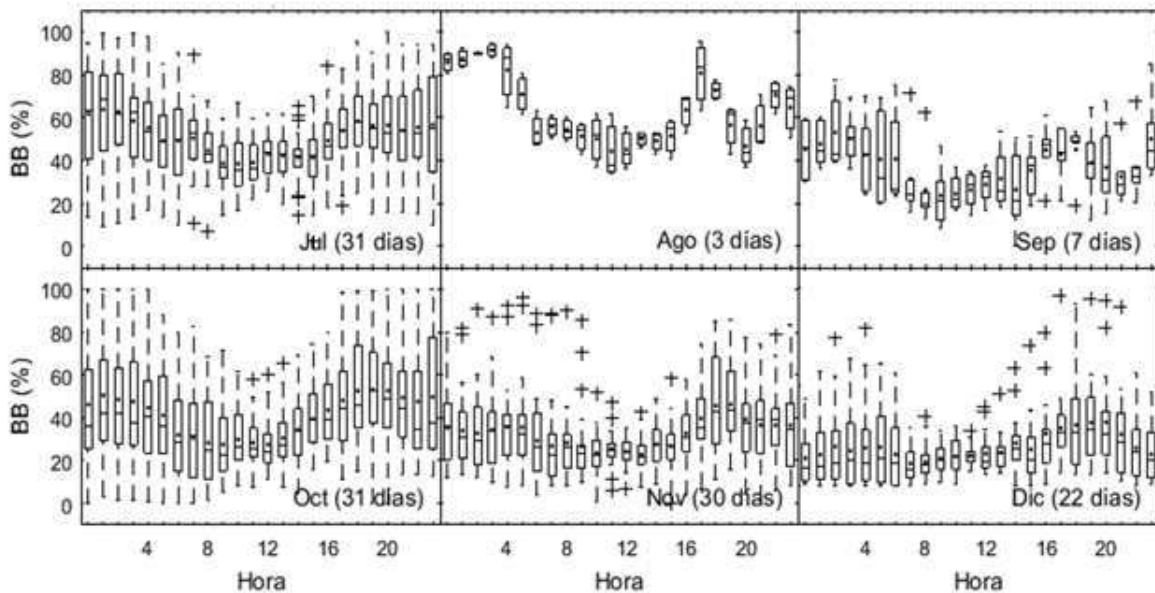


FIG. 5.— Variación horaria del aporte de %qB en el Observatorio de Huancayo.

centraciones de CN debiendo estar entre  $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Al obtener una serie de tiempo, se observó que pocos valores de CN se encontraron por encima de  $4.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Estos valores fueron eliminados debido a que estos probablemente se debieron a fuentes muy cercana, tales como un vehículo o un incendio cerca al OHY (Hansen, comunicación personal).

El procesamiento de los datos de velocidad y dirección de viento adquiridos con el anemómetro sónico, consistió en revisar que no tuvieran valores anómalos y solo se utilizó la componente zonal ( $u_x$ ) del viento.

Terminado con el procesamiento de los datos, se

construyó un fichero conteniendo los datos de velocidad y dirección de viento; además de la concentración de CN por minuto en un archivo en formato "comma-separated values" (CSV por sus siglas en inglés) para su fácil manejo en los softwares R y Matlab.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Variación horaria de CN y %qB

Con respecto a la variación horaria de la concentración de carbono negro (CN), este parámetro mostró variabilidad bien marcada a lo largo del día. Se observó dos picos máximos bien definidos para los seis meses representados en la Fig. 4. El primer pico se presentó por la mañana de 06:00 a 09:00 y el se-

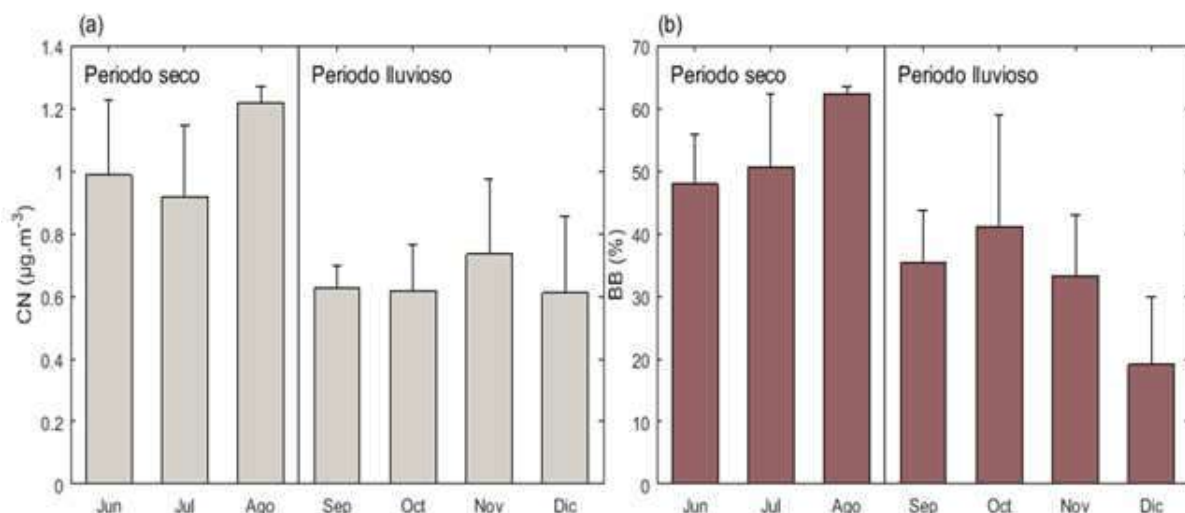


FIG. 6.— Variación mensual de: (a) concentración de carbono negro y (b) porcentaje proveniente de la quema de biomasa.

gundo pico por la tarde de 17:00 a 21:00 hora local (HL). Entre estas horas, el tráfico vehicular es mayor, asociado a las emisiones por quema de biomasa por parte de las (pollerías a carbón y restaurantes, entre otros). La variación horaria encontrada en el OHY es similar a la reportada en otros estudios realizados en Brasil (Krecl et al. 2016) y en India (Reshma et al. 2015), donde señalaron que la variación horaria de la concentración de CN presenta dos picos máximos: en Brasil en días laborables, presentándose el primer pico por la mañana de 07:00 a 08:00 y el segundo pico por la tarde de 18:00 a 19:00 HL; en tanto que en India, el primer pico ocurre durante la mañana de 06:00 a 08:00 y el segundo pico por la tarde 19:00 a 21:00 HL.

Con respecto a la variación horaria de CN proveniente de la quema de biomasa (%qB), este parámetro también mostró variabilidad a lo largo del día. Se observaron dos picos máximos bien definidos representado en la Fig. 5. El primer pico se presentó por la tarde 13:00 a 17:00 HL y el segundo pico a de 00:00 a 05:00 HL.

### 3.2. Variación mensual del CN y %qB

Los promedios mensuales de CN medidos en los aerosoles colectados en el OHY se representan en la Tabla 3.2. Se observó que la concentración promedio de CN durante el periodo estudiado fue  $0.81 \pm 0.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , que es similar a los valores reportados en otros estudios como los realizados en India por Panwar et al. (2013) y en Boston por Allen (2014), con promedios anuales de  $0.85 \pm 0.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $0.70 \pm 0.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente. Pero es menor cuando se trata de estaciones urbanas como el trabajo realizado en China por Feng et al. (2014) y también en India por Reshma et al. (2015), con promedios anuales de  $3.80 \pm 0.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $2.20 \pm 0.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente. El valor máximo se obtuvo el 24 de junio a las 20:00 HL con  $3.85 \pm 0.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y el valor mínimo fue el 13 de diciembre a la 01:00 HL con  $0.11 \pm 0.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Hay que precisar que durante los meses estu-

diados hubo días donde no se realizaron mediciones. Esto debido a inconvenientes con la fuente energía del sistema de monitoreo. Como es el caso del mes de agosto donde se tiene el promedio mensual más alto  $1.23 \pm 0.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$  siendo lo anterior una tendencia atípica, por lo que se estima que no es representativa para dicho mes. Lo anterior, es debido a que solo se contaron con 3 días de mediciones y es posible que en estos días las concentraciones de CN fueron altas. Por otro lado, el mes de septiembre, aparentemente sí muestra una tendencia normal pese a haber solo 7 días de mediciones.

Los promedios porcentuales mensuales de CN proveniente de la quema de biomasa (%qB) en el OHY están representados en la Tabla 3.2. Se observó que para todo el periodo de estudio, una fuente importante de CN en el OHY es la quema de biomasa, contribuyendo con  $41.27 \pm 12.84\%$ , que es similar a los valores reportados en otros estudios realizados por Bond et al. (2013) y Ramanathan & Carmichael (2008) donde señalaron que la quema de biomasa es un gran contribuyente a las emisiones globales de CN, llegando a aportar cerca del 40% del total, en ambos trabajos, Sin embargo, en el trabajo de Sandradewi et al. (2008a), los autores reportaron que la quema de biomasa contribuye en 51% siendo mayor a nuestro valor; esto podría estar sucediendo debido a que en el lugar de estudios de Sandradewi et al. (2008a), la población utiliza estufas a leña.

### 3.3. Variación del CN y %qB en el periodo seco y lluvioso

También se evaluó la variación de la concentración CN y %qB para el periodo seco y lluvioso, representados en la Fig. 6. Se aplicó la prueba estadística U de Mann Whitney para evaluar si existen diferencias significativas en ambos parámetros. Al comprobar que nuestros datos no tienen distribución normal. Se observó que en ambos parámetros existen diferencias significativas con p-valor de  $9.62 \times 10^{-10}$  y  $4.29 \times 10^{-10}$ , respectivamente. En el periodo seco

TABLA 1

MEDIA, DESVIACIÓN ESTÁNDAR (DESV. ST.), MÁXIMO VALOR (MAX.) EXPRESADOS EN ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) Y (%) NÚMERO DE DÍAS MEDIDOS (N) EN EL OBSERVATORIO DE HUANCAYO.

Estadístico/Mes	CN			%qB			N
	Media	Desv. St.	Max.	Media	Desv. St.	Max.	
Junio	0.95	$\pm 0.59$	3.85	44.89	$\pm 21.95$	100.00	30
Julio	0.91	$\pm 0.54$	3.26	50.74	$\pm 19.00$	100.00	31
Agosto	1.23	$\pm 0.56$	2.85	63.40	$\pm 17.14$	95.32	3
Septiembre	0.65	$\pm 0.34$	2.13	36.83	$\pm 16.57$	84.98	7
Octubre	0.61	$\pm 0.33$	2.16	40.99	$\pm 24.60$	100.00	31
Noviembre	0.72	$\pm 0.47$	3.51	32.68	$\pm 17.55$	96.14	30
Diciembre	0.60	$\pm 0.47$	4.32	19.66	$\pm 17.42$	96.27	22
General	0.81	$\pm 0.22$		41.27	$\pm 12.84$		

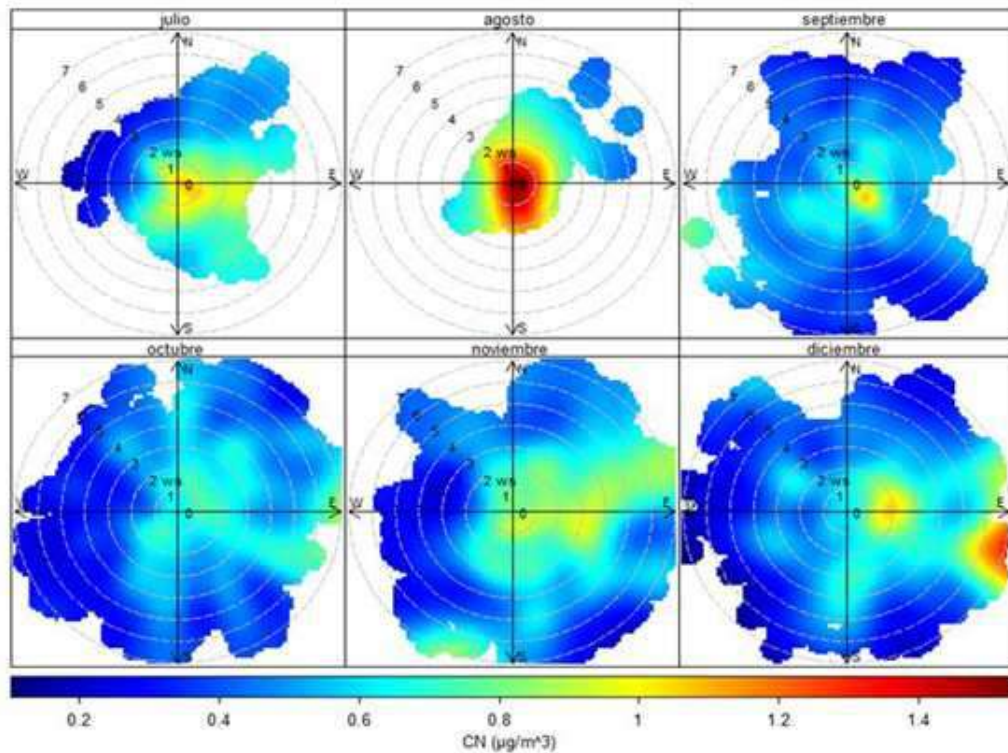


FIG. 7.— Diagrama polar de dos variables, variación mensual de la concentración de CN representado en ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

el promedio de la concentración de CN fue  $0.95 \pm 0.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y de %qB fue  $51.11 \pm 11.18\%$ . Mientras que en periodo lluvioso fue  $0.65 \pm 0.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $32.64 \pm 15.74\%$ , respectivamente. En el trabajo de Tiwari et al. (2016) encontraron que las concentraciones del Material Particulado (PM) eran más bajas durante días de lluvia. El lavado de lluvia y la deposición húmeda son los mecanismos más eficaces para la limpieza de contaminantes atmosféricos (Yamagata et al. 2009). En lo que respecta al aporte de la quema de biomasa en el periodo lluvioso no solo el factor meteorológico influye en la disminución de %qB, si no también existe una disminución considerable de la quema de biomasa por parte de los agricultores en la región.

#### 3.4. Identificación de las principales zonas contribuyentes de CN

Los diagramas polares de dos variables han demostrado ser extremadamente valiosos para identificar y comprender las fuentes de contaminación del aire (Carslaw et al. 2006; Westmoreland et al. 2007). Estos gráficos muestran cómo la concentración de algún contaminante atmosférico varía según la velocidad y dirección del viento. Para nuestro estudio se realizaron representaciones de diagramas polares mensuales (ver Fig. 7). En la temporada seca (julio y agosto) se observó que altas concentraciones de CN provienen de todas partes, siendo más relevante del ESTE con vientos débiles con velocidades que van de 0 a 4 m/s. Las fuentes principales en esta temporada son las quemas de biomasa por parte de los agricultores locales y las poblaciones urbanas (HYO, SYA, CCA) representadas en la Fig. 1(b). En la temporada lluviosa (septiembre, octubre, noviembre y diciembre) se observa altas concentraciones

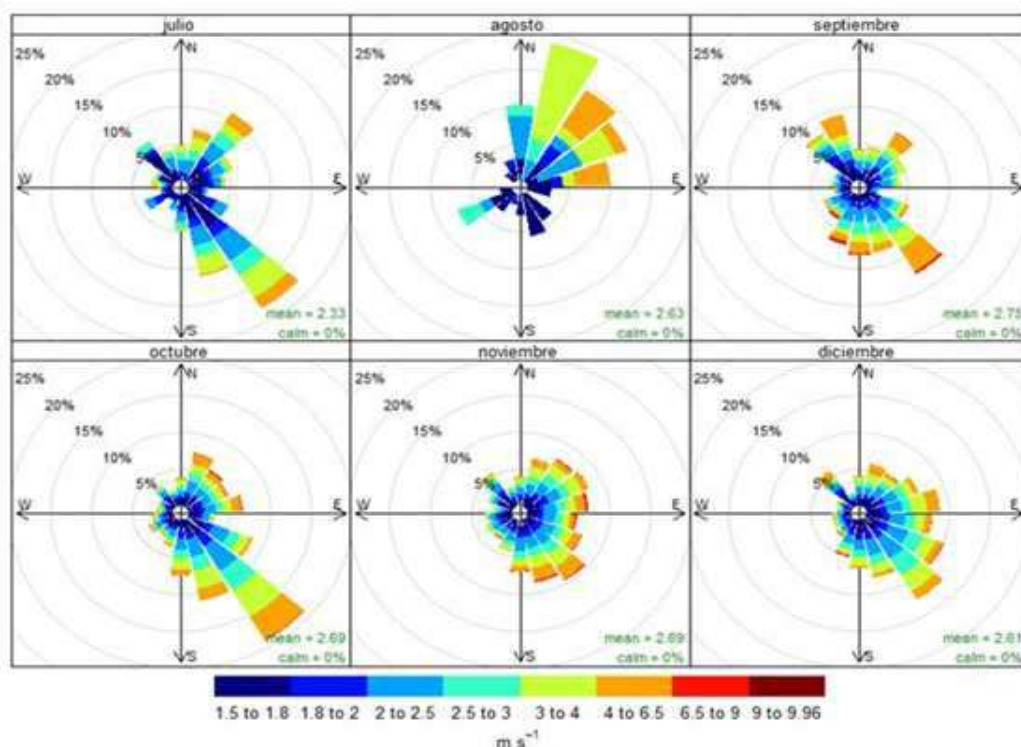


FIG. 8.— Rosa de vientos mensual  $> 1.5 \text{ m/s}^1$  en el Observatorio de Huancayo.

de CN provienen del este asociado a vientos fuertes con velocidades que van de 5 a 7 m/s. La fuente importante en esta temporada podría ser el transporte transfronterizo de los contaminantes generados por la quema de biomasa que ocurren en la cuenca del Amazonas. Estudios como los de Andreae et al. (2012); Suarez (2015) y Bourgeois et al. (2015) han observado que los contaminantes atmosféricos producto de la quema de biomasa (gases y partículas) son transportados de este a oeste, de la cuenca del Amazonas a la Cordillera de los Andes. En general, altas concentraciones de CN en el OHY se generan bajo condiciones atmosféricas inestables cuando los vientos son fuertes y estables cuando los vientos son débiles. Para observar una relación directamente proporcional de la concentración de CN y la velocidad del viento la fuente de emisión deberá ser flotante, en estas fuentes se encuentra los incendios de gran magnitud. Mientras que bajo condiciones atmosféricas estable. Para observar una relación inversamente proporcional de la concentración de CN y la velocidad del viento; las fuentes deberán ser del nivel del suelo no flotante, entre estas fuentes se encuentran el transporte por carretera y las poblaciones rurales y urbanas (Uria-Tellaetxea & Carslaw 2014).

#### 4. CONCLUSIONES

Las mediciones de carbono negro realizadas en el Observatorio de Huancayo muestran variabilidad a lo largo del día adoptando dos picos máximos bien

marcados, el primero se presenta por la mañana de 05:00 a 09:00 y el segundo por la tarde de 17:00 a 21:00 HL. El aporte de la quema de biomasa a la concentración de carbono negro (%qB) también presenta variabilidad a lo largo del día adoptando dos picos máximos bien marcados, el primero se presenta de 13:00 a 17:00 y el segundo de 00:00 y 05:00 HL. Ambos parámetros muestran diferencias significativas tanto en el periodo seco y lluvioso. También se identificó que la quema de biomasa aporta en 41.27% a la concentración de carbono negro siendo un valor importante.

Altas concentraciones de carbono negro provienen de todas partes, siendo más dominante las provenientes de la dirección este con vientos que llegan hasta 4 m/s, en esta dirección se encuentran algunas poblaciones urbanas de la región como Sicaya, Huancayo y Chupaca. Todas las emisiones de carbono negro generadas en estos ambientes urbanos son transportadas al Observatorio de Huancayo. También se observaron altas concentraciones de carbono negro provenientes del sector este con vientos fuertes que van de 5 a 7 m/s. La quema de biomasa en la cuenca Amazónica (Brasil, Bolivia y Perú) y el transporte transfronterizo de los contaminantes atmosféricos explicarían dichas observaciones.

#### Conflicto de intereses

Los autores declaran que no hay conflicto de intereses con respecto a la publicación de éste documento.

#### REFERENCIAS

Allen, G. (2014), *Analysis of Spatial and Temporal Trends of Black Carbon* (<http://www.nescaum.org/documents/analysis-of-spatial-and-temporal-trends-of-black-carbon-in-boston/>)

Andreae, M., Artaxo, P., Beck, V., Bela, M., Freitas, S., Gerbig, C., Longo, K., Munger, J., Wiedemann, K., & Wofsy, S. (2012), *Atmos. Chem. Phys.*, **12**, 6041

- Bond, C. T., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., DeAngelo, B. J., Flanner, M. G., Ghan, S., Kärcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P. K., Sarofim, M. C., Schultz, M. G., & Schultz, M. (2013), *J. Geophys. Res.*, **118**, 5380
- Bourgeois, Q., Ekman, A., & Krejci, R. (2015), *J. Geophysical Res.*, **120**, 8411
- Carshaw, D., Beevers, S., Ropkins, K., & Bell, M. (2006), *Atm. Environ.*, **40**, 5424
- C.C.O.H.S. (2006), *Black Carbon-Effects in the Health* (Canadian National Resource for Occupational Safety and Health). (<https://www.ccohs.ca/headlines/text186.html>)
- Chen, Y., Schleicher, N., Fricker, M., Cen, K., Lui, X., Kaminski, U., Yu, Y., Wu, X., & Norra, S. (2016), *Env. Pol.*, **212**, 269
- Drinovec, L., Mocnik, G., Zotter, P., Prévot, A. S. H., Ruckstuhl, C., Coz, E., Rupakheti, M., Sciare, J., Müller, T., Wiedensohler, A., & Hansen, A. D. A. (2015), *Atmos. Meas. Tech.*, **8**, 1965
- Feng, J., Zhong, M., Xu, B., Du, Y., Wu, M., Wang, H., & Chen, C. (2014), *Atmos. Res.*, **147**, 1
- Fialho, P., Hansen, A., & Honrath, R. (2005), *J. Aerosol Sci.*, **36**, 267
- Gundel, L. A., Dod, R. L., Rosen, H., & Novakov, T. (1984), *Sci. Total Environ.*, **36**, 197
- Jacobi, H., Lim, S., Ménégos, M., Ginot, P., Laj, P., Bonasoni, P., Stocchi, P., Marinoni, A., & Arnaud, Y. (2015), *The Cryosphere*, **9**, 1685
- Janssen, N., Gerlofs, M., Lanki, E., Cassee, F., Hoek, G., Fisher, P., Brunekreef, B., & Krzyzanowski, M. (2012), *Health Effects of Black Carbon* (World Health Organization Regional Office for Europe)
- Krecl, P., Créso, A., Wiese, L., Ketzler, M., & Paula, M. (2016), *Atm. Pollut. Res.*, **7**, 1022
- Panwar, T., Hooda, R. K., Lihavainen, H., Hyvarinen, A. P., Sharma, V. P., & Viisanen, Y. (2013), *Environ. Monit. Assess.*, **185**, 4753
- Ramanathan, V. & Carmichael, G. (2008), *The Nature*, **1**, 221
- Reshma, G., Viswanath, C., Nazeer, Y., Raghavendra, K., Suresh, S., & Reddy, R. (2015), *Atm. Res.*, **171**, 77
- Rizzo, L. V., Correia, A. L., Artaxo, P., Procópio, A. S., & Andreae, M. O. (2011), *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 8899
- Sandradewi, J., Prévot, A., Weingartner, E., Schmidhauser, R., Gysel, M., & Baltensperger, U. (2008a), *Atmos. Environ.*, **42**, 101
- Sandradewi, J., Prévot, A., Szidat, S., Perron, N., Alfarra, M. R., Lanz, V. A., Weingartner, E., & Baltensperger, U. (2008b), *Environ. Sci. Technol.*, **42**, 3316
- Silva, Y., Takahashi, K., & Chávez, R. (2008), *Adv. Geosci.*, **14**, 261
- Suarez, L. (2015), *Transboundary air pollution in Southern Amazon of Peru* (Unpublished. <https://doi.org/10.13140/rg.2.1.1453.6161>)
- Tiwari, S., Kumar, R., Tunved, P., Singh, S., & Panicker, A. S. (2016), *Sci. Total Environ.*, **15**, 504
- Uria-Tellaetxea, I. & Carshaw, D. (2014), *Environ. Modell. Softw.*, **59**, 1
- Virkkula, A., Mäkelä, T., Hillamo, R., Yli-Tuomi, T., Hirsikko, A., a. H. K., & Koponen, I. (2007), *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **57**, 1214
- Weingartner, E., Saathoff, H., Schnaiter, M., Streit, N., Bitnar, B., & Baltensperger, U. (2003), *J. Aerosol Sci.*, **34**, 1445
- Westmoreland, E., Carshaw, N., Carshaw, D., Gillah, A., & Bates, E. (2007), *Atm. Environ.*, **41**, 9195
- Yamagata, S., Kobayashi, D., Ohta, S., Murao, N., Shiobara, M., Wada, M., Yabuki, M., Konishi, H., & Yamanouchi, T. (2009), *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 261
- Yasunari, T. J., Bonasoni, P., Laj, P., Fujita, K., Vuillermoz, E., Marinoni, A., Cristofanelli, P., Duchi, R., Tartari, G., & Lau, K. M. (2010), *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 6603

## INTERACCIONES EFECTIVAS DE LARGO ALCANCE EN UNA RED EN LA APROXIMACIÓN SEMICLÁSICA<sup>†</sup>

### LONG-RANGE EFFECTIVE INTERACTIONS IN A LATTICE IN THE SEMICLASSICAL APPROXIMATION

EVARISTO MAMANI<sup>††</sup>, M. CALCINA-NOGALES, DIEGO SANJINÉS

Carrera de Física  
Universidad Mayor de San Andrés  
c. 27 Cota-Cota, Casilla de Correos 8635, La Paz, Bolivia  
(Recibido 31 de agosto de 2016; aceptado 13 de enero de 2017)

#### RESUMEN

Consideramos el modelo semiclásico de enlace fuerte *extendido* con un hamiltoniano que comprende interacciones a primeros y a segundo vecinos para una partícula cargada que se traslada en una red (por el mecanismo de *hopping*) en presencia de un campo estático arbitrario y un campo uniforme rápidamente oscilante. La aplicación del método de Kapitza permite obtener un hamiltoniano efectivo independiente del tiempo con elementos de salto (*hopping*) que dependen de los campos externos estático y oscilante. Nuestros cálculos muestran que la aproximación semiclásica es bastante buena pues se obtiene, para un campo oscilante homogéneo, los mismos elementos de salto que se derivan del formalismo cuántico. Además, controlando el campo oscilante, podemos manipular las interacciones de tal forma de suprimir lo que serían las interacciones dominantes (a primeros vecinos) y dejar así como efectos observables aquellos debidos a lo que de otra manera serían las interacciones remanentes (con vecinos distantes).

Código(s) PACS: 42.50.Ct — 03.65.Sq — 72.10.Bg

*Descriptores:* Hamiltoniano efectivo — aproximación semiclásica — modelo de enlace fuerte

#### ABSTRACT

We consider the semiclassical model of an *extended* tight-binding Hamiltonian comprising nearest- and next-to-nearest neighbor interactions for a charged particle hopping in a lattice in the presence of a static arbitrary field and a rapidly oscillating uniform field. The application of Kapitza's method yields a time independent effective Hamiltonian with long range hopping elements that depend on the external static and oscillating fields. Our calculations show that the semiclassical approximation is quite reliable as it yields, for a homogeneous oscillating field, the same effective hopping elements as those derived within the quantum approach. Furthermore, by controlling the oscillating field, we can engineer the interactions so as to suppress the otherwise dominant interactions (nearest neighbors) and leave as observable effects those due to the otherwise remanent interactions (distant neighbors).

*Subject headings:* Effective Hamiltonian — semiclassical approximation — tight-binding model

#### 1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la dinámica electrónica en redes cristalinas de estado sólido adquirió recientemente un renovado interés en vista de la factibilidad de técnicas experimentales y la posibilidad de imitar (emular) dichos fenómenos dinámicos, por ejemplo, en arreglos de guías de onda ópticas (Dreisow et al.

2011; Marte & Stenholm 1997; Lenz 1999; Longhi et al. 2006; Longhi 2007, 2009; Longhi et al. 2010). De estos efectos, aquellos que resultan de la aplicación de un campo eléctrico externo AC homogéneo son relevantes para dilucidar fenómenos de transporte como, por ejemplo, localización dinámica, control coherente de tunelamiento, transiciones metal-aislante y dinámica de átomos en trampas (Dunlap & Kenkre 1986; Rahav et al. 2003; Bandyopadhyay & Dattagupta 2008). Si, además, los campos AC se consideran como perturbaciones de alta frecuencia, es posible entonces aplicar un método de promediación temporal (debido originalmente a P.

<sup>†</sup>Traducción autorizada de “Long-range effective interactions in a lattice in the semiclassical approximation”, E. Mamani, M. Calcina-Nogales and D. Sanjinés, *International Journal of Modern Physics B* **31** (2017) 1750116. DOI:10.1142/S0217979217501168

<sup>††</sup>evaristomamanicarlo@gmail.com

L. Kapitza para el estudio del péndulo invertido (Kapitza 1951; Landau & Lifschitz 1985) a fin de obtener un hamiltoniano efectivo independiente del tiempo para una red de enlace fuerte. Nuestros resultados permiten manipular las constantes efectivas de tunelamiento en la red, lo que puede ser útil para imitar ciertos fenómenos del estado sólido (Itin & Neishtadt 2014; Itin & Katsnelson 2015). De hecho, fue en estos trabajos donde encontramos el efecto interesante de una interacción a segundos vecinos que surge por la acción conjunta de un campo uniforme rápidamente oscilante y un potencial estático cuadrático. Este resultado, que fue deducido en Itin & Neishtadt (2014) y Itin & Katsnelson (2015) aplicando la técnica de promediación temporal de Kapitza a un hamiltoniano de enlace fuerte, también se puede obtener de manera exacta usando el modelo semiclásico<sup>1</sup> (lo que hacemos, como un resultado colateral, en este trabajo), llegando así, de una forma más simple y expedita, a las mismas conclusiones que aquellas que se deducen estrictamente con el formalismo cuántico, específicamente, en el tratamiento de los efectos dinámicos combinados sobre una partícula cargada (electrón) por la acción de campos eléctricos externos arbitrarios dependientes del tiempo y de la posición.

El propósito de nuestro trabajo es aplicar el modelo semiclásico a una red *extendida* de enlace fuerte y, además de confirmar fenómenos conocidos, deducir nuevos efectos que sugieren la posibilidad de obtener (“diseñar”) hamiltonianos efectivos usando campos perturbativos de alta frecuencia. A fin de contrastar y verificar nuestros resultados nos referiremos a Martínez et al. (2014) donde el método de Kapitza se usa para calcular un potencial efectivo independiente del tiempo debido a un campo rápidamente oscilante y a un campo estático arbitrario (en Martínez et al. (2014) se puede asimismo encontrar algunas referencias acerca de la aplicación del modelo semiclásico a redes de enlace fuerte). La idea de usar un hamiltoniano *extendido* de enlace fuerte que incorpore una interacción a segundos vecinos (o vecinos más distantes) se puede rastrear, por ejemplo, hasta el trabajo de Dunlap & Kenkre (1986), donde sus resultados acerca de la localización dinámica se extienden a interacciones de largo alcance a través de una energía cinética de la forma  $2 \sum_n A_n \cos nap$ , generalizando así la interacción usual a primeros vecinos dada por  $2A \cos ap$ . El concepto de “diseño de la banda” (*band engineering*) con interacciones de largo alcance fue investigado (de manera teórica y experimental) en redes fotónicas, por ejemplo en Dunlap & Kenkre (1986), donde se suprime aproximadamente la difracción de banda ancha en un haz de luz. Investigaciones recientes en sistemas laminados de grafeno muestran que los efectos correspondientes a los términos adicionales de un hamil-

toniano extendido se pueden considerar como mejoras a los resultados sin tales términos (Reich et al. 2002; Kundu 2011; Wright et al. 2009; Kadirko et al. 2013), aunque esas mejoras son pequeñas debido a la menor magnitud relativa de la interacción a segundos vecinos comparada con la interacción a primeros vecinos. Para obtener uno de los nuevos resultados de nuestro trabajo controlamos los parámetros del campo externo oscilante del tal forma que la interacción a primeros vecinos se suprime de manera efectiva dejando como interacción dominante la de segundos vecinos; el efecto observable es una “oscilación efectiva de Bloch”. De la misma forma, la interacción a terceros vecinos se vuelve dominante cuando las interacciones a primeros y a segundos vecinos se suprimen. Aunque estos resultados se restringen al caso en una dimensión, pensamos que su generalización a dos y tres dimensiones es posible, de tal forma de poderse aplicar en sistemas reales como por ejemplo el grafeno. De hecho, en Madison et al. (1998) se reportó la primera observación de supresión dinámica de la banda debida a un campo externo AC en una red óptica (en lugar de una red de estado sólido) donde el ancho de banda se reduce a cero y los estados de Bloch se localizan cuando la amplitud del campo obedece la misma condición que reportamos en este trabajo, aunque el colapso completo de la banda reportado en Madison et al. (1998) no fue posible en ese experimento debido a acoplamientos con vecinos distantes y la presencia de otras bandas.

Así, podemos resumir la metodología de nuestro trabajo como la aplicación de un procedimiento a dos modelos: el método de promediación temporal de Kapitza aplicado a un modelo de enlace fuerte *extendido* bajo la aproximación semiclásica. Organizamos nuestro trabajo de la siguiente manera: en la sección 2 deducimos la fórmula para el hamiltoniano efectivo aproximado hasta términos del orden de  $\omega^{-2}$  de la frecuencia del campo externo; en la sección 3 proponemos un modelo de escenario para la ingeniería de interacciones con base en los resultados de la sección 2; en la sección 4 aplicamos el método pseudoespectral para resolver numéricamente la ecuación de Schrödinger y luego poder comparar los resultados semiclásicos con los cuánticos en el límite  $\omega \rightarrow \infty$ ; en la sección 5 discutimos las principales conclusiones que se obtienen de la expresión para el hamiltoniano efectivo y de su aplicación a la ingeniería de interacciones; en la sección 6 mencionamos los aspectos concluyentes más relevantes y algunas perspectivas interesantes para eventuales trabajos futuros.

## 2. DEDUCCIÓN DEL HAMILTONIANO EFECTIVO

Consideremos el hamiltoniano *extendido* de enlace fuerte con interacciones a primeros y a segundos vecinos,

$$H(x, p) = -2A \cos ap - 2B \cos 2ap + U(x) + x f(\omega t), \quad (1)$$

donde  $a$  es la constante de red; por simplicidad tomemos los valores numéricos de las constantes físicas  $e$  y  $\hbar$  iguales a 1, asimismo supondremos que

<sup>1</sup> Una justificación concisa y pedagógica del modelo semiclásico aplicado a un potencial periódico general se puede encontrar, por ejemplo, en el cap. 12 de Ashcroft & Mermin (1976).

$a = 1$  de aquí en adelante;  $U(x)$  es el potencial que corresponde a un campo externo estático arbitrario y  $f(\omega t)$  es un campo rápidamente oscilante con frecuencia  $\omega \gg 1/T$ , donde  $T$  es el periodo característico de oscilación de la partícula en ausencia del campo forzador  $f(\omega t)$ . A continuación usamos las ecuaciones de movimiento de Hamilton  $\dot{x} = \partial H/\partial p$ ,  $\dot{p} = -\partial H/\partial x$ , de las que se obtiene las derivadas temporales de la posición y del momentum:

$$\dot{x}(t) = 2A \sin p + 4B \sin 2p, \quad (2)$$

$$\dot{p}(t) = -U'(x) - f(\omega t). \quad (3)$$

Usaremos la notación:  $U'(x), U''(x), U^{(n)}(x)$ , para las derivadas espaciales de  $U(x)$ . Apliquemos a continuación la transformación canónica entre los momentos,  $(x, p) \rightarrow (x, y)$ :

$$p(t) = y(t) - g(t) \quad (4)$$

donde se definió el “momentum desplazado”  $y(t)$  junto con la derivada temporal  $\dot{y}(t) \equiv f(\omega t)$ . Esta transformación será conveniente para los propósitos que se explican después de (9). La sustitución de (4) en (2) y en (3) conduce al sistema de ecuaciones:

$$\dot{x} = 2A \sin(y - g) + 4B \sin 2(y - g), \quad (5)$$

$$\dot{y} = -U'(x). \quad (6)$$

Debido a la acción combinada de los campos estático y oscilatorio, la partícula realizará un movimiento rápido con pequeñas oscilaciones en torno a una trayectoria que varía lentamente. Se definen pues las coordenadas “lentas”  $X(t), Y(t)$  y las coordenadas “rápidas”  $\xi(\tau), \eta(\tau)$ ; éstas últimas se consideran perturbaciones de las primeras:

$$x(t) = X(t) + \xi(\tau), \quad (7)$$

$$y(t) = Y(t) + \eta(\tau), \quad (8)$$

donde  $\tau \equiv \omega t$ , de tal forma que el promedio temporal de  $\xi(\tau)$  y  $\eta(\tau)$  se anula en el intervalo temporal con periodo  $2\pi/\omega$ , mientras  $X(t)$  y  $Y(t)$  permanecen casi constantes en ese mismo intervalo, i.e.,  $\langle \xi \rangle = \langle \eta \rangle = 0$ ,  $\langle X \rangle = X(t)$ ,  $\langle Y \rangle = Y(t)$ .

El conjunto de las transformaciones  $(x, p) \rightarrow (x, y) \rightarrow (X, Y)$  dadas en (4), (7) y (8) es canónico ya que la estructura de las ecuaciones de Hamilton se preserva (Landau & Lifschitz 1985):

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \partial H(x, y; t)/\partial y, & \dot{y} &= -\partial H(x, y; t)/\partial x, \\ \dot{X} &= \partial H(X, Y)/\partial Y, & \dot{Y} &= -\partial H(X, Y)/\partial X; \end{aligned} \quad (9)$$

esto es así como una consecuencia de la invariancia de los corchetes de Poisson:  $[p, x] = [y, x] = [Y, X] = 1$ , lo que conduce a  $H(x, y; t) = H(x, p; t) + \partial F(x, y; t)/\partial t$ , y la promediación temporal que se usa como  $\langle X \rangle = X(t)$ ,  $\langle Y \rangle = Y(t)$ , lo que nos lleva de  $H(x, y; t)$  a  $H(X, Y)$ . La forma necesaria de la función generatriz es  $F(x, y; t) = x(y - g)$  tal que  $H(x, y; t) = -2A \cos(y - g) - 2B \cos 2(y - g) + U(x)$  junto con las condiciones

$\partial F/\partial x = p = y - g$  y  $\partial F/\partial y = x$ . El resultado es el desplazamiento de la dependencia temporal del término  $x f(\omega t)$  en  $H(x, p; t)$  hacia los argumentos de los operadores de energía cinética en  $H(x, y; t)$ , lo que resulta en una transformación conveniente a fin de obtener promedios temporales de manera eficiente.  $H(X, Y)$  tiene ahora la forma de un hamiltoniano explícitamente independiente del tiempo que representa a una constante de movimiento y cuya construcción conducirá a la Eq. (42), que es el resultado central de este trabajo.

Comenzamos ahora el procedimiento de promediación temporal reemplazando (7) en (5), y (8) en (6):

$$\dot{X} + \omega \frac{d\xi}{d\tau} = 2A \sin(Y + \eta - g) + 4B \sin 2(Y + \eta - g), \quad (10)$$

$$\dot{Y} + \omega \frac{d\eta}{d\tau} = -U'(X + \xi), \quad (11)$$

donde  $d/dt = \omega d/d\tau$ . Luego obtenemos el promedio temporal de (10) y (11):

$$\dot{X} = 2A \langle \sin(Y + \eta - g) \rangle + 4B \langle \sin 2(Y + \eta - g) \rangle, \quad (12)$$

$$\dot{Y} = -\langle U'(X + \xi) \rangle. \quad (13)$$

Las ecuaciones (12) y (13) son las ecuaciones de movimiento efectivas que corresponden a las partes lentas de las coordenadas  $x(t), y(t)$ , respectivamente. De manera similar, las ecuaciones de movimiento efectivas que corresponden a las partes rápidas de las coordenadas  $x(t), y(t)$ , se obtienen restando (12) de (10), y restando (13) de (11):

$$\begin{aligned} \omega \frac{d\xi}{d\tau} &= 2A [\sin(Y + \eta - g) - \langle \sin(y + \eta - g) \rangle] \\ &\quad + 4B [\sin 2(Y + \eta - g) - \langle \sin 2(y + \eta - g) \rangle], \end{aligned} \quad (14)$$

$$\omega \frac{d\eta}{d\tau} = -U'(X + \xi) + \langle U'(X + \xi) \rangle. \quad (15)$$

Para resolver el sistema (14)-(15) para las coordenadas rápidas definimos:  $t$  como el “tiempo lento”,  $\tau \equiv \omega t$  como el “tiempo rápido” y  $\epsilon \equiv t/\tau = 1/\omega$  como el parámetro de pequeñez tal que  $\epsilon \rightarrow 0$  cuando  $\omega \rightarrow \infty$ . Ahora realizamos la expansión de  $\xi(\tau)$  y  $\eta(\tau)$  en potencias de  $\epsilon$ :

$$\xi(\tau) = \sum_{i=0}^{\infty} \epsilon^i \xi_i(\tau), \quad \eta(\tau) = \sum_{i=0}^{\infty} \epsilon^i \eta_i(\tau). \quad (16)$$

Sustituyendo (16) en (14) y en (15) hasta  $\epsilon^2$ , obtenemos:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\xi_0}{d\tau} + \epsilon \frac{d\xi_1}{d\tau} + \epsilon^2 \frac{d\xi_2}{d\tau} \\
 = 2A\epsilon [\text{sen}(Y + \eta_0 + \epsilon\eta_1 + \epsilon^2\eta_2 - g) \\
 - \langle \text{sen}(Y + \eta_0 + \epsilon\eta_1 + \epsilon^2\eta_2 - g) \rangle] \\
 + 4B\epsilon [\text{sen} 2(Y + \eta_0 + \epsilon\eta_1 + \epsilon^2\eta_2 - g) \\
 - \langle \text{sen} 2(Y + \eta_0 + \epsilon\eta_1 + \epsilon^2\eta_2 - g) \rangle], \quad (17)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{d\eta_0}{d\tau} + \epsilon \frac{d\eta_1}{d\tau} + \epsilon^2 \frac{d\eta_2}{d\tau} = -\epsilon [U'(X + \xi_0 + \epsilon\xi_1 + \epsilon^2\xi_2) \\
 - \langle U'(X + \xi_0 + \epsilon\xi_1 + \epsilon^2\xi_2) \rangle]. \quad (18)
 \end{aligned}$$

Expandimos también hasta  $\epsilon^2$  las funciones  $\text{sen}(\cdot)$  y  $U'(\cdot)$  en el lado derecho de (17) y (18):

$$\begin{aligned}
 \text{sen}(Y + \eta_0 + \epsilon\eta_1 + \epsilon^2\eta_2 - g) \\
 = \text{sen}(Y + \eta_0 - g) + \epsilon\eta_1 \cos(Y + \eta_0 - g) \\
 + \epsilon^2 \left[ \eta_2 \cos(Y + \eta_0 - g) - \frac{1}{2}\eta_1^2 \text{sen}(Y + \eta_0 - g) \right], \quad (19)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U'(X + \xi_0 + \epsilon\xi_1 + \epsilon^2\xi_2) \\
 = U'(X + \xi_0) + \epsilon\xi_1 U''(X + \xi_0) \\
 + \epsilon^2 \left( \xi_2 U''(X + \xi_0) + \frac{1}{2}\xi_1^2 U^{(3)}(X + \xi_0) \right). \quad (20)
 \end{aligned}$$

La sustitución de (19) en (17) y de (20) en (18), y la comparación de los términos en los mismos órdenes de potencias de  $\epsilon$ , conducen a la siguientes relaciones: para  $\epsilon^0$ ,

$$\frac{d\xi_0}{d\tau} = \frac{d\eta_0}{d\tau} = 0, \quad (21)$$

con la solución  $\xi_0 = \eta_0 = 0$  elegida de tal forma que los promedios temporales de  $\xi(\tau)$  y  $\eta(\tau)$  se eliminen. Para  $\epsilon^1$  tenemos:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\xi_1}{d\tau} = 2A [\text{sen}(Y - g) - \langle \text{sen}(Y - g) \rangle] \\
 + 4B [\text{sen} 2(Y - g) - \langle \text{sen} 2(Y - g) \rangle], \\
 \frac{d\eta_1}{d\tau} = -U'(X) + \langle U'(X) \rangle = 0, \quad (22)
 \end{aligned}$$

con la solución  $\eta_1 = 0$  para la última ecuación. Para  $\epsilon^2$  tenemos:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\xi_2}{d\tau} = 0, \\
 \frac{d\eta_2}{d\tau} = -\xi_1 U''(X) + \langle \xi_1 U''(X) \rangle = -\xi_1 U''(X). \quad (23)
 \end{aligned}$$

con la solución  $\xi_2 = 0$  para la primera ecuación. Nótese que para  $\xi(\tau)$  y  $\eta(\tau)$  dadas en (16) a fin de obtener un promedio temporal nulo es necesario que  $\langle \xi_i \rangle = 0$  y  $\langle \eta_i \rangle = 0$  para todos los enteros positivos  $i$ .

Con estos resultados y aquellos de las ecuaciones (12), (13), (19) y (20), las ecuaciones de movimiento "efectivas" para las coordenadas lentas de posición  $X(t)$  y del momentum desplazado  $Y(t)$  son:

$$\begin{aligned}
 \dot{X} = 2A [\langle \text{sen}(Y - g) \rangle + \epsilon^2 \langle \eta_2 \cos(Y - g) \rangle] \\
 + 4B [\text{sen} 2(Y - g) + 2\epsilon^2 \langle \eta_2 \cos 2(Y - g) \rangle], \quad (24)
 \end{aligned}$$

$$\dot{Y} = - \left[ U'(X) + \frac{1}{2}\epsilon^2 \langle \xi_1^2 \rangle U^{(3)}(X) \right]. \quad (25)$$

Ya que debemos integrar las ecuaciones para  $X(t)$  y  $Y(t)$  a fin de calcular el hamiltoniano efectivo  $H(X, Y)$ , necesitamos entonces calcular las expresiones para los promedios temporales en  $X(t)$ . Para ese propósito expresemos las siguientes funciones en forma de variable compleja:

$$\begin{aligned}
 \text{sen}(Y - g) &= \frac{1}{2i} [e^{iY} e^{-ig} - e^{-iY} e^{ig}] \\
 &= \frac{1}{2i} \sum_n [e^{iY} F_n^* e^{-in\tau} - e^{-iY} F_n e^{in\tau}], \\
 \text{sen} 2(Y - g) &= \frac{1}{2i} [e^{i2Y} e^{-i2g} - e^{-i2Y} e^{i2g}] \\
 &= \frac{1}{2i} \sum_{n,m} [e^{i2Y} F_n^* F_m^* e^{-i(n+m)\tau} \\
 &\quad - e^{-i2Y} F_n F_m e^{i(n+m)\tau}], \quad (26)
 \end{aligned}$$

donde definimos

$$F(t) \equiv e^{ig} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n e^{in\tau}; \quad (27)$$

la expansión de Fourier de  $F(t)$  es posible ya que  $g(t) = \int f(\omega t) dt$  es periódica para el campo real y periódico  $f(\omega t) = \sum f_n \exp(in\omega t)$  (con  $f_n^* = f_{-n} = f_n$  y  $f_0 = 0$ ), así que  $F(t)$  también es periódica. Vale la pena dilucidar la relación entre los coeficientes de Fourier  $F_n$  y  $f_n$ , ya que se usarán después. De las definiciones dadas anteriormente tenemos que

$$\begin{aligned}
 \sum_n F_n e^{in\omega t} = \exp \left( \frac{1}{\omega} \sum_{n \neq 0} \frac{f_n}{n} e^{in\omega t} \right) \cong 1 + \frac{1}{\omega} \sum_{p \neq 0} \frac{f_p}{p} e^{ip\omega t} \\
 + \frac{1}{2\omega^2} \sum_{(q,r) \neq 0} \frac{f_q f_r}{qr} e^{i(q+r)\omega t}, \quad (28)
 \end{aligned}$$

que se aproximó para  $\omega \rightarrow \infty$ . Ahora multiplicamos cada término en (28) por  $(1/T) \exp(-im\omega t)$  e integramos en  $t$  en el intervalo  $(0, T)$ , as que se generan los trminos con la forma de

$$\frac{1}{T} \int_0^T e^{i(n \pm m)\omega t} dt \equiv \langle \exp i(n \pm m)\tau \rangle = \delta_{n, \pm m}. \quad (29)$$

Así resulta que

$$F_m \cong \delta_{m,0} + \frac{1}{\omega} \sum_{p \neq 0} \frac{f_p}{p} \delta_{p,m} + \frac{1}{2\omega^2} \sum_{(q,r) \neq 0} \frac{f_q f_r}{qr} \delta_{q+r,m}, \quad (30)$$

donde  $F_n^* = F_n$ . Para  $m = 0$  obtenemos de (30):

$$F_0 \cong 1 + \frac{1}{2\omega^2} \sum_{q \neq 0} \frac{f_q f_{-q}}{q(-q)} = 1 - \frac{1}{2\omega^2} \sum_{q \neq 0} \frac{f_q^2}{q^2}. \quad (31)$$

Este resultado ser de utilidad posteriormente.

Ahora continuamos calculando los promedios temporales en (26) para lo que usamos (29):

$$\begin{aligned} \langle \text{sen}(Y - g) \rangle &= \frac{1}{2i} [e^{iY} F_0^* - e^{-iY} F_0], \\ \langle \text{sen } 2(Y - g) \rangle &= \frac{1}{2i} \sum_n [e^{i2Y} F_n^* F_{-n}^* - e^{-i2Y} F_n F_{-n}]. \end{aligned} \quad (32)$$

Sustituyendo (26) y (32) en la primera ecuación en (22) se obtiene una expresión para  $\xi_1$  que está lista para ser integrada:

$$\begin{aligned} \frac{d\xi_1}{d\tau} &= \frac{A}{i} \sum_{n \neq 0} [e^{iY} F_n^* e^{-in\tau} - e^{-iY} F_n e^{in\tau}] \\ &\quad + \frac{2B}{i} \sum_{n,m+n \neq 0} [e^{i2Y} F_n^* F_m^* e^{-i(n+m)\tau} \\ &\quad - e^{-i2Y} F_n F_m e^{i(n+m)\tau}], \end{aligned} \quad (33)$$

que conduce a:

$$\begin{aligned} \xi_1 &= A \sum_{n \neq 0} \frac{1}{n} [e^{iY} F_n^* e^{-in\tau} + e^{-iY} F_n e^{in\tau}] \\ &\quad + 2B \sum_{n,m+n \neq 0} \frac{1}{(n+m)} [e^{i2Y} F_n^* F_m^* e^{-i(n+m)\tau} \\ &\quad + e^{-i2Y} F_n F_m e^{i(n+m)\tau}]. \end{aligned} \quad (34)$$

Este valor de  $\xi_1$  se sustituye ahora en la segunda ecuación en (23) y luego integramos la ecuación que resulta para  $\eta_2$ :

$$\begin{aligned} \eta_2 &= \frac{AU''(X)}{i} \sum_{n \neq 0} \frac{1}{n^2} [e^{iY} F_n^* e^{-in\tau} - e^{-iY} F_n e^{in\tau}] \\ &\quad + \frac{2BU''(X)}{i} \sum_{n,m+n \neq 0} \frac{1}{(n+m)^2} [e^{i2Y} F_n^* F_m^* e^{-i(n+m)\tau} \\ &\quad - e^{-i2Y} F_n F_m e^{i(n+m)\tau}]. \end{aligned} \quad (35)$$

Con esta expresión para  $\eta_2$ , procedemos ahora de manera similar a calcular los demás promedios temporales de  $X(t)$  en (24). Los resultados son:

$$\begin{aligned} &\langle \eta_2 \cos(Y - g) \rangle \\ &= \frac{AU''(X)}{2i} \sum_{n \neq 0} \frac{1}{n^2} [e^{2iY} F_n^* F_{-n}^* - e^{-2iY} F_n F_{-n}] \\ &\quad + \frac{BU''(X)}{i} \sum_{n,m+n \neq 0} \frac{1}{(n+m)^2} [e^{i3Y} F_n^* F_m^* F_{-n-m}^* \\ &\quad + e^{iY} F_n^* F_m^* F_{n+m} - e^{-iY} F_n F_m F_{n+m} \\ &\quad - e^{-i3Y} F_n F_m F_{-n-m}], \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \langle \eta_2 \cos 2(Y - g) \rangle &= \frac{AU''(X)}{2i} \sum_{m,n \neq 0} \frac{1}{n^2} [e^{i3Y} F_n^* F_m^* F_{-n-m}^* \\ &\quad + e^{-iY} F_n^* F_m F_{n-m} - e^{iY} F_n F_m^* F_{n-m} \\ &\quad - e^{-i3Y} F_n F_m F_{-n-m}] \\ &\quad + \frac{BU''(X)}{i} \sum_{r,n,m+n \neq 0} \frac{1}{(n+m)^2} [e^{i4Y} F_n^* F_m^* F_r^* F_{-n-m-r}^* \\ &\quad + F_n^* F_m^* F_r F_{n+m-r} - F_n F_m F_r F_{n+m-r} \\ &\quad - e^{-i4Y} F_n F_m F_r F_{-n-m-r}]. \end{aligned} \quad (37)$$

Con estos promedios temporales, y recordando que  $F_n = F_n^*$ , la expresión para  $\dot{X}$  en (24) resulta:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= 2 \left[ AF_0 - \frac{2ABU''(X)}{\omega^2} \sum_{n \neq 0} \frac{F_n G_n}{n^2} \right] \text{sen } Y \\ &\quad + 4 \left[ BG_0 + \frac{A^2 U''(X)}{2\omega^2} \sum_{n \neq 0} \frac{F_n F_{-n}}{n^2} \right] \text{sen } 2Y \\ &\quad + 6 \left[ \frac{2ABU''(X)}{\omega^2} \sum_{n \neq 0} \frac{G_n F_{-n}}{n^2} \right] \text{sen } 3Y \\ &\quad + 8 \left[ \frac{2B^2 U''(X)}{\omega^2} \sum_{n \neq 0} \frac{G_n G_{-n}}{n^2} \right] \text{sen } 4Y, \end{aligned} \quad (38)$$

donde definimos  $G_m \equiv \sum_n F_n F_{m-n}$ . A continuación calculamos la ecuación "efectiva" de movimiento (25) para el momento desplazado lento  $Y(t)$ , donde el único promedio temporal que se necesita es  $\langle \xi_1^2 \rangle$ :

$$\begin{aligned} \langle \xi_1^2 \rangle &= \sum_{n \neq 0} \frac{1}{n^2} [2A^2 (F_n F_n - F_n F_{-n} \cos 2Y) \\ &\quad + 8AB (F_n G_n \cos Y - F_n G_{-n} \cos 3Y) \\ &\quad + 8B^2 (G_n G_n - G_n G_{-n} \cos 4Y)], \end{aligned} \quad (39)$$

lo que conduce a

$$\begin{aligned} \dot{Y} = & -U'(X) - \sum_{n \neq 0} \frac{1}{n^2 \omega^2} \left[ U^{(3)}(X) (A^2 F_n F_n \right. \\ & + 4B^2 G_n G_n) + 4ABU^{(3)}(X) F_n G_n \cos Y \\ & - A^2 U^{(3)}(X) F_n F_{-n} \cos 2Y \\ & - 4ABU^{(3)}(X) F_n G_{-n} \cos 3Y \\ & \left. - 4B^2 U^{(3)}(X) G_n G_{-n} \cos 4Y \right]. \end{aligned} \quad (40)$$

A fin de calcular el hamiltoniano efectivo  $H(X, Y)$  que debe representar la conservación de la energía total, notemos que podemos construir esa función constante en las coordenadas lentas  $X, Y$  a partir de las relaciones (38) y (40) que calculamos antes:  $\dot{X}/\dot{Y} = dX/dY$ , de donde se obtiene  $-\dot{Y}dX + \dot{X}dY = 0$ , y que conduce a una ecuación diferencial exacta si  $-\partial\dot{Y}/\partial Y = \partial\dot{X}/\partial X$ ; en efecto, esta condición se cumple, como se verifica a continuación:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial\dot{Y}}{\partial Y} = \frac{\partial\dot{X}}{\partial X} \\ = \sum_{n \neq 0} \frac{1}{n^2 \omega^2} \left[ -4ABU^{(3)}(X) F_n G_n \sin Y \right. \\ + 2A^2 U^{(3)}(X) F_n F_{-n} \sin 2Y \\ + 12ABU^{(3)}(X) G_n F_{-n} \sin 3Y \\ \left. + 16B^2 U^{(3)}(X) G_n G_{-n} \sin 4Y \right]. \end{aligned} \quad (41)$$

En este caso,  $dH(X, Y) = 0$  para la función constante  $H(X, Y)$  que se calcula a partir de la teoría de ecuaciones diferenciales como  $H(X, Y) = -\int \dot{Y}dX + \int (\dot{X} + \partial/\partial Y \int \dot{Y}dX) dY$ ; de (38) y (40) este cálculo es directo y conduce finalmente al hamiltoniano efectivo:

$$\begin{aligned} H(X, Y) = & -2\tilde{A}(X) \cos Y - 2\tilde{B}(X) \cos 2Y \\ & - 2\tilde{C}(X) \cos 3Y - 2\tilde{D}(X) \cos 4Y \\ & + U(X) + \Phi(X), \end{aligned} \quad (42)$$

donde:

$$\begin{aligned} \tilde{A}(X) & \equiv AF_0 - \frac{2ABU''(X)}{\omega^2} \sum_{n \neq 0} \frac{F_n G_n}{n^2}, \\ \tilde{B}(X) & \equiv BG_0 + \frac{A^2 U''(X)}{2\omega^2} \sum_{n \neq 0} \frac{F_n F_{-n}}{n^2}, \\ \tilde{C}(X) & \equiv \frac{2ABU''(X)}{\omega^2} \sum_{n \neq 0} \frac{F_n G_{-n}}{n^2}, \\ \tilde{D}(X) & \equiv \frac{2B^2 U''(X)}{\omega^2} \sum_{n \neq 0} \frac{G_n G_{-n}}{n^2}, \\ \Phi(X) & \equiv \frac{U''(X)}{\omega^2} \left( A^2 \sum_{n \neq 0} \frac{F_n^2}{n^2} + 4B^2 \sum_{n \neq 0} \frac{G_n^2}{n^2} \right). \end{aligned} \quad (43)$$

En esta expresión observamos los términos  $\tilde{A}(X)$ ,  $\tilde{B}(X)$ ,  $\tilde{C}(X)$  y  $\tilde{D}(X)$ , cuya dependencia funcional en  $X$  no supone un significado físico particular en la teoría de transporte de enlace fuerte; sin embargo, ya sea para un potencial estático parabólico ( $U(X) = kX^2/2$ ) o lineal ( $U(X) = \alpha X$ ), esos términos son elementos de *hopping* modificados o “reparametrizados”,  $\tilde{A}, \tilde{B}$ , tales que  $\tilde{A} \rightarrow A$  y  $\tilde{B} \rightarrow B$  cuando  $\omega \rightarrow \infty$ , y aparecen nuevos términos o elementos de *hopping* “inducidos”,  $\tilde{C}, \tilde{D}$ , tales que  $\tilde{C} \rightarrow 0$  y  $\tilde{D} \rightarrow 0$  cuando  $\omega \rightarrow \infty$ .

Los elementos de *hopping* efectivos en (43) se pueden reescribir de manera simplificada definiendo las cantidades adimensionales

$$\begin{aligned} \hat{A} & \equiv \tilde{A}/A = F_0 - \nu \sum_{n \neq 0} \frac{F_n G_n}{n^2}, \\ \hat{B} & \equiv \tilde{B}/A = \mu G_0 + \frac{\nu}{8\mu} \sum_{n \neq 0} \frac{F_n F_{-n}}{n^2}, \\ \hat{C} & \equiv \tilde{C}/A = \frac{\nu}{2} \sum_{n \neq 0} \frac{F_n G_{-n}}{n^2}, \\ \hat{D} & \equiv \tilde{D}/A = \frac{\mu\nu}{2} \sum_{n \neq 0} \frac{G_n G_{-n}}{n^2}, \end{aligned} \quad (44)$$

junto con los parámetros de pequeñez  $\mu \equiv B/A$  (para  $A > B$ ) y  $\nu \equiv 4BU''(X)\omega^{-2}$  (para  $\omega \rightarrow \infty$ ). El término  $\Phi(X)$  en (42) es una constante aditiva inmaterial que no conlleva algún efecto físico observable (para los potenciales estáticos parabólico o lineal) y puede ser ignorado de aquí en adelante.

### 3. INGENIERÍA DE INTERACCIONES

Consideremos a continuación el caso de un campo externo oscilante de la forma  $f(\tau) = 2f_1 \cos \tau + 2f_2 \cos 2\tau$ . Los coeficientes de Fourier correspondientes para la función periódica  $F(t)$  definida en (27) son  $F_n = \sum_r J_{n-2r} \bar{J}_r$  (donde  $J_m \equiv J_m(2f_1/\omega)$  y  $\bar{J}_m \equiv J_m(f_2/\omega)$ ). Los elementos de *hopping* efectivos adimensionales que resultan son

$$\begin{aligned}
\hat{A} &= \sum_n J_{2n} \tilde{J}_n \\
&\quad - \nu \sum_{n \neq 0} \sum_{m,r,s,t} n^{-2} J_{n-2m} J_{r-2s} J_{n-r-2t} \tilde{J}_m \tilde{J}_s \tilde{J}_t, \\
\hat{B} &= \mu \sum_{n,m,r} J_{n-2m} J_{-n-2r} \tilde{J}_m \tilde{J}_r \\
&\quad + \frac{\nu}{8\mu} \sum_{n \neq 0} \sum_{m,r} n^{-2} J_{n-2m} J_{-n-2r} \tilde{J}_m \tilde{J}_r, \\
\hat{C} &= \frac{\nu}{2} \sum_{n \neq 0} \sum_{m,r,s,t} n^{-2} J_{n-2m} J_{r-2s} J_{-n-r-2t} \tilde{J}_m \tilde{J}_s \tilde{J}_t, \\
\hat{D} &= \frac{\mu\nu}{2} \sum_{n \neq 0} \sum_{m,r,s,t,u,v} n^{-2} J_{m-2s} J_{n-m-2t} J_{r-2u} \\
&\quad \times J_{-n-r-2v} \tilde{J}_s \tilde{J}_t \tilde{J}_u \tilde{J}_v. \tag{45}
\end{aligned}$$

Controlando las intensidades  $2f_1$  y  $2f_2$  del campo externo  $f(\tau)$  en las funciones de Bessel en (45) es posible suprimir los valores de  $\hat{A}$  o  $\hat{B}$  (ya sea de manera simultanea o por separado) así como  $\hat{C}$  o  $\hat{D}$ . Esto se muestra de manera esquemática en la Fig.1: (a) caso de  $\hat{A} = 0$  (curva sólida) y  $\hat{B} = 0$  (curva segmentada), (b) caso de  $\hat{C} = 0$  (curva sólida) y  $\hat{D} = 0$  (curva segmentada). Para el caso de  $B = 0$  en (45) sólo quedan los elementos efectivos adimensionales de *hopping* reparametrizado  $\hat{A}$  e inducido  $\hat{B}$ :  $\hat{A} = \sum_n J_{2n} \tilde{J}_n$ ,  $\hat{B} = (\nu/(8\mu)) \sum_{n \neq 0} \sum_{m,r} n^{-2} J_{n-2m} J_{-n-2r} \tilde{J}_m \tilde{J}_r$ ; la Fig.1(c) muestra los casos de  $\hat{A} = 0$  (curva sólida) y  $\hat{B} = 0$  (curva segmentada). Esta figura coincide *exactamente* con la que reportan Itin & Katsnelson (2015) que fue obtenida con el formalismo cuántico. Para el caso del campo externo con la forma más simple  $f(\tau) = 2f_1 \cos \tau$ , los elementos de *hopping* efectivos en (45) se simplifican como:

$$\begin{aligned}
\hat{A} &= J_0 - \nu \sum_{n \neq 0} n^{-2} J_n \tilde{J}_n, \\
\hat{B} &= \mu \tilde{J}_0 + \frac{\nu}{8\mu} \sum_{n \neq 0} n^{-2} J_n J_{-n}, \\
\hat{C} &= \frac{\nu}{2} \sum_{n \neq 0} n^{-2} J_n \tilde{J}_{-n}, \\
\hat{D} &= \frac{\mu\nu}{2} \sum_{n \neq 0} n^{-2} \tilde{J}_n \tilde{J}_{-n}, \tag{46}
\end{aligned}$$

donde las funciones de doble argumento  $\tilde{J}_n \equiv J_n(4f_1/\omega)$  se obtuvieron aplicando la fórmula de duplicación para funciones de Bessel,  $\sum_k J_k(\xi) J_{n-k}(\xi) = J_n(2\xi) \equiv \tilde{J}_n$ , a las expresiones  $G_m \equiv \sum_n F_n F_{n-m}$  en (43).

En la Fig.2 observamos la dependencia de los elementos de *hopping* en (46) en la intensidad  $2f_1$  del campo; en particular, observamos la supresión de los elementos de *hopping*, aunque no de manera simultánea, para valores específicos de  $2f_1$ . De hecho, los ceros de  $\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, \hat{D}$  en la Fig.2 corresponden a

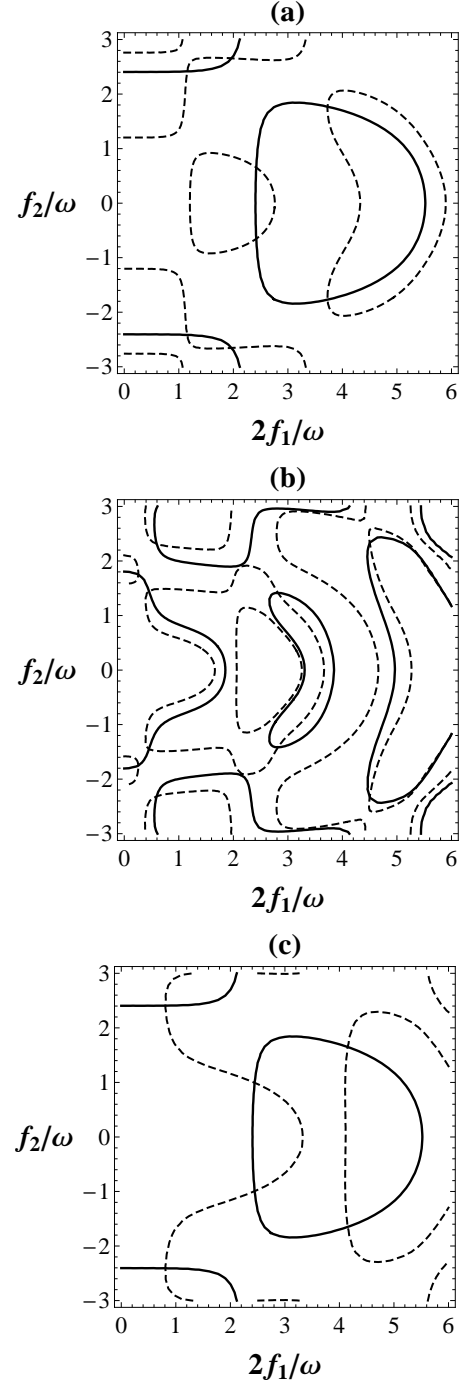


FIG. 1.— Regiones de supresión de los elementos de *hopping* adimensionales efectivos para los parámetros  $f_1$  y  $f_2$  del campo externo forzador  $f(\tau) = 2f_1 \cos \tau + 2f_2 \cos 2\tau$ : (a)  $\hat{A} = 0$  (curva sólida) y  $\hat{B} = 0$  (curva segmentada); (b)  $\hat{C} = 0$  (curva sólida) y  $\hat{D} = 0$  (curva segmentada); (c)  $\hat{A} = 0$  (curva sólida) y  $\hat{B} = 0$  (curva segmentada) para el caso de  $B = 0$  en el hamiltoniano extendido (1).

las intersecciones de ambas curvas, sólida y segmentada, con la línea horizontal  $f_2 = 0$  en la Fig.1. Para el caso de  $B = 0$ , los únicos elementos de *hopping* efectivos adimensionales reparametrizados e inducidos son  $\hat{A} = J_0$  y  $\hat{B} = (\nu/(8\mu)) \sum_{n \neq 0} n^{-2} J_n J_{-n}$ , cuya dependencia en  $2f_1$  se grafica en la Fig.3.

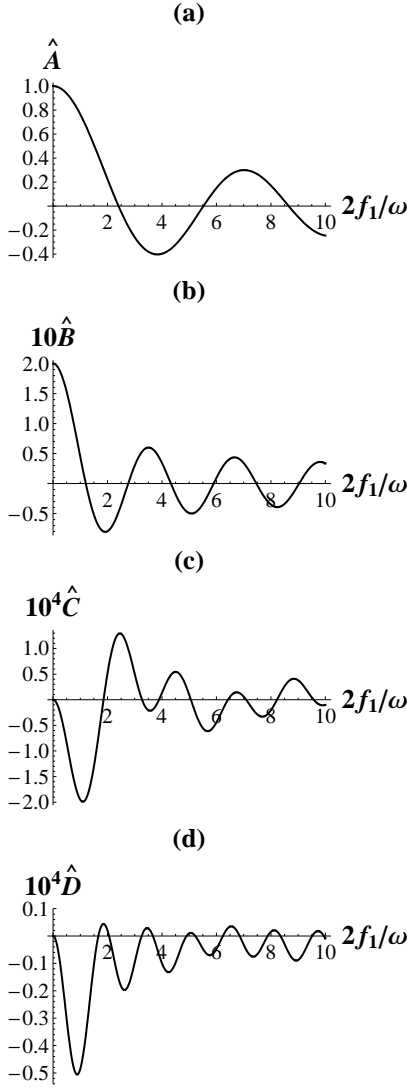


FIG. 2.— Variación de los elementos de *hopping* efectivos adimensionales  $\hat{A}$ ,  $\hat{B}$ ,  $\hat{C}$ ,  $\hat{D}$  para el parámetro  $2f_1$  del campo forzador externo  $f(\tau) = 2f_1 \cos \tau$ .

En la Fig.4 diseñamos 14 gráficos que proveen una ayuda visual para la “ingeniería de interacciones” descrita en esta sección. La Fig.4(a) representa todos los elementos de *hopping* considerados en nuestro trabajo:  $A$ ,  $B$  en el hamiltonian extendido (1) y  $\tilde{A}$ ,  $\tilde{B}$ ,  $\tilde{C}$ ,  $\tilde{D}$  en el hamiltonian efectivo (42). El modelo de red de la Fig.4 consiste de 5 átomos donde el átomo del extremo izquierdo está localizado en el sitio  $n = 0$ . En la mitad superior de la red están representados  $A$ ,  $B$  por las trayectorias que conectan  $n = 0$  con los sitios  $n = 1, 2$ , respectivamente, mientras que en la mitad inferior de la red están representados  $\tilde{A}$ ,  $\tilde{B}$ ,  $\tilde{C}$ ,  $\tilde{D}$  por las trayectorias que conectan  $n = 0$  con los sitios  $n = 1, 2, 3, 4$ , respectivamente. Así, podemos establecer la siguiente lista de correspondencias:

- Fig.1  $\rightarrow$  Fig.4(a),
- Fig.1(a)-curva slida  $\rightarrow$  Fig.4(b),
- Fig.1(a)-curva segmentada  $\rightarrow$  Fig.4(c),
- Fig.1(a)-puntos de intersección  $\rightarrow$  Fig.4(d),
- Fig.1(b)-curva slida  $\rightarrow$  Fig.4(e),

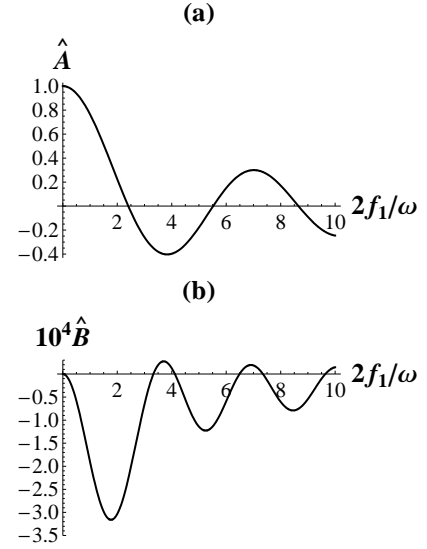


FIG. 3.— Variación de los elementos de *hopping* efectivos adimensionales  $\hat{A}$ ,  $\hat{B}$  para el parámetro  $2f_1$  del campo externo forzador  $f(\tau) = 2f_1 \cos \tau$  para el caso de  $B = 0$  en el hamiltoniano extendido (1).

- Fig.1(b)-curva segmentada  $\rightarrow$  Fig.4(f),
- Fig.1(b)-puntos de intersección  $\rightarrow$  Fig.4(g),
- Fig.1(c)  $\rightarrow$  Fig.4(k),
- Fig.1(c)-curva slida  $\rightarrow$  Fig.4(l),
- Fig.1(c)-curva segmentada  $\rightarrow$  Fig.4(m),
- Fig.2  $\rightarrow$  Fig.4(a),
- Fig.2-puntos de cruce con el eje horizontal  $\rightarrow$  Fig.4(b, c, e, f),
- Fig.3  $\rightarrow$  Fig.4(k),
- Fig.3(a)-puntos de cruce con el eje horizontal  $\rightarrow$  Fig.4(l),
- Fig.3(b)-puntos de cruce con el eje horizontal  $\rightarrow$  Fig.4(m).

El caso más sencillo y no trivial para el que podemos probar nuestros resultados y que tiene un significado intuitivo para la ingeniería de interacciones es la “oscilación efectiva de Bloch”, que corresponde a la combinación de un campo externo estático lineal  $U(X) = \alpha X$  y un campo forzador  $f(\tau) = 2f_1 \cos(\tau)$ . En este caso se obtiene los elementos de *hopping*  $\hat{A} = J_0$  y  $\hat{B} = \mu \sum_n J_n J_{-n}$  en (45) (con  $\nu = 0$ ), y de aquí el hamiltoniano efectivo  $H(X, Y) = -2AJ_0(2f_1/\omega) \cos Y - 2BJ_0(4f_1/\omega) \cos 2Y + \alpha X$  en (42). Las ecuaciones de movimiento (38) y (40) para  $X$  y  $Y$  son

$$\begin{aligned} \dot{X} &= 2AJ_0(2f_1/\omega) \sin Y + 4BJ_0(4f_1/\omega) \sin 2Y, \\ \dot{Y} &= -\alpha, \end{aligned} \quad (47)$$

cuya solución es

$$\begin{aligned} X(t) &= \frac{2A}{\alpha} J_0(2f_1/\omega) [\cos(\omega_B t) - 1] \\ &\quad + \frac{2B}{\alpha} J_0(4f_1/\omega) [\cos(2\omega_B t) - 1], \end{aligned} \quad (48)$$

para las condiciones iniciales  $X(0) = Y(0) = 0$  y con  $\omega_B = 2\pi/\tau_B \equiv |\alpha|$  la frecuencia usual de la

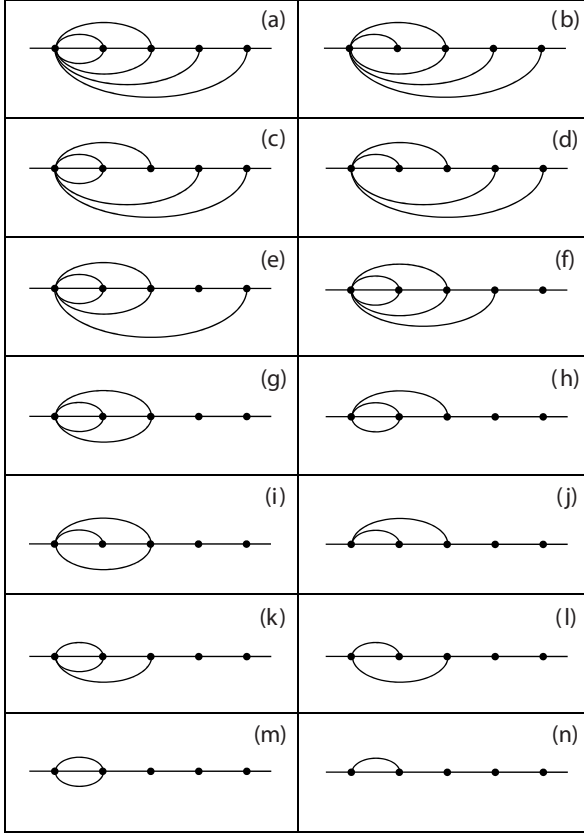


FIG. 4.— Gráficos para el esquema de “ingeniería de interacciones” (descrito en la sección 3) para un modelo de red de 5 átomos (el átomo del extremo izquierdo está localizado en el sitio  $n = 0$ ). En la mitad superior de la red se representan  $A, B$  por las trayectorias que conectan  $n = 0$  con los sitios  $n = 1, 2$ , respectivamente, mientras que en la mitad inferior de la red se representan  $\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}, \tilde{D}$  por las trayectorias que conectan  $n = 0$  con los sitios  $n = 1, 2, 3, 4$ , respectivamente. El gráfico (a) representa todos los elementos de *hopping* considerados en este trabajo:  $A, B$  en el hamiltonian extendido (1), y  $\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}, \tilde{D}$  en el hamiltoniano efectivo (42). Una lista de correspondencias con los resultados de nuestro trabajo se establece en la sección 3 donde el caso más relevante es el de la “oscilación efectiva de Bloch”: Fig.5-curva sólida  $\rightarrow$  gráfico (i), Fig.5-curva segmentada  $\rightarrow$  gráfico (h), Fig.5-curva de puntos y rayas  $\rightarrow$  gráfico (g).

oscilación de Bloch para el hamiltonian  $H(X, Y) = -2A \cos Y + \alpha X$ . La Fig.5 muestra el gráfico de  $X(t)$  vs.  $t/(4\tau_B)$  para los valores: (a)  $2f_1/\omega = \hat{z}_1$  (curva sólida), (b)  $2f_1/\omega = \hat{z}_1/2$  (curva segmentada) y (c)  $2f_1/\omega = 2\hat{z}_1$  (curva de rayas y puntos);  $\hat{z}_1 \cong 2.40483$  es la primera raíz de  $J_0$ . En el caso (a) el primer término de  $X(t)$  en (48) se anula y el segundo término describe una oscilación de Bloch efectiva con un elemento *hopping* reparametrizado  $\tilde{B} = BJ_0(2\hat{z}_1) \cong -2.24 B$ ; en el caso (b) el segundo término de  $X(t)$  en (48) se anula y el primer término describe una oscilación de Bloch efectiva con un elemento de *hopping* reparametrizado  $\tilde{A} = AJ_0(\hat{z}_1/2) \cong 0.85 A$ ; en el caso (c) el movimiento resultante es una su-

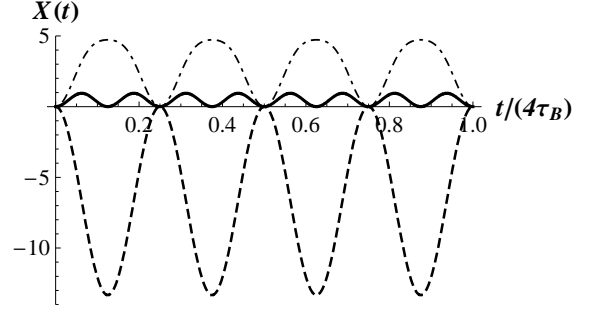


FIG. 5.— Efecto semiclásico de “oscilación efectiva de Bloch” mostrado en los ejes  $X(t)$  vs.  $t/(4\tau_B)$ , para los siguientes valores del campo externo: (a)  $2f_1/\omega = \hat{z}_1$  (curva sólida), lo que da lugar a una oscilación efectiva de Bloch con un elemento de *hopping* reparametrizado  $\tilde{B} = BJ_0(2\hat{z}_1) \cong -2.24 B$  ( $\hat{z}_1 \cong 2.40483$  es la primera raíz de  $J_0$ ); (b)  $2f_1/\omega = \hat{z}_1/2$  (curva segmentada), lo que da lugar a una oscilación efectiva de Bloch con un elemento de *hopping* reparametrizado  $\tilde{A} = AJ_0(\hat{z}_1/2) \cong 0.85 A$ ; (c)  $2f_1/\omega = 2\hat{z}_1$  (curva de puntos y segmentos), lo que da lugar a la superposición de los términos oscilatorios en (48). La partícula comienza a moverse en direcciones opuestas en los casos (a) y (b) debido al signo de la *masa efectiva*  $m^*$ . En efecto, en el caso (a),  $m^* \cong -0.06/B$ , mientras que en el caso (b),  $m^* \cong 0.6/A$ .

perposición de los términos oscilatorios de (48). El movimiento en sentidos opuestos de los casos (a) y (b) se puede relacionar con la definición de *masa efectiva* como  $m^* = |\nabla_Y^2 \varepsilon(Y)|^{-1}$  para la energía  $\varepsilon(Y)$  asociada al hamiltoniano efectivo  $H(X, Y)$  (Ashcroft & Mermin 1976), que en este caso conduce a  $m^* = 1/(2(\tilde{A} + 4\tilde{B}))$  para  $Y = 0$ . En efecto, en el caso (a),  $m^* \cong -0.06/B$ , mientras que en el caso (b),  $m^* \cong 0.6/A$ , en consecuencia, la partícula comienza a moverse en direcciones opuestas. Las correspondencias en este caso de la “oscilación de Bloch efectiva” son:

Fig.5-curva sólida  $\rightarrow$  Fig.4(i),

Fig.5-curva segmentada  $\rightarrow$  Fig.4(h),

Fig.5-curva de puntos y rayas  $\rightarrow$  Fig.4(g).

#### 4. SIMULACIÓN NUMÉRICA CUÁNTICA

A continuación usaremos la fórmula iterativa de evolución temporal deducida a partir del algoritmo pseudo-espectral (Sanjinés & Gallinar 2001)

$$C_{\mathbf{R}'}^{p+1} = \sum_{\mathbf{R}} C_{\mathbf{R}}^p \exp[-i(\lambda + \lambda^2 \partial_t)(V_{\mathbf{R}}^p + V_{\mathbf{R}'}^p)] F_{\mathbf{R}-\mathbf{R}'} + O(\lambda^3) \quad (49)$$

(con  $C_{\mathbf{R}}^p \equiv C_{\mathbf{R}}(t = p\Delta t)$ ,  $\lambda \equiv \Delta t/2$ ) para los coeficientes de la expansión de la función de onda  $\Psi(\mathbf{r}, t)$  que se expresa en la base de funciones de Wannier de una banda  $\Phi(\mathbf{r} - \mathbf{R})$  y que están centradas en torno al sitio de la red  $\mathbf{R}$ :  $\Psi(\mathbf{r}, t) = \sum_{\mathbf{R}} C_{\mathbf{R}}(t) \Phi(\mathbf{r} - \mathbf{R})$ . Así, la solución de (49) simula la evolución del paquete de ondas electrónico en la red bajo la aproximación de una banda para el hamiltoniano de enlace fuerte  $H = T(\mathbf{p}) + V(\mathbf{r}, t)$ , donde el operador de energía cinética  $T(\mathbf{p} = -i\hbar\nabla) = \sum_{m,n} A_{mn} \exp[i\mathbf{p} \cdot (\mathbf{R}_m - \mathbf{R}_n)]$  representa el salto (*hopping*) del electrón entre los sitios de la red  $m$  y  $n$ , con elemento de *hopping*  $A_{mn}$ ; la energía potencial  $V(\mathbf{r}, t)$  corresponde a las fuerzas externas que actúan sobre el electrón y es diferente del potencial periódico cristalino. En (49) usamos las

definiciones:  $V_{\mathbf{R}}^p \equiv V(\mathbf{R}, t = p\Delta t)$ ,  $\partial_t V_{\mathbf{R}}^p \equiv (V_{\mathbf{R}}^{p+1} - V_{\mathbf{R}}^p)/\Delta t$ ,  $F_{\mathbf{R}} \equiv (1/v^*) \int_{1-BZ} \exp[-i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{R} + 2\lambda T(\mathbf{k}))]$ , donde la integral se evalúa en la primera zona de Brillouin ( $1-BZ$ ) con volumen  $v^*$ .

Consideremos a continuación el caso del hamiltoniano *extendido* (1) en una red unidimensional (constante de red  $a = 1$ ) con interacciones a primeros y a segundos vecinos (los elementos de *hopping* correspondientes son  $A = A_{n\pm 1, n}$ ,  $B = A_{n\pm 2, n}$ ). A fin de estudiar la “oscilación de Bloch efectiva” descrita en la Sección 3, elijamos una energía potencial lineal  $U(x) = \alpha x$  y un campo forzador armónico  $f(\omega t) = 2f_1 \cos(\omega t)$  con  $\alpha = 8\pi$  y  $2f_1 = \omega \hat{z}_1$ ; la integral  $F_n$  para el sitio  $R = n$  se evalúa numéricamente para  $A = 125$ ,  $B = A/5$  y  $\Delta t = 10^{-6}$  (2).

Una vez calculados los coeficientes  $C_n(t)$  procedemos a calcular el valor medio de la posición en unidades de la constante de red:  $z(t) \equiv \sum_n n |C_n(t)|^2$ . Cuando  $\omega = 0$  obtenemos una especie de “oscilación extendida de Bloch” que se muestra en la Fig.6(a)-curva sólida y se compara con la oscilación de Bloch mostrada en la Fig.6(a)-curva segmentada (que se obtiene del hamiltoniano  $H = -2A \cos p + \alpha x$ ) con periodo  $\tau_B = 2\pi/\alpha$ ; en todos los casos de la Fig.6 se muestra  $z(t)$  vs.  $t/(4\tau_B)$  de tal forma que  $0 < t/(4\tau_B) < 1$ . La Fig.6(b) corresponde a  $\omega = 20\omega_B$ ; el comportamiento dinámico de  $z(t)$  an no muestra alguna característica de las predicciones válidas para  $\omega \rightarrow \infty$ . Las Fig.6(c, d) corresponden a  $\omega = 400\omega_B$  y se pueden considerar dentro del rango de validez de  $\omega \rightarrow \infty$ , permitiendo así la comparación directa entre el valor medio cuántico de la posición  $z(t)$  y la coordenada semiclásica de la posición lenta  $X(t)$  en (48); en efecto, en la Fig.6(c) se muestra la “oscilación de Bloch efectiva” deducida del hamiltoniano efectivo  $H(X, Y) = -2\tilde{A} \cos Y - 2\tilde{B} \cos 2Y + \alpha X$ , donde  $\tilde{A} = AJ_0(\hat{z}_1) = 0$  y  $\tilde{B} = BJ_0(2\hat{z}_1) = -0.24B$ . Esto significa que la banda asociada a la interacción a primeros vecinos se suprimió y sólo queda el efecto debido a la interacción a segundos vecinos a través del elemento reparametrizado  $\tilde{B} < 0$  que corresponde a una masa efectiva negativa, provocando así el movimiento inicial en la dirección opuesta respecto a la oscilación de Bloch de la curva Fig.6(a)-segmentada; la línea horizontal segmentada representa el valor de referencia  $z(0) = 0$ . En la Fig.6(d) se tiene una especie de “oscilación de Bloch efectiva extendida” análoga al caso de la Fig.6(a)-curva sólida; los elementos efectivos de *hooping* reparametrizados son  $\tilde{A} = AJ_0(2\hat{z}_1) =$

<sup>2</sup> Estos valores numéricos deben transformarse a las unidades físicas apropiadas (en SI) para propósitos de comparación. Ya que mediremos el tiempo físico en unidades de  $4\tau_B$ , entonces el tiempo y el elemento de *hopping* a primeros vecinos se transforman como  $t \rightarrow t/(4\tau_B)$ ,  $A \rightarrow A(4\tau_B/\hbar) = 125$ , así, el ancho de banda que corresponde a la frecuencia típica de la oscilación de Bloch  $\omega_B$  en el orden de terahertz resulta ser  $4A = 0.013$  eV, que es consistente con los anchos de banda reportados en el rango de 1-100 meV en superredes de semiconductores (ver Bouchard & Luban (1995), por ejemplo). De manera similar,  $\alpha \rightarrow \alpha(4a\tau_B/\hbar) = 8\pi$ ,  $\omega \rightarrow \omega(4\tau_B)$ ,  $2f_1 = \omega \hat{z}_1 \rightarrow 2f_1(4a\tau_B/\hbar) = \omega(4\tau_B)\hat{z}_1$  y  $R = n \rightarrow R = na$ .

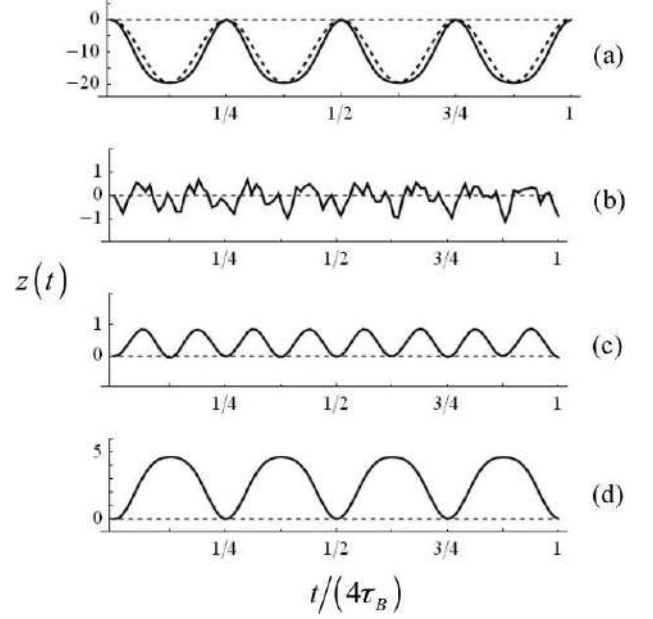


FIG. 6.— Simulación cuántica del efecto de “oscilación de Bloch efectiva” mostrado en los ejes  $z(t)$  vs.  $t/(4\tau_B)$  en el rango  $0 < t/(4\tau_B) < 1$ . (a) Caso de  $\omega = 0$  que conduce a una oscilación de Bloch extendida (curva sólida) comparada con la oscilación de Bloch comm (curva segmentada), esta última correspondiente al hamiltoniano  $H = -2A \cos p + \alpha x$  con periodo  $\tau_B = 2\pi/\alpha$ . (b) Caso de  $\omega = 20\omega_B$  donde aún no se manifiesta alguna característica del límite  $\omega \rightarrow \infty$ . Los casos (c) y (d) corresponden a  $\omega = 400\omega_B$ , que ya se puede considerar dentro del rango de validez de  $\omega \rightarrow \infty$ . En el caso (c) se aprecia la “oscilación de Bloch efectiva” con una masa efectiva negativa. El caso (d) muestra una especie de “oscilación de Bloch efectiva extendida” donde la masa efectiva negativa que resulta se contrasta con el caso de (a)-curva sólida.

$-0.24A$  y  $\tilde{B} = BJ_0(4\hat{z}_1) = -0.21B$ , donde la masa efectiva negativa que resulta se puede contrastar con el caso de la Fig.6(a)-curva sólida.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este trabajo usamos un método inspirado en el método original desarrollado por Kapitza (1951) para calcular un hamiltoniano independiente del tiempo correspondiente al hamiltoniano *extendido* dado en (1). Este cálculo se realizó usando el modelo semiclásico dado por las ecuaciones de movimiento de Hamilton para las coordenadas de posición y momento. El resultado central de nuestro trabajo es la deducción de la expresión (42) para el hamiltoniano efectivo  $H(X, Y)$  junto con el escenario para una “ingeniería de interacciones” propuesto en la sección 3, en particular, para la supresión controlada de la interacción a primeros vecinos que deja como efecto dominante la interacción a segundos vecinos (Fig.1a). Proponemos como un efecto observable deducido de tal ingeniería de interacciones una “oscilación efectiva de Bloch” con una masa efectiva resultante que es negativa para ciertos parámetros del campo forzador externo (Fig.5); la validez y consistencia de este fenómeno se confirmó teóricamente usando el formalismo cuántico (sección 4).

La validez del resultado para  $H(X, Y)$  se puede comprobar sometándolo a algunas pruebas;

suponemos por simplicidad un campo forzador de la forma  $f(\tau) = 2f_1 \cos \tau$  pues, además, podemos así comparar nuestros resultados con los de otros trabajos. Una prueba trivial consiste de tomar el límite  $\omega \rightarrow \infty$ ; en este caso podemos ver que los elementos de *hopping*  $\tilde{C}$  y  $\tilde{D}$  se eliminan, dando así por resultado el hamiltoniano (1) sin campo oscilatorio, como debe ser. Otra prueba consiste de tomar  $B = 0$  en  $H(X, Y)$  para obtener

$$H(X, Y) = -2\tilde{A} \cos Y - 2\tilde{B} \cos 2Y + U(X), \quad (50)$$

con elementos de *hopping* adimensionales  $\hat{A} = J_0$ ,  $\hat{B} = (\nu/(8\mu)) \sum_{n \neq 0} n^{-2} J_n J_{-n}$ . Este resultado es interesante: el elemento de *hopping* inducido  $\tilde{B}$  da cuenta de la interacción a segundos vecinos que surge por el efecto combinado del campo rápidamente oscilante promediado y un potencial estático no-uniforme, que en este caso es parabólico:  $U(X) = kX^2/2 \rightarrow \nu/(8\mu) = Ak/(2\omega^2)$ . Tal efecto fue reportado recientemente en (Itin & Neishtadt 2014; Itin & Katsnelson 2015) donde los autores usaron la misma técnica de promediación temporal (como hicimos nosotros) aplicada a un hamiltoniano cuántico. Otra prueba consiste de elegir  $A = 0$  en  $H(X, Y)$ , lo que conduce a

$$H(X, Y) = -2\tilde{B} \cos 2Y - 2\tilde{D} \cos 4Y + U(X), \quad (51)$$

con elementos de *hopping* adimensionales  $\hat{B} = \tilde{J}_0$ ,  $\hat{D} = (\mu\nu/2) \sum_{n \neq 0} n^{-2} \tilde{J}_n \tilde{J}_{-n}$ . La comparación de los hamiltonianos efectivos dados por (50) y (51) muestra que (51) se puede obtener de (50) duplicando el valor de la constante de red,  $a \rightarrow 2a$  (que elegimos como  $a = 1$  en (1)); ésta es una consecuencia directa de la simetría traslacional de la red infinita.

Para la última prueba extendemos el orden de la expansión en serie en (16) de manera consistente hasta  $\epsilon^4 = \omega^{-4}$ ; éste es ciertamente un ejercicio algebraico tedioso, aún para el caso particular de  $B = 0$ . El resultado es

$$\begin{aligned} \hat{A} &= J_0 - \frac{1}{2} \left( \frac{\nu}{4\mu} \right)^2 \sum_{(n,m) \neq 0} (nm)^{-2} (2 - (-1)^m) J_n J_m J_{n-m}, \\ \hat{B} &= \frac{\nu}{8\mu} \sum_{n \neq 0} n^{-2} J_n J_{-n}, \\ \hat{C} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\nu}{4\mu} \right)^2 \sum_{(n,m) \neq 0} (nm)^{-2} J_n J_{-m} J_{m-n}, \\ \hat{D} &= 0. \end{aligned} \quad (52)$$

Podemos verificar la consistencia de (46) y (52) haciendo  $B = 0$  en (46) y descartando los términos del orden de  $\epsilon^4$  en (52); esto conduce a los resultados usuales:  $\hat{A} = J_0$ ,  $\hat{B} = \nu/(8\mu) \sum_{n \neq 0} n^{-2} J_n J_{-n}$ ,  $\hat{C} = 0$  y  $\hat{D} = 0$ . Como un resultado colateral para este caso, y a manera de una comprobación cruzada de nuestros

resultados, deducimos de (38) y (40) las ecuaciones de movimiento para  $X(t)$  y  $Y(t)$ :

$$\dot{X} = 2A \left( 1 - \frac{1}{2} \sum_{n \neq 0} \frac{f_n^2}{n^2 \omega^2} \right) \sin Y, \quad \dot{Y} = -U'(X), \quad (53)$$

donde usamos el resultado dado en (31). Estas ecuaciones resultan ser iguales a las que reportan en Martínez et al. (2014), aunque sus resultados se obtuvieron sin invocar la transformación del “momentum desplazado” dada por (4).

En este trabajo consideramos expansiones perturbativas hasta órdenes de  $\epsilon^2$  y  $\epsilon^4$  a fin de obtener resultados consistentes. Una expansión sólo hasta el orden de  $\epsilon$  sería insuficiente, por ejemplo, en (31) donde  $F_0$  es el factor responsable del colapso de la banda a primeros vecinos en (43) cuando se cumple la condición de que  $2f_1/\omega$  sea igual a una raíz de  $J_0$  (régimen de localización dinámica). Como se puede verificar en (31), la expansión hasta  $\epsilon$  da  $F_0 = 1$  lo que es incorrecto pues la banda nunca colapsaría, revelando así la necesidad de expandir las series al menos hasta  $\epsilon^2$  para obtener resultados correctos. La insuficiencia de la expansión hasta  $\epsilon$  también está referida en Longhi (2008) donde el formalismo cuántico también muestra la evidencia de resultados incorrectos para la dinámica de tunelamiento electrónico en arreglos de pozos múltiples.

## 6. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

En este trabajo se dedujo, dentro de la aproximación semiclásica, un hamiltoniano efectivo  $H(X, Y)$  correspondiente a una partícula cargada que se mueve a saltos (*hopping*) en una red en presencia de un campo estático arbitrario y un campo uniforme rápidamente oscilante. Nuestros resultados comprenden aquellos reportados recientemente por Itin & Neishtadt (2014) y Itin & Katsnelson (2015), que fueron calculados usando el formalismo cuántico; nuestros resultados también comprenden aquellos reportados en Martínez et al. (2014) para las ecuaciones semiclásicas de movimiento que describen el movimiento lento de las coordenadas de posición y momentum desplazado,  $X$  y  $Y$ . Propusimos a manera de un resultado novedoso, la observación de un efecto de “oscilación efectiva de Bloch” que surge de la supresión controlada de la interacción a primeros vecinos y deja a la interacción a segundos vecinos como un efecto dominante asociado a una partícula de masa efectiva negativa para valores específicos del campo forzador. Debe mencionarse que en trabajos recientes (Reich et al. 2002; Kundu 2011; Wright et al. 2009; Kadirko et al. 2013) las interacciones de largo alcance en una red se consideran refinamientos perturbativos a la interacción dominante a primeros vecinos. De manera notable, y en completo acuerdo con nuestros resultados, en Madison et al. (1998) se reportó la observación de la *cuasi* supresión de la banda a primeros vecinos en una red óptica donde

la supresión completa no se logra alcanzar debido a acoplamientos con vecinos distantes y a la presencia de varias bandas.

Como perspectivas interesantes de nuestro trabajo podemos mencionar: (i) La posibilidad de extender nuestros resultados para incluir los de Martínez et al. (2014) hasta el orden de  $O(\omega^{-4})$ , y así probar las similitudes entre el régimen del continuo y el régimen discreto de la red, que en Martínez et al. (2014) son referidos como un asunto aún desconocido. (ii) Una extensión natural de nuestro trabajo es considerar un hamiltoniano *extendido* generalizado con una relación de dispersión de la forma  $2\sum_n A_n \cos nap$ , pues se sabe que la incorporación de interacciones de largo alcance en el hamiltoniano conduce a efectos interesantes como ser la supresión de los elementos efectivos de *hopping* para campos externos forzadores específicos. (iii) El estudio de la “ingeniería de interacciones” mediante el control de parámetros físicos tales como la forma del potencial estático  $U(x)$  o la dependencia temporal del campo uniforme  $f(\omega t)$  en (1); encontramos en nuestro trabajo que dentro de la aproximación de  $O(\omega^{-2})$ , la forma relevante del potencial estático debe ser lineal ( $U(X) = \alpha X$ ) o parabólica ( $U(X) = kX^2/2$ ); sin embargo, es posible que refi-

nando los resultados hasta el orden de  $O(\omega^{-n})$  para  $n > 2$ , el potencial estático  $U(X)$  pueda depender de potencias mayores de  $X$ . (iv) Se debe investigar otras formas de campos externos forzadores  $f(\tau)$  con componentes de Fourier arbitrarias, en vista de que el campo con dos componentes  $f(\tau) = 2f_1 \cos(\tau) + 2f_2 \cos(2\tau)$  considerado en este trabajo conduce a efectos físicos relevantes. (v) Sugerimos que un efecto físico observable en el contexto de la ingeniería de interacciones es la “oscilación de Bloch efectiva” (para un potencial estático lineal) donde el comportamiento dinámico de la posición semiclásica  $X(t)$  y del correspondiente valor esperado cuántico  $\langle x \rangle_t$  son idénticos; el grado de coincidencia numérica entre esas dos coordenadas dinámicas para campos estáticos arbitrarios es un tema interesante por investigar.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos sinceramente a: Dr. César Flores (IAI-UTA, Chile), Dr. Luis A. Martínez y Dr. Jean-Pierre Gallinar (USB, Venezuela) por las discusiones interesantes y estimulantes.

#### Conflicto de intereses

Los autores declaran que no hay conflicto de intereses con respecto a la publicación de éste documento.

#### REFERENCIAS

- Ashcroft N. & Mermin N. (1976), *Solid State Physics* (Holt, Rinehart and Winston)
- Bandyopadhyay M. & Dattagupta S. (2008), *Pramana J. Phys.*, **70**: 381
- Bouchard A. M. & Luban M. (1995), *Phys. Rev. B*, **52**: 5105
- Dreisow F., Bahat-Treidel O., Welt D. & Szameit A. (2011), *Opt. Lett.*, **36**: 2065
- Dunlap D. H. & Kenkre V. M. (1986), *Phys. Rev. B*, **34**: 3625
- Itin A. P. & Katsnelson M. I. (2015), *Phys. Rev. Lett.*, **115**: 075301
- Itin A. P. & Neishtadt A. (2014), *Phys. Lett. A*, **378**: 822
- Kadirko V., Ziegler K. & Kogan E. (2013), *Graphene*, **2**: 97
- Kapitza P. L. (1951), in *Collected Papers of P. L. Kapitza*, ed. D. ter Haar (Zh. Eksp. Teor. Fiz.), 588
- Kundu R. (2011), *Mod. Phys. Lett. B*, **25**: 163
- Landau L. D. & Lifschitz E. M. (1985), *Mecánica* (Reverté)
- Lenz G. (1999), *Phys. Rev. Lett.*, **83**: 963
- Longhi S. (2007), *Phys. Rev. B*, **76**: 195119
- (2008), *Phys. Rev. B*, **77**: 195326
- (2009), *Laser & Photon. Rev.*, **3**, 243
- Longhi S., Marangoni M., Lobino M., Ramponi R., Laporta P. Cianci, E. & Foglietti V. (2006), *Phys. Rev. Lett.*, **96**: 243901
- Longhi S., Dreisow F., Heinrich M., Pertsch T., Tünnermann A., Nolte S. & Szameit A. (2010) *Phys. Rev. A*, **82**: 053813
- Madison K. W., Fischer M. C., Diener R. B., Niu Q. & Raizen M. G. (1998), *Phys. Rev. Lett.*, **23**: 5093
- Marte M. & Stenholm S. (1997), *Phys. Rev. A*, **56**: 2940
- Martínez L. A., Sanjinés D. & Gallinar J.-P. (2014), *Int. J. Mod. Phys. B*, **28**: 1450173
- Rahav S., Gilary I. & Fishman S. (2003), *Phys. Rev. A*, **68**: 013820
- Reich S., Maultzsch J., Thomsen C. & Ordejón P. (2002), *Phys. Rev. B*, **66**: 035412
- Sanjinés D. & Gallinar J.-P. (2001), *Phys. Rev. B*, **64**: 054301
- Wright A. R., Liu F. & Zhang C. (2009), *Nanotechnology*, **20**(40): 405203



## ESTADO Y TENDENCIA DE LA EDUCACIÓN NUCLEAR EN EL ESTADO PLURINACIONAL DE BOLIVIA

### STATE AND TREND OF THE NUCLEAR EDUCATION IN THE PLURINATIONAL STATE OF BOLIVIA

BUSTOS ESPINOZA R. O. E.<sup>1</sup>, BURGOA MARIACA A.<sup>1</sup>, POMA MAMANI I.<sup>1</sup>, TICONA PERALTA R. D.<sup>1</sup>, SUBIETA VASQUEZ M.<sup>1</sup>, RAMÍREZ ÁVILA G. M.<sup>1</sup>, RALJEVIC ERGUETA M.<sup>1,7</sup>, LUCANO M.<sup>2</sup>, MAMANI R.<sup>3</sup>, VARGAS LUCANA M.<sup>4</sup>, CHÁVEZ RÍOS S.<sup>5</sup>, TORRICO FERRUFINO S.<sup>6</sup>, COCA VALDEZ D.<sup>6</sup>, & ROMERO BOLAÑOS L.<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Carrera de Física, Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), La Paz, Estado Plurinacional de Bolivia

<sup>2</sup>Carrera de Física, Universidad Mayor de San Simón (UMSS), Estado Plurinacional de Bolivia

<sup>3</sup>Carrera de Física, Universidad Autónoma Tomás Frías (UATF), Estado Plurinacional de Bolivia

<sup>4</sup>Instituto Boliviano de Ciencia y Tecnología Nuclear (IBTEN), Estado Plurinacional de Bolivia

<sup>5</sup>Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN), Estado Plurinacional de Bolivia

<sup>6</sup>Ministerio de Energías, Unidad de aplicaciones nucleares, Estado Plurinacional de Bolivia &

<sup>7</sup>Sociedad Boliviana de Física (SOBOFI)

#### RESUMEN

El Programa Nuclear Boliviano tiene el objetivo de promover, dirigir, implementar y difundir el uso pacífico de la tecnología nuclear en el país así como actualizar y apoyar a los sectores industrial, científico, tecnológico y académico. En ese sentido el gobierno nacional planifica la Construcción e Implementación del Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear, cuyo operador será la Agencia Boliviana de Energía Nuclear - ABEN. Asimismo, el Instituto Boliviano de Ciencia y Tecnología Nuclear - IBTEN, autoridad nacional competente en materia de uso de radiaciones ionizantes, será la entidad que tendrá a su cargo el licenciamiento para las fases de construcción, operación y cierre de dichas instalaciones.

En este marco institucional, las universidades se sumarán al proyecto mediante la realización de investigaciones, tanto teóricas como experimentales, así como también en fortalecer programas de formación académica ya establecidos, vinculados al área nuclear. Existen programas que fortalecen el estudio del área nuclear, como ser: la Olimpiada Boliviana de Física, la Olimpiada Boliviana de Astronomía y Astrofísica, en coordinación con el Ministerio de Educación.

Por otro lado, la Carrera de Física de la UMSA cuenta con el programa del Diplomado en Física para profesores de Colegio, buscando el mejoramiento continuo del sistema educativo boliviano en estas disciplinas: Física, Astronomía y Astrofísica y sus directas transversales: Biología, Química, Matemática, Geología, Ciencias Sociales, etc.

Código(s) PACS: 01.40.d — 01.40.Di — 87.52.g

*Descriptor(es):* Educación — Diseño y evaluación de cursos — Monitoreo de radiación, control y seguridad.

#### ABSTRACT

Bolivia's National Nuclear Program has as its objective to promote, manage, and implement the pacific use of nuclear technology in Bolivia, as well as, to bring up to date and support the country's industrial, scientific, technological and academic sectors. The Plurinational State of Bolivia has put in place the construction and implementation of the Bolivian Research and Development Center for Nuclear Technology under the administration of The Bolivian Agency for Nuclear Energy (ABEN). This project will also involve the Bolivian Institute of Nuclear Science and Technology (IBTEN) which will oversee the construction and operation of the Nuclear Center. Within this context Bolivian universities are stepping up research, both experimental and theoretical, as well as, strengthening existing training programs related to nuclear science and technology.

Academics in coordination with the Ministry of Education have been promoting and implementing programs that strengthen studies in the field of nuclear physics through activities such as the Bolivian Physics Olympics and the Bolivian Astronomy and Astrophysics Olympics. In addition the Physics Department of UMSA implements a Physics Diploma program for school teachers. The program seeks to update teachers in disciplines, such as, physics, astronomy, astrophysics and also biology, chemistry, mathematics, social sciences, amongst others within the Bolivian education system.

*Subject headings:* Education — Course design and evaluation — Radiation monitoring, control, and safety.

## CONTENIDO

1. HISTORIA DE LAS ACTIVIDADES NUCLEARES
2. ESTADO DE LA EDUCACION EN EL AREA NUCLEAR Y ANTECEDENTES
  - 2.1. INSTITUCIONES ACADÉMICAS Y DE INVESTIGACIÓN
    - 2.1.1. Carrera de Física, Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), La Paz
      - 2.1.1.1. ANTECEDENTES Carrera de Física - UMSA (La Paz)
      - 2.1.1.2. MISIÓN - VISIÓN
      - 2.1.1.3. OBJETIVOS
      - 2.1.1.4. PERFIL PROFESIONAL
      - 2.1.1.5. DESCRIPCIÓN DE LAS MATERIAS RELACIONADAS CON LA FÍSICA NUCLEAR
      - 2.1.1.6. TESIS DE GRADO Y POSTGRADO RELACIONADAS CON FÍSICA NUCLEAR REALIZADAS EN LA CARRERA DE FÍSICA - UMSA
      - 2.1.1.7. INSTITUTO DE INVESTIGACIONES FÍSICAS (IIF)
        - 2.1.1.8. PUBLICACIONES DEL IIF EN RELACIÓN A LA FÍSICA NUCLEAR
    - 2.1.2. Carrera de Física, Universidad Mayor de San Simón (UMSS), Cochabamba
      - 2.1.2.1. ANTECEDENTES Carrera de Física - UMSS (Cochabamba)
      - 2.1.2.2. PERFIL PROFESIONAL
      - 2.1.2.3. MERCADO DE TRABAJO
      - 2.1.2.4. OBJETIVOS
      - 2.1.2.5. MATERIA(S) RELACIONADAS CON LA FÍSICA NUCLEAR
      - 2.1.2.6. TESIS DE GRADO RELACIONADAS CON FÍSICA NUCLEAR REALIZADAS EN LA CARRERA DE FÍSICA - UMSS
      - 2.1.2.7. PUBLICACIONES EN LA CARRERA DE FÍSICA - UMSS EN RELACIÓN A LA FÍSICA NUCLEAR
    - 2.1.3. Carrera de Física, Universidad Autónoma Tomás Frías (UATF), Potosí
      - 2.1.3.1. ANTECEDENTES Carrera de Física - UATF (Potosí)
      - 2.1.3.2. DATOS PRINCIPALES DE LA CARRERA

<sup>1</sup> rbustos@fcfn.edu.bo,  
 anwibuma@anwibuma.com,  
 isaacpoma@gmail.com,  
 martin.alfonso.subieta.vasquez@cern.ch,  
 rticona@fcfn.edu.bo,  
 mravila@fiumsa.edu.bo  
<sup>2</sup> mjlucono@yahoo.com  
<sup>3</sup> raulm2k13@hotmail.com  
<sup>4</sup> marcelo.vargas.fis@gmail.com  
<sup>5</sup> chavez.rios.silverio@gmail.com  
<sup>6</sup> salvador.torrico@minenergias.gob.bo,  
 diegococavaldez@gmail.com,  
 romero30@gmail.com

## DE FÍSICA

- 2.1.3.3. MISIÓN Y VISIÓN
- 2.1.3.4. OBJETIVOS
- 2.1.3.5. NORMAS DE TITULACIÓN
- 2.1.3.6. PERFIL PROFESIONAL
- 2.1.3.7. ÁREA DE ACCIÓN
- 2.1.3.8. MATERIA(S) RELACIONADAS CON LA FÍSICA NUCLEAR
- 2.1.3.9. TESIS DE POSTGRADO RELACIONADAS CON FÍSICA NUCLEAR REALIZADAS EN LA CARRERA DE FÍSICA - UATF
- 2.1.3.10. PUBLICACIONES REALIZADAS EN LA CARRERA DE FÍSICA - UATF, RELACIONADAS CON FÍSICA NUCLEAR
- 2.2. SOCIEDAD BOLIVIANA DE FÍSICA (SOBOFI)
  - 2.2.1. PRESENTACIONES EN LAS REUNIONES NACIONALES DE LA SOBOFI EN RELACIÓN A LA FÍSICA NUCLEAR
- 2.3. AGENCIA BOLIVIANA DE ENERGIA NUCLEAR (ABEN)
  - 2.3.1. CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO EN TECNOLOGIA NUCLEAR
- 2.4. PROGRAMA NUCLEAR BOLIVIANO
  - 2.4.1. ANTECEDENTES
  - 2.4.2. RESUMEN DE INICIATIVAS DE DESARROLLO DEL SECTOR
  - 2.4.3. RRHH
- 2.5. INSTITUTO BOLIVIANO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA NUCLEAR (IBTEN)
  - 2.5.1. MISIÓN - VISIÓN
  - 2.5.2. CENTRO DE INVESTIGACIONES Y APLICACIONES NUCLEARES (CIAN)
    - 2.5.2.1. UNIDAD DE ANALISIS Y CALIDAD AMBIENTAL (UACA)
    - 2.5.2.2. UNIDAD DE INVESTIGACIÓN Y APLICACIONES NUCLEARES (UIAN)
  - 2.5.3. CENTRO DE PROTECCIÓN Y SEGURIDAD RADIOLÓGICA (CPSR)
    - 2.5.3.1. UNIDAD DE RADIOPROTECCIÓN EN INSTALACIONES (URI)
    - 2.5.3.2. UNIDAD DE DOSIMETRÍA DE RADIACIONES IONIZANTES (UDRI)
  - 2.5.4. CENTRO DE DOCUMENTACIÓN NUCLEAR (CDN)
3. LEGISLACIÓN
4. INTERACCION GOBIERNO, INDUSTRIA Y ACADEMIA
5. INTERCAMBIO Y MOVILIDAD ESTUDIANTIL
6. USO DE TIC Y DE LA COMUNICACIÓN
  - 6.1. PUBLICACIONES EN LA PRENSA NACIONAL
7. COOPERACIÓN Y PARTICIPACIÓN EN REDES ACADÉMICAS
  - 7.1. CONVENIOS
  - 7.2. PARTICIPACIÓN EN REDES ACADÉMICAS

## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 9. BIBLIOGRAFÍA

#### 1. HISTORIA DE LAS ACTIVIDADES NUCLEARES (Ministerio de Educación 2012)

Las actividades en el ámbito nuclear en el Estado Plurinacional de Bolivia se remontan hacia comienzos del año de 1960 con la creación de la Comisión Boliviana de Energía Nuclear, COBOEN, creación impulsada por las actividades de investigación que se desarrollaban en el Instituto de Física Cósmica de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA). La misión principal de la COBOEN fue la de promover, dirigir, implementar y difundir el uso pacífico de la tecnología nuclear en el país.

Muchas de las actividades nucleares se iniciaron o fueron promovidas por la necesidad de medir y monitorear las radiaciones provenientes de las pruebas nucleares que Francia y otros países, estaban haciendo por aquellos años en el Pacífico.

Otro hito histórico de gran importancia en el país, fueron las actividades, que empezaron también por los años 60, en torno al uso de isótopos radiactivos, o también llamados radioisótopos, en la medicina, muy en particular, el empleo del Fósforo-32 y el Iodo-131, dos radioisótopos de extrema utilidad y muy utilizados ya por más de 70 años en todo el mundo para tratar un desorden sanguíneo como la policitemia vera y estudiar desórdenes de la glándula tiroidea respectivamente. Es interesante señalar que con el uso del iodo radiactivo, muchos países, incluido el Estado Plurinacional de Bolivia, dieron inicio al uso de la energía nuclear con fines pacíficos, en este caso particular, al inicio de la especialidad que hoy conocemos como medicina nuclear.

Estas actividades de utilización de radioisótopos en la medicina fueron apoyadas en buena medida por la cooperación de Argentina y Brasil que culminó con la fundación del Instituto de Medicina Nuclear en el año 1963 dependiente de la recientemente creada COBOEN, con lo que se impulsó de manera significativa las actividades de la utilización pacífica de la energía nuclear en el país.

Los primeros trabajos de prospección de minerales radiactivos fueron ejecutados por la empresa SWEDISH y el Servicio Geológico de Bolivia (GEOBOL) en 1965, que incluían radiometría y magnetometría aérea de la Cordillera de los Frailes, de acuerdo con los datos de la entidad estatal.

En 1970, dirigió la búsqueda de minerales de uranio en rocas de formación volcánica, en la cordillera de los Frailes con resultados positivos que llevaron a la localización del depósito de este elemento en COTAJE y las “anomalías HUANCARANI, TORKO, LOS DIQUES, THOLAPALCA y otras anomalías menores”. Por otra parte según estudios realizados en el año 1953 por la comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos, se tendría una interesante mineralización de Uranio y Cobalto en CHULLCHUCANI al Noroeste (NO) de la ciudad de Potosí.

El sitio más rico en mineral de Uranio es el cerro

de COTAJE, que cuenta con una reserva de 35000 toneladas de dicho mineral con un promedio en contenido de entre 0,069 % y 0,078 % de U-238.

Las actividades de la COBOEN abarcaron varios ámbitos de la actividad nuclear incluyendo la organización de estructuras regulatorias relativas al uso de las radiaciones ionizantes y de los radioisótopos y la formación de recursos humanos con la cooperación internacional, tanto de países vecinos como Argentina y Brasil, además de Francia, Estados Unidos y del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

En el año 1967, la COBOEN en representación de Bolivia es reconocida oficialmente como miembro de la OIEA y en el año 1969 Bolivia se incorpora como estado miembro de La Comisión Interamericana de Energía Nuclear (CIEN) organismo especializado de la Organización de Estados Americanos (OEA).

En los años 70, el Departamento de Ingeniería Nuclear de la COBOEN llegó a plantear la instalación de un reactor nuclear de investigaciones para su utilización en la producción de radioisótopos para la medicina, industria y agricultura, como también para aplicaciones analíticas y la formación de recursos humanos. Esta iniciativa no prosperó por no contarse con los recursos necesarios, a pesar que la Dirección Ejecutiva de aquella época decidió asignar los terrenos del Centro Nuclear en la localidad de Viacha para este fin.

Entre las actividades más sobresalientes de la COBOEN se pueden señalar la búsqueda de minerales de uranio en el territorio nacional que se desarrolló a los comienzos del año 1974 y que culminó con la operación de una planta piloto de producción de Urania (Óxido de Uranio, también conocido como yellow cake en el idioma inglés (Wikipedia 2010)) en 1977, llegándose a producir algunos kilogramos de este material, con una pureza del 60 %, durante los siguientes 5 a 6 años que duró esta operación que se la denominó piloto. Dicho trabajo fue reportado al en ese entonces Presidente de la República general Hugo Banzer Suárez, por el Ing. Willy Vargas Enriquez, ex docente de la Carrera de Química de la Universidad Autónoma Tomás Frías (UATF), quien dirigió los trabajos en la planta del cerro de COTAJE de Potosí y la explotación de uranio, actividad que sirvió para adquirir experiencia en la minería nuclear en el país y formar personal en esta área, pese a que la reserva encontrada en el lugar era pequeña y no era considerada un yacimiento. “Se pretendía con COTAJE una pequeña producción, por que el lugar no era considerado un yacimiento de uranio (la cantidad de toneladas de reserva era inferior a la aconsejable por los expertos de ese entonces), así es que sirvió solamente para entrenamiento e investigación, en la época de oro de la energía nuclear”, dijo el profesional que dirigió los trabajos de investigación y la obtención del yellow cake en 1974 en la mina COTAJE. Además y debido al alto costo de las operaciones de extracción y proceso de obtención del yellow cake no se podía competir con el de otros países y la empresa se tuvo que cerrar.

La prospección y exploración de minerales radiactivos continuó muy activa y con fuerte soporte estatal hasta la cesación de COBOEN y la creación del Instituto Boliviano de Ciencias y Tecnología Nuclear (IBTEN) en Junio de 1983, como la institución científico técnica descentralizada con personería jurídica, patrimonio propio, autonomía administrativa y financiera dependiente de instancias gubernamentales.

El IBTEN se constituye en el brazo técnico de la Autoridad Ambiental Competente y/u otras instancias nacionales, departamentales y/o Gobiernos Municipales.

Otro aspecto sobresaliente es el que se dio a la formación de recursos humanos mediante becas que se consiguieron a través de convenios de cooperación con países amigos como Argentina, Brasil, Francia, Italia y el OIEA.

## 2. ESTADO DE LA EDUCACION EN EL AREA NUCLEAR Y ANTECEDENTES

### 2.1. INSTITUCIONES ACADÉMICAS Y DE INVESTIGACIÓN

#### 2.1.1. Carrera de Física, Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), La Paz (Física - UMSA 2018)

##### 2.1.1.1. ANTECEDENTES CARRERA DE FÍSICA - UMSA (LA PAZ)

La Carrera de Física de la UMSA, se crea como Departamento de Física dependiente del antiguo Instituto Superior de Ciencias Básicas en el año 1966, integrándose como tal a la Facultad de Ciencias Puras y Naturales el año 1972.

##### 2.1.1.2. MISIÓN - VISIÓN

La Ciencia es uno de los factores más importantes para el progreso general de los países. Tanto porque la creación de conocimiento contribuye al desarrollo tecnológico independiente cuanto porque el adquirir y mantener el conocimiento científico ya logrado permite y facilita la transferencia tecnológica necesaria. Por todo ello, la formación de profesionales en ciencias, particularmente en Física, es una tarea primordial como inversión, a corto y largo plazos, que garantiza la existencia de medios técnicos para la futura industrialización de nuestro país; además del valor cultural intrínseco que se genera.

##### 2.1.1.3. OBJETIVOS

La Carrera de Física es una unidad dependiente de la Facultad de Ciencias Puras y Naturales de la UMSA y tiene los siguientes objetivos fundamentales:

- Formación de investigadores profesionales en Física, con una sólida formación teórica y experimental en los fundamentos de las principales áreas de esta ciencia.
- Sostenimiento y desarrollo de la Ciencia Física, mediante la práctica sistemática de la investigación científica con énfasis preferente en tópicos de potencial aplicación al desarrollo tecnológico nacional

- Difusión de los conocimientos de la Física en la sociedad, tanto por sus valores culturales cuanto por sus valores pragmáticos.

##### 2.1.1.4. PERFIL PROFESIONAL

El licenciado en Física es el profesional capacitado mediante una formación profesional de cinco años. Estudia e interpreta los fenómenos naturales aplicando el método científico, tiene capacidad de abstracción y habilidad en el manejo del instrumento matemático. Puede desempeñar las siguientes funciones principales dentro del proceso productivo y de enseñanza:

- Investigación pura y aplicada.
- Consultoría y asesoramiento técnico-científico.
- Docencia universitaria, institutos y colegios.

Desarrolla sus actividades en los campos: energías alternativas como solar, eólica; energías no convencionales como nuclear; ciencia de materiales, radiografía industrial, rayos X, vacío, criogenia, capa de ozono, radiación ultravioleta, óptica, láser, rayos cósmicos, astronomía, astrofísica, semiconductores, física médica, radioterapia, computación, normas y patrones.

La Carrera de Física integra varias organizaciones internacionales y mantiene convenios con universidades latinoamericanas, norteamericanas, europeas y asiáticas; de modo que el profesional físico tiene facilidad de conseguir becas de postgrado.

##### 2.1.1.5 DESCRIPCIÓN DE LAS MATERIAS RELACIONADAS CON LA FÍSICA NUCLEAR

En la Carrera de Física, FCPN, UMSA se dictan las siguientes materias relacionadas con la Física Nuclear:

- FÍSICA NUCLEAR Y DE PARTÍCULAS
- LABORATORIO MEDIO II
- LABORATORIO AVANZADO
- FÍSICA MODERNA
- MECÁNICA CUÁNTICA
- CALCULO NUMÉRICO Y PROGRAMACIÓN
- TÓPICOS ESPECIALES DE LA FÍSICA EXPERIMENTAL II: CENTRALES NUCLEARES
- INTRODUCCIÓN A LA FÍSICA NUCLEAR (DFIS\*)
- GESTION DEL CONOCIMIENTO NUCLEAR (DFIS)
- TÓPICOS ESPECIALES EXPERIMENTALES DE LA FISICA: NEUTRONICA 1

- FÍSICA DE LAS RADIACIONES (SERVICIO A LA FACULTAD DE MEDICINA, ENFERMERIA, NUTRICION Y TECNOLOGIA MEDICA)

\* Diplomado en Física para Profesores, 2008 - 2017.

A continuación se procede a dar información más detallada sobre cada uno de estos tópicos:

#### FÍSICA NUCLEAR Y DE PARTÍCULAS

7mo semestre del ciclo de profesionalización. carga horaria: 4 horas por semana en 2 sesiones, 2 horas prácticas en una sesión.

Objetivos Generales: Introducir al estudiante en los conceptos fundamentales de la física nuclear y de partículas así como también en las diferentes aplicaciones de esta rama de la física.

Contenido Mínimo: Conceptos Básicos Nucleares - Estructura Nuclear - Interacciones de la radiación Nuclear con la materia - Decaimiento Radiactivo - Reacciones Nucleares - Partículas Elementales

Nivel de la Materia: Elements of Nuclear Physics, Meyerhoff W., McGraw Hill Co. (1967)

#### LABORATORIO MEDIO II

6to semestre del ciclo de profesionalización.

Carga horaria: 6 horas por semana en 1 o 2 sesiones 3 horas prácticas en una sesión.

Objetivos Generales: Desarrollar experimentos típicos de la física moderna haciendo énfasis en las técnicas experimentales acordes al nivel del curso. Profundizar la exigencia en cuanto a la redacción y formato de los reportes científicos- Complementar el aprendizaje de las materias de física moderna. Proporcionar al estudiante técnicas experimentales incluyendo instrumentación del nivel apropiado..

Contenido Mínimo: Experimentos sobre física Atómica y Molecular: Tratamiento de Datos - Medida de la velocidad de la luz, Experimento de Franck - Hertz - Rayos X - Espectrometría - Etc.

Nivel de la Materia: Experiments in Modern Physics, Melissinos, Acad. Press. (1956)

#### LABORATORIO AVANZADO

7mo semestre del ciclo de profesionalización.

Carga horaria: 6 horas por semana en 1 o 2 sesiones, 3 horas prácticas en una sesión.

Objetivos Generales: Profundizar el estudio y la aplicación de la teoría de errores, registro de datos y análisis estadísticos especializados mediante la introducción al estudiante a las diferentes áreas de investigación existentes en la carrera de Física. Desarrollar proyectos individuales y grupales.

Contenido Mínimo: Experimentos Avanzados de diferentes áreas: Tratamiento de Datos - Física Nuclear - Rayos Cósmicos - Estado Sólido - Otros - Proyecto para la evaluación final

Nivel de la Materia: Experiments in Modern Physics, Melissinos, Acad. Press. (1956)

#### FÍSICA MODERNA

6to semestre del ciclo de profesionalización.

Carga horaria: 4 horas por semana en 1 o 2 sesiones, 2 horas prácticas en una sesión.

Objetivos Generales: Extender las aplicaciones

particulares de la ecuación de Schrodinger a problemas en 3 dimensiones: átomo de Hidrogeno, átomo de Helio, Moléculas simples y átomos multi-electrónicos.

Contenido Mínimo: Introducción a la Física Atómica - Momentum Angular - Principio de Pauli - Átomos Multielectrónicos - Espectroscopia Atómica - Átomos y Moléculas - Espectros Moleculares - Potencial Periódico - Estructura de Bandas

Nivel de la Materia: Física Cuántica, Eisberg & Resnick, Ed. LIMUSA (1978)

#### MECÁNICA CUÁNTICA

8vo semestre del ciclo de profesionalización.

Carga horaria: 4 horas por semana en 2 sesiones, 2 horas prácticas en una sesión.

Objetivos Generales: Introducir al alumno al estudio de la mecánica cuántica, sus conceptos fundamentales y sus aplicaciones más comunes. Comprender el pensamiento científico a partir de consideraciones filosóficas desde el punto de vista cuántico.

Contenido Mínimo: Conceptos básicos de la mecánica cuántica - Formalismo de Heisenberg - Evolución Temporal de los estados cuánticos - Formalismo general de la mecánica cuántica - Oscilador Armónico - Momentum Angular - Fuerzas Centrales - Método de Perturbaciones y otros métodos aproximativos - Estructura Atómica - Dispersión.

Nivel de la Materia: Fundamentos de Mecánica Cuántica, Worowitz, Ed. Reverte (1973)

#### CALCULO NUMÉRICO Y PROGRAMACIÓN

4to semestre del ciclo de profesionalización.

Carga horaria: 4 horas por semana en 2 sesiones, 2 horas prácticas en una sesión.

Objetivos Generales: Introducir a los estudiantes a resolver problemas de algebra y calculo usando técnicas y métodos numéricos, con el objetivo de desarrollar aplicaciones de los métodos numéricos. Se desarrollan algoritmos que sean posibles de implementarlos en un lenguaje de programación.

Contenido Mínimo: Computación y programación - Raíces de Ecuaciones Algebraicas y Trascendentes - Sistemas de Ecuaciones Lineales - Aproximación Polinomial - Diferenciación e Integración Numérica - Ecuaciones Diferenciales Ordinarias - Simulaciones.

Nivel de la Materia: Métodos Numéricos, Luthe, Olivera y Shulz, Ed. Limusa (1980)

#### TÓPICOS ESPECIALES DE LA FÍSICA EXPERIMENTAL II: CENTRALES NUCLEARES

Ciclo Formativo.

Carga horaria: 4 horas por semana en 2 sesiones, 2 horas prácticas en una sesión.

Objetivos Generales: El objetivo principal, es dotar una visión de las centrales nucleares, desde la extracción del mineral hasta el consumo del combustible en centrales de generación de electricidad o reactores de producción y sus aplicaciones.

Contenido Mínimo: Introducción a la Energía Nuclear - Ciclo del Combustible - Aplicaciones de la Energía Nuclear: Generación de Electricidad - La Energía Nuclear y el Hombre

Nivel de la Materia: Nuclear Reactor Physics, E. E.

Lewis, Ed. Academic Press (2008)

**INTRODUCCIÓN A LA FÍSICA NUCLEAR  
MÓDULO DEL DIPLOMADO EN FÍSICA PARA  
PROFESORES DE COLEGIO (DFÍS)**

Carga horaria: 200 horas académicas durante 17 semanas: 15 virtuales y 2 presenciales.

Objetivos Generales: Introducir en los profesores de colegio de todo el país los conceptos básicos de la física nuclear.

Contenido Mínimo: Estructura Nuclear - El Núcleo Atómico - Energía de enlace - La Radiactividad - Reacciones Nucleares de Radiactividad - Otras reacciones Nucleares.

Nivel de la Materia: Apuntas de clase, Poma Mamani I., Carrera de Física, UMSA (2015), Apuntes para el DFIS, Calcina Nogales M., Carrera de Física, UMSA (2017)

**TÓPICOS ESPECIALES EXPERIMENTALES DE LA FÍSICA: NEUTRONICA 1**

Ciclo Formativo

Carga horaria: 4 horas por semana en 2 sesiones.

Objetivos Generales: El objetivo principal, es dotar una visión y formación en NEUTRONICA, funcionamiento y explotación de los reactores nucleares, reactores de producción de radioisótopos, de energía eléctrica y sus aplicaciones.

Contenido Mínimo: Historia de la neutrónica - Interacciones neutrón - materia - Reacción en cadena, flujo, tasa de reacción - Reacción en cadena, flujo, tasa de reacción - Frenado de neutrones sin absorción.

Nivel de la Materia: Nuclear Reactor Physics, E. E. Lewis, Ed. Academic Press (2008)

**FÍSICA DE LAS RADIACIONES**

Ciclo Formativo

Carga horaria: 4 horas por semana en 2 sesiones

Objetivos Generales: Esta materia constituye una introducción a la Física, pero no desde el punto de vista clásico, como generalmente ocurre en este tipo de cursos, sino mas bien desde una óptica pragmática, en el sentido de que se tratarán temas directamente relacionados con la Carrera que siguen los estudiantes que cursarán esta materia. Por tanto, el objetivo general de la materia es el de proporcionar a los estudiantes un conocimiento global de la Física relacionada con su campo de acción.

Contenido Mínimo: Repaso de conceptos de física general - Vibraciones y ondas - Física Moderna: Elementos de Teoría Especial de la Relatividad y Mecánica Cuántica - Introducción a la Física Nuclear y de Partículas - Física de las radiaciones ionizantes - Principios físicos del empleo de las radiaciones en medicina - Elementos de protección radiológica

Nivel de la Materia: The physics of radiology. Johns/Cunningham. Thomas Books, 4ta. Ed. (1983).

**2.1.1.6. TESIS DE GRADO Y POSTGRADO RELACIONADAS CON FÍSICA NUCLEAR REALIZADAS EN LA CARRERA DE FÍSICA - UMSA.**

A lo largo de su historia, la Carrera de Física de la UMSA ha graduado profesionales tanto en pregrado como en postgrado que elaboraron sus tesis en temas

relacionados a Física Nuclear. La lista de estos trabajos es la siguiente:

**TESIS DE LICENCIATURA REFERENTES A LA FÍSICA NUCLEAR (UMSA)**

1. Tec. Sup. Fernando Barrientos. "Moderación y medición del flujo de neutrones". (1980)
2. Dr. Rolando Ticona. "Telescopio Espectrómetro de Neutrones Rápidos (14 MeV)", (1986)
3. M. Sc. Andrés Burgoa. "Baritina como blindaje a neutrones de 14 MeV". (1988)
4. Dr. Americo Salas. "Distribución de dosis acumuladas en un phantom", (1988)
5. M. Sc. Abelardo Alarcón. "Distribución energética de los neutrones en el generador de neutrones", (1990)
6. Lic. Roberto Chavez. "Cálculo de distintas secciones eficaces con el generador de neutrones". (1991)
7. Dr. Marcelo Ramirez. "Efectos y caracterización de las radiaciones en cristalinicos de mamíferos". (1995)
8. Lic. Francisco Sanchez. "Simulación de Montecarlo para la determinación de la dosis absorbida bajo condiciones referenciales de telecobalto terapia". (2009)
9. Lic. Ismael Vilca. "Determinación de ecuaciones empíricas en el haz de radiación gamma del Cobalto - 60 para uso de radioterapia". (2012)
10. Lic. Marco Manriquez. "Aleaciones de bajo punto de fisión como blindaje para radiación gamma". (2012)

**TESIS DE MAESTRÍA REFERENTES A LA FÍSICA NUCLEAR (UMSA)**

1. Carlos Adrián Tellería Narváez. "Aplicación de fluorescencia de rayos-x por reflexión total en la determinación de concentración de oligoelementos en cabello de niños para la estimación de niveles nutricionales". (27/04/2016)

**2.1.1.7. INSTITUTO DE INVESTIGACIONES FÍSICAS (IIF) - UMSA**

En el año de 1952 se creó oficialmente el Laboratorio de Física Cósmica de Chacaltaya, dependiente de la Universidad Mayor de San Andrés, bajo la coordinación del Sr. Ismael Escobar.

El antecedente que permitió la creación oficial de este laboratorio fue la confirmación experimental de la existencia del mesón  $\pi$  y su decaimiento en el muón en las placas de emulsiones nucleares colocadas en el Monte Chacaltaya por los científicos: Prof. Cecil Powel, Dr. Cesar Lattes, Dr. Giuseppe Occhialini de la Universidad de Bristol.

Este descubrimiento hizo acreedor al premio Nobel de Física en 1949 al Prof. H. Yukawa del Japón por haber predicho la existencia de esta partícula responsable de las fuerzas nucleares y al Prof. Cecil Powell al mismo premio en 1950 como cabeza del grupo que logró la confirmación experimental de su existencia.

Desde entonces han pasado por este laboratorio una gran cantidad de científicos de gran renombre. La investigación en rayos cósmicos que se lleva a cabo en el Laboratorio de Chacaltaya ha contribuido grandemente al desarrollo de esta rama de la física en el mundo.

Posteriormente el Laboratorio de Física Cósmica de Chacaltaya paso bajo tuición del Instituto de Investigaciones Físicas (IIF) que es una unidad dependiente de la Carrera de Física, FCPN, UMSA y concentra las siguientes actividades de investigación:

- Física de altas energías (Rayos Cósmicos y Física de partículas)
- Física de la Atmósfera
- Geofísica
- Física Teórica
  - Física del Estado Sólido
  - Dinámica No Lineal y Sistemas Complejos
- Física Aplicada
  - Ultrasonido
  - Metalografía
- Física Nuclear

El 2 de Mayo de 2016, el premio Nobel de Física 2015, el Prof. Takaaki Kajita, visito Bolivia y anuncio la propuesta de un nuevo proyecto de rayos cósmicos en altura, entre el Instituto para la Investigación de Rayos Cósmicos (ICRR, por su sigla en Inglés) de la Universidad de Tokio, Japón y el IIF de la UMSA, Bolivia.

#### 2.1.1.8. PUBLICACIONES DEL IIF EN RELACIÓN A LA FÍSICA NUCLEAR

1. R.O.E. Bustos Espinoza, I. Poma Mamani & G.M. Ramírez Ávila. "Material educativo para el fortalecimiento de la cultura nuclear en Bolivia". Revista Boliviana de Física 27, 35-41. (2015).
2. Tellería Narvaez, C.A., Fernández Alcázar, S., Barrientos Zamora, F.G., Chungara Castro, J., Luna Lauracia, I., Mamani Tola, H., Mita Peralta, E., Muñoz Gosálvez, A.O., Romero Bolaños, L.E., & Ramírez Ávila, G.M.. "X-Ray Fluorescence to Determine Zn in Bolivian Children using Hair Samples". Nuclear Data Sheets 120, 258-260. (2014).
3. C.A Tellería Narvaez, S. Fernández Alcázar, F. G. Barrientos Zamora, A. O. Muñoz Gosálvez, L.E. Romero Bolaños, & G.M. Ramírez Ávila. "Aplicación de fluorescencia de raxos x por reflexión total en la determinación de concentración de zinc en cabello de niños para la estimación de niveles nutricionales". Revista Boliviana de Física 24, 1-6. (2014).
4. "Estudio de la Dinamica de Recarga en la Zona no Saturada, Empleando la Tecnica e Isotopos Ambientales". Revista Boliviana de Física. (1999).
5. "Dosimetria Gamma". Revista Boliviana de Física. (1998).
6. G.M. Ramírez Ávila & A. Alarcón. "Caracterización de los efectos de radiaciones x, gamma y neutrónica térmica en soluciones de cristalino". Revista Boliviana de Física 2, 90-97. (1996).
7. "Medición de la Energía de enlace del deuterio". Revista Boliviana de Física. (1995).
8. G.M. Ramírez Ávila & A. Alarcón. "Efectos de las radiaciones x, gamma y neutrónica térmica en soluciones de cristalino y su relación con las variaciones de concentración de proteínas". Memorias de la reunión sobre protección radiológica del Acuerdo Regional de Cooperación para la Promoción de la Ciencia y Tecnología Nucleares en América Latina (ARCAL), 131-136. (1995).
9. A. Alarcón, G.M. Ramírez Ávila, S. Fernández, C. Iñiguez & V. Ergueta "Resultados del análisis radiométrico realizado en muestras minerales de la empresa FUNESTAÑO". Revista Boliviana de Química 12, 54-58. (1995)
10. G. Garcia, A. Rondon, R. Torrez, S. Chavez, R. Chavez., E. Coronel, J. C. Soria, J. Llaguno. "Estudio e implementación del Monitor de neutrones", CIN-Viacha, (1983)
11. J. A. Bravo. "Espectroscopía de resonancia magnética nuclear aplicada a la química de productos naturales", Revista Boliviana de Física 7, Vol 2, 74. (2001).
12. I. Poma, "Dosimetría Gamma". Revista Boliviana de Física 4, 61. (1998).
13. F. Bejarano. "Alcance de radiación beta de dermoplacas de estroncio y detección de bremsstrahlung", Revista Boliviana de Física 4, 129. (1998).
14. A. Salas, S. Fernandez. "Medición de la energía de enlace del deuterio". Revista Boliviana de Física 1, 128. (1995).

2.1.2. *Carrera de Física, Universidad Mayor de San Simón (UMSS), Cochabamba (Física - UMSS 2018)*

2.1.2.1. ANTECEDENTES CARRERA DE FÍSICA - UMSS (Cochabamba)

La Universidad Mayor de San Simón fue fundada mediante ley de 5 de noviembre de 1832 por el Mariscal Andrés de Santa Cruz. La Misma ley dispuso la creación y funcionamiento de una Academia de Practicantes Juristas, con la que en realidad se inicia la Facultad de Derecho. Entre 1834 y 1835, la UMSS otorga los tres primeros títulos de Doctor en Derecho. El Decreto de 25 de agosto de 1845, promulgado como Ley de 12 de noviembre de 1846, por el que la República es dividida en tres distritos universitarios, se dictó bajo la presidencia del Gral. José Ballivián; en consecuencia, a Cochabamba le correspondió atender el distrito de Santa Cruz de la Sierra. En 1863 se funda la Facultad de Medicina, que tendrá vigencia hasta el año 1872; sin embargo, vuelve a funcionar por una Orden Suprema del Dr. Aniceto Arce de 4 de febrero de 1892. La Facultad de Derecho y la Facultad de Medicina fueron las primeras unidades académicas con las que comenzó a funcionar la Universidad Mayor de San Simón. Las universidades españolas sirvieron de modelo e influyeron directamente en la organización de la Universidad Colonial de Nuevo Mundo, de modo particular en las del Alto Perú. Sin embargo, pese a los moldes feudales en los que se desenvolvía la vida intelectual de las universidades, en ellas germinaron las ideas libertarias de la República.

Al influjo del pensamiento reformista de Córdoba. Plasmada en el "Manifiesto Liminar de la Juventud Argentina", publicado el 21 de julio de 1918 en la "Gaceta Universitaria" de la Universidad de San Carlos, la efervescencia de las luchas autonomistas adquirieron una dimensión continental. En Bolivia -en base al referéndum del 11 de enero de 1931, convocado por el gobierno del Gral. Carlos Blanco Galindo- lograron materializarse en el Decreto Ley de 23 de febrero de 1931, por el que se sancionó la incorporación de la Autonomía Universitaria a la Constitución Política del Estado.

Pero no es suficiente la autonomía legal -decía Dr. Arturo Urquidí Morales-, también hace falta la "Autonomía espiritual, como atributo o fuerza moral capaz de hacerla indemne a todas las acechanzas y de convertirla en el baluarte inexpugnable de la cultura científica, sin cortapisas, y de las aspiraciones más puras por la independencia nacional". La estructura universitaria respondía a esquemas feudales, totalmente desconectados de la realidad socio-cultural del país, y 1930 significó para la UMSS el inicio de un segundo período histórico. Desde entonces se han verificado cambios significativos, que la convirtieron en una institución social capaz de responder a las necesidades de la región.

En 1985, una comisión del Departamento de Física demuestra la factibilidad de la creación en la Universidad Mayor de San Simón, la necesidad e la creación de la Carrera de Física mediante nota di-

rigida al Rector Dr. Jorge Trigo Andia en la gestión del entonces Decano de la Facultad de Ciencias y Tecnología, Ing. Armando de la Parra (DEC - 492/85) y Resolución de Consejo Facultativo 010/85.

En febrero de 1987 mediante nota al entonces Jefe del Departamento de Física, Lic. Remberto Portugal P., (DEC - 051/87) se autoriza la apertura de Kardex para estudiantes postulantes a la Carrera de Licenciatura en Física.

El 3 de julio de 1992, mediante resolución rectoral (R.R. 487/92) se autoriza la creación de la Carrera de Física, a nivel de Profesorado y Licenciatura en Física dependiente de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la UMSS, de acuerdo a los objetivos, a la estructura curricular y contenidos aprobados por el Comité Académico mediante Acuerdo no. 38/92 de 28 de mayo de 1992, firmada por el entonces rector Dr. Tonchy Marinkovic Uzqueda.

El 9 de julio de 1992, el consejo universitario ratifica en todos los términos la resolución rectoral (R.R. 487/92), autorizando la creación de la Carrera de Física mediante resolución R.C.U. No. 54/92 y siendo el primer Director de la Carrera el Lic. Hugo Siles.

El 15 de febrero de 2000 mediante Resolución de Consejo de Carrera HCCFIS 01/2000, se solicita el cambio de nombre de la Carrera de Profesorado en Física a Licenciatura en Didáctica de la Física.

El 23 de junio de 2000 se firma el acuerdo CA-HCU-12/00, aprobando los diseños curriculares de los sesenta y dos Programas de Formación de Pre-Grado de la Facultad de Ciencias y Tecnología, entre ellos; Licenciatura en Física y Licenciatura en Didáctica de la Física.

El 30 de junio de 2000 mediante resolución rectoral ad referéndum R.R. No 336/00, se avala el acuerdo CA-HCU, 12/00 del 23 de junio del 2000.

El 10 de octubre de 2001, mediante resolución del consejo facultativo RCF No 100/2001 se da por bien hecha la resolución del Consejo de la Carrera de Física No 3/2001 de 15 de agosto de 2001, que aprueba el plan de estudios de la Carrera de Licenciatura en Didáctica de la Física.

2.1.2.2. PERFIL PROFESIONAL

El Licenciado en Física:

- Adquiere conocimientos teóricos que le permitirán desarrollar investigaciones de su especialidad.
- Su formación teórico-práctica le permitirán incorporarse en trabajos multidisciplinarios y también en la enseñanza universitaria pre-gradual.

2.1.2.3. MERCADO DE TRABAJO

- Actividades propias de la enseñanza en general
- Tareas básicas de Investigación en las - Universidades, Industrias y la Metalurgia
- Investigación en equipos multidisciplinarios en los programas de Energías Alternativas y/o Ecología.

- Actividades de control y calibración en los centros radiológicos

#### 2.1.2.4. OBJETIVOS

Los estudiantes a la conclusión de sus estudios deberán:

a) Poseer los suficientes recursos teóricos, pedagógicos y metodológicos que lo habiliten para la enseñanza universitaria y media de la Física.

b) Poseer los conocimientos teóricos y prácticos que le permiten participar en la búsqueda de fundamentación científica y respuestas a la problemática del desarrollo tecnológico.

c) Poseer los suficientes recursos teóricos y metodológicos que lo habiliten para participar en investigaciones de su especialidad.

d) Integrar su capacidad profesional en conductas coherentes de compromiso social frente a los desafíos de la realidad contemporánea.

#### 2.1.2.5. MATERIAS RELACIONADAS CON LA FÍSICA NUCLEAR

- FÍSICA TEORICA II
- FÍSICA TEORICA III
- ELECTRONICA
- MECANICA CUANTICA I
- ENERGIAS ALTERNATIVAS
- INTRODUCCIÓN A LA FÍSICA NUCLEAR
- FÍSICA MÉDICA
- FÍSICA ATÓMICA Y MOLECULAR

#### FÍSICA TEORICA II

##### UNIDAD 1: ANÁLISIS VECTORIAL

Contenidos mínimos: 1.1 Flujo de un campo vectorial. 1.2. El operador divergencia. 1.3. Teorema de la divergencia. 1.4. Expresión de la divergencia en coordenadas cartesianas. 1.5. Circulación de un campo vectorial. 1.6. El operador rotacional. 1.7. Teorema de Stokes. 1.8. Expresión del rotacional en coordenadas cartesianas. 1.9. El operador Laplaciano.

##### UNIDAD 2: INTERACCIÓN COULOMBIANA

Contenidos mínimos: 2.1. Ley de Coulomb. Fuerza electrostática. 2.2. Campo eléctrico y líneas de campo. Principio de superposición para distribuciones discretas y continuas de carga. Aplicaciones. Ecuación de Hartree. 2.3. Flujo de un campo eléctrico vectorial y Ley de Gauss. 2.4. Aplicaciones de la Ley de Gauss al cálculo de campos eléctricos generadas por distribuciones de carga de alta simetría. Conductores y aislantes. El Dipolo Eléctrico. 2.5. Potencial eléctrico y diferencia de potencial. La fuerza eléctrica es conservativa. Desarrollo del potencial de un Dipolo. 2.6. Relación entre el campo y el potencial electrostático. Principio de superposición del potencial. Energía potencial de un sistema de cargas. 2.7. Superficies equipotenciales. Cálculo del potencial para distribuciones continuas de carga. Desarrollo multipolar de una distribución de carga. 2.8.

Campo y potencial de conductores en equilibrio electrostático.

##### UNIDAD 3: INTERACCIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO CON LA MATERIA

Contenidos mínimos: 3.1. Medios dieléctricos. 3.2. Dipolo eléctrico en un campo eléctrico. Descripción atómica de los dieléctricos. 3.3. Polarización y el vector de Polarización  $P$ . Densidades de Polarización. 3.4 Forma diferencial de la Ley de Gauss. Ley de Gauss en un medio Dieléctrico. 3.5. El Desplazamiento. 3.6. Medios lineales: Susceptibilidad eléctrica y Constante Dieléctrica

##### UNIDAD 4: CORRIENTE ELÉCTRICA

Contenidos mínimos: 4.1. Corriente eléctrica e Intensidad eléctrica. 4.2. Densidad de corriente. 4.3. Ecuación de continuidad. 4.4. Ley de Ohm. 4.5. Conductividad de un medio. 4.6. Resistencia eléctrica de un circuito. 4.7. Fenómenos disipativos en una teoría de fuerzas conservativas.

##### UNIDAD 5: INTERACCIÓN MAGNETOSTÁTICA: CAMPO MAGNÉTICO EN EL VACÍO

Contenidos mínimos: 5.1. Definición operacional de Campo Magnético. Ley de Biot y Savart. 5.2. Fuerza experimentada por un elemento de corriente en un campo magnético. 5.3. Forma diferencial de la ley de Biot y Savart. Ley de Ampere. 5.4. Energía de una espira en un campo magnético. 5.5. Forma general de la Ley de Ampere. Corriente de desplazamiento.

##### UNIDAD 6: CAMPOS MAGNÉTICOS EN LA MATERIA

Contenidos mínimos: 6.1. Magnetización e Intensidad magnética. Susceptibilidad magnética y permeabilidad magnética. 6.2. El dipolo magnético. El spin. 6.3. Ferromagnetismo. Dominios magnéticos. Histéresis. 6.4. Diamagnetismo. 6.5. Paramagnetismo. Constante de Curie. 6.6. Aplicaciones. Resonancia Nuclear magnética (NMR)

##### UNIDAD 7: INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Contenidos mínimos: 7.1. Ley de inducción de Faraday. 7.2. Fuerza electromotriz en movimiento. 7.3. Ley de Lenz. 7.4. FEM inducida y campos eléctricos. Las corrientes de desplazamiento. 7.5. Energía magnética y densidad de energía.

##### UNIDAD 8: ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Contenidos mínimos: 8.1. Ecuaciones de Maxwell. 8.2. Ondas electromagnéticas planas. 8.3. Energía y potencia transportada por ondas electromagnéticas. 8.4. Intensidad de las ondas. 8.5. Momentum de las ondas electromagnéticas. 8.6. Presión de radiación. 8.7. Espectro de ondas electromagnéticas.

##### FÍSICA TEORICA III

##### UNIDAD 1: FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO

Contenidos mínimos: 1.1. Ecuaciones de Maxwell en el vacío. 1.2. Fuentes del Campo Electromagnético. 1.3. Distribuciones singulares de carga y corriente. 1.4. Clasificación de las fuentes del campo electromagnético. 1.5. Ecuaciones de Maxwell en Medios Continuos. 1.6. Condiciones de frontera.

1.7. Ecuaciones de Maxwell en medios lineales. 1.8. Potenciales electromagnéticos. 1.9. Formulación del electromagnetismo en función de los potenciales. 1.10. Transformación de los potenciales.

#### UNIDAD 2: TEOREMAS DE CONSERVACIÓN

Contenidos mínimos: 2.1. Energía Electromagnética. 2.2. Teorema de Poynting. 2.3. Unicidad de la solución de las ecuaciones de Maxwell. 2.4. El Momento del campo Electromagnético. Tensor de Maxwell. 2.5. Fuerzas sobre medios materiales. 2.6. Momento angular electromagnético.

#### UNIDAD 3: ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Contenidos mínimos: 3.1. Ecuaciones de onda en medios homogéneos, lineales e isotrópicos. 3.2. Ondas planas en medios no dispersivos. 3.3. Ondas monocromáticas. 3.4. Polarización de las ondas. 3.5. Ondas planas en medios dispersivos. 3.6. Velocidad de grupo.

#### UNIDAD 4: RADIACIÓN

Contenidos mínimos: 4.1. Potenciales retardados. 4.2. Campos de radiación. Dipolo Eléctrico radiante. Desarrollo multipolar de la radiación. 4.3. Energía y momento angular radiados por multipolos. 4.4. Campos de cargas en movimiento. Los potenciales vector de Liénard - Wiechert. 4.5. Campos derivados del potencial: Campos de velocidad y Campos de aceleración. 4.6. Radiación de una carga acelerada. Radiación a baja velocidad. Radiación de frenado. Radiación a alta velocidad. Radiación de Cherenkov. Aceleradores lineales.

#### UNIDAD 5: FORMULACIÓN COVARIANTE DE LA MECÁNICA

Contenidos mínimos: 5.1. Elementos de la Teoría Especial de la Relatividad: Invariancia de Galileo versus Invariancia de Lorentz. 5.2. Postulados de Einstein, Transformaciones de Lorentz. 5.3. Transformación de velocidades. 5.4. Línea de universo y tiempo propio, Espacio de Minkowski. 5.5. Cuadrivectores: Cuadrivelocidad y Cuadriaceleración. 5.6. Fuerza de Minkowski. Momento relativista. Cuadrimomento. 5.7. Conservación de la energía y del momento. Equivalencia de masa y energía.

#### UNIDAD 6: FORMULACIÓN COVARIANTE DE LA ELECTRODINÁMICA

Contenidos mínimos: 6.1. Invariancia de gauge: Gauges de Lorentz y de Coulomb. 6.2. Cuadrivector de densidad de Corriente. Ecuación de Continuidad. 6.3. Cuadripotencial. 6.4. Tensor Electromagnético. 6.5. Ecuaciones de Maxwell en forma Covariante. 6.6. Transformación de los campos eléctricos y magnéticos.

#### ELECTRONICA

##### UNIDAD 1: SISTEMAS DE NUMERACIÓN

1.1 Sistemas de numeración: Binario, octal, decimal, hexadecimal. 1.2 Conversión entre sistemas de numeración. 1.3 Operaciones aritméticas en el sistema binario: Adición, sustracción y multiplicación. 1.4 Representación de números negativos.

##### UNIDAD 2: FUNCIONES LÓGICAS - PUERTAS LÓGICAS

2.1 Funciones AND, OR, NOT, NAND, NOR, OR EXCLUSIVO, NOR EXCLUSIVO. 2.2 Tablas de Verdad. 2.3 Circuitos.

##### UNIDAD 3: ALGEBRA DE BOOLE

3.1 Postulados. 3.2 Propiedades. 3.3 Identidades. 3.4 Teoremas de De Morgan. 3.5 Identidades auxiliares. 3.6 Expresiones y circuitos a partir de Tablas de Verdad. 3.7 Circuitos OR y NOR EXCLUSIVO para más de dos variables.

##### UNIDAD 4: SIMPLIFICACIÓN DE CIRCUITOS LÓGICOS

4.1 Simplificación de expresiones booleanas. 4.2 Simplificación de circuitos con Diagramas de Veitch - Karnaugh para dos, tres y cuatro variables. 4.3 Otros métodos de simplificación.

##### UNIDAD 5: LÓGICA COMBINACIONAL CON CIRCUITOS INTEGRADOS

5.1 Codificadores y decodificadores. 5.2 Display de 7 segmentos. 5.3 Circuitos aritméticos: Sumador medio, sumador completo, sustractor medio y sustractor completo.

##### UNIDAD 6: LÓGICA SECUENCIAL, FLIP FLOP

6.1 Flip Flop RS básico. 6.2 Flip Flop JK. 6.3 Flip Flop tipo D. 6.4 Flip Flop tipo T. 6.5 Tablas de verdad. 6.6 Ecuaciones características de los Flip Flop.

##### UNIDAD 7: CONTADORES

7.1 Contadores asíncronos. 7.2 Contadores síncronos. Contadores ascendentes y descendentes.

##### UNIDAD 8: MULTIVIBRADORES

8.1 Circuitos temporizadores. 8.2 El temporizador 555. 8.3 Funcionamiento como estable y monoestable. 8.4 Circuitos de aplicación.

##### UNIDAD 9: INTRODUCCION A LOS MICROCONTROLADORES

9.1 Concepto de microcontrolador y microprocesador. 9.2 Arquitectura Harvard y Von Neumann. 9.3 Familias de microcontroladores. 9.4 Diagrama de bloques y configuración externa. 9.5 Recursos comunes a los microcontroladores (Unidad Central de Proceso, Memoria, Interfaces de entrada/salida). 9.6 Los registros internos del microcontrolador. 9.7 Módulos internos de un microcontrolador.

##### UNIDAD 10: PROGRAMACIÓN Y JUEGO DE INSTRUCCIONES EN ENSAMBLADOR Y LENGUAJES DE ALTO NIVEL. APLICACIONES

10.1 Juego de Instrucciones. Metodología de programación. Estructura de programa. 10.2 Subrutinas. Gestión de interrupciones. 10.3 El ensamblador de los PIC de la Gama Media. Formato de las instrucciones. 10.4 Modos de direccionamiento. El juego de instrucciones. 10.5 Directivas del ensamblador y macros. 10.6 El programa ensamblador MPASM. 10.7 Estructura de un programa en C estándar. 10.8 Funciones más importantes. 10.9 Subrutinas. Gestión de interrupciones. 10.10 Aplicaciones.

##### MECANICA CUANTICA I

##### UNIDAD 1: INTRODUCCIÓN A LA MECÁNICA CUÁNTICA

Contenidos mínimos: 1.1 Problema de la radiación del cuerpo negro. 1.2 Efecto fotoeléctrico. 1.3 Efecto Compton. 1.4 Espectro atómico - Modelo de Bohr

**UNIDAD 2: PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA MECÁNICA CUÁNTICA**

Contenidos mínimos: 2.1 Análisis del experimento de las ranuras de Young. 2.2 Dualidad onda-partícula. 2.3 Principio de descomposición espectral

**UNIDAD 3: FORMALISMO MATEMÁTICO DE LA MECÁNICA CUÁNTICA**

Contenidos mínimos: 3.1 Espacio de funciones de onda. 3.2 Espacio de estados y notación de Dirac. 3.3 Operadores lineales. 3.4 Conjugación hermítica. 3.4 Bases ortonormales y representaciones  $r$  y  $p$ . 3.5 Observables - observables  $R$  y  $P$ . 3.6 Conjunto de Observables que Conmutan Completo (C.O.C.C.) -  $X, Y, Z$  y  $P_x, P_y, P_z$

**UNIDAD 4: POSTULADOS DE LA MECÁNICA CUÁNTICA**

Contenidos mínimos: 4.1 Primer postulado: Descripción del estado de un sistema. 4.2 Segundo postulado: Descripción de una magnitud física. 4.3 Tercer postulado: Medida de una magnitud física - resultados posibles. 4.4 Cuarto postulado: Medida de una magnitud física - principio de descomposición espectral. 4.5 Quinto postulado: Medida de una magnitud física - colapso de la función de onda. 4.6 Sexto postulado: Evolución temporal del estado de un sistema - ecuación de Schrodinger

**UNIDAD 5: INTERPRETACIÓN FÍSICA DE LOS POSTULADOS**

Contenidos mínimos: 5.1 Reglas de cuantificación. 5.2 Interpretación de la función de onda. 5.3 Cuantificación de las medidas de ciertas magnitudes. 5.4 Valor medio de una observable - relaciones de incertidumbre de Heisenberg. 5.5 Compatibilidad y conmutabilidad de observables. 5.6 Propiedades de la ecuación de Schrodinger. 5.7 Sistemas conservativos

**UNIDAD 6: DESCRIPCIÓN CUÁNTICA DE UNA PARTÍCULA LIBRE Y UNA PARTÍCULA SOMETIDA A UN POTENCIAL CONSTANTE**

Contenidos mínimos: 6.1 Partícula libre. 6.2 Paquete de ondas. 6.3 Evolución temporal de un paquete de ondas. 6.4 Partícula sometida a un potencial escalón. 6.5 Partícula sometida a una barrera de potencial - efecto túnel. 6.6 Partícula sometida a un pozo de potencial - pozo de potencial infinito

**UNIDAD 7: OSCILADOR ARMÓNICO EN UNA DIMENSIÓN**

Contenidos mínimos: 7.1 Oscilador armónico clásico. 7.2 Hamiltoniano cuántico del oscilador armónico. 7.3 Determinación del espectro del oscilador armónico. 7.4 Representación  $\{\Phi_n\}$ . 7.5 Valores medios y desviación cuadráticos de  $X$  y  $P$ . 7.6 Propiedades del estado fundamental.

**ENERGIAS ALTERNATIVAS****UNIDAD 1: ENERGÍA, RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE**

Contenidos mínimos: 1.1 Clasificación de energía según la fuente 1.2 Introducción a las energías renovables 1.3 Energía y desarrollo en América Latina 1.4 Energía en Bolivia 1.5 Agenda 21, Huella Ecológica, Comercio de Emisiones, Protocolo de Kyoto

**UNIDAD 2: ENERGIA SOLAR**

Contenidos mínimos: 2.1 Fundamentos de la energía solar 2.2 Energía solar térmica 2.3 Sistemas de captación solar 2.4 Energía solar fotovoltaica 2.5 Aplicaciones de la energía solar fotovoltaica 2.6 La energía solar termoeléctrica 2.7 Impacto medioambiental de la energía solar

**UNIDAD 3: ENERGIA HIDRAULICA**

Contenidos mínimos: 3.1 Fundamentos de la energía hidráulica 3.2 El recurso hidráulico y su potencial 3.3 La obra civil en la instalaciones hidráulicas 3.4 Análisis de impacto ambiental

**UNIDAD 4: ENERGIA EOLICA**

Contenidos mínimos: 4.1 Conceptos de meteorología en energía eólica 4.2 Aprovechamiento del viento. El potencial eólico 4.3 Energía eólica y medioambiente

**UNIDAD 5: BIOMASA Y BIOCMBUSTIBLES**

Contenidos mínimos: 5.1 Conceptos generales 5.2 Biomasa residual seca 5.3 Biocarburantes 5.4 Biomasa residual húmeda

**UNIDAD 6: NUEVAS TECNOLOGIAS EN ENERGIAS RENOVABLES**

Contenidos mínimos: 6.1 Descripción, aplicación y desventajas de nuevas tecnologías

**INTRODUCCIÓN A LA FÍSICA NUCLEAR****UNIDAD 1.- ESTRUCTURA NUCLEAR**

Contenido Mínimo: 1.1 Núcleo Atómico. 1.2 Nucleones y carta de núclidos. 1.3 Isótopos, isótonos e isóbaros. 1.4 Propiedades del núcleo: tamaño, masa, carga eléctrica y espín nuclear. 1.5 Sistema de dos nucleones, deuterón. 1.6 Energía de ligadura. 1.7 Fuerza nuclear.

**UNIDAD 2.- MODELOS NUCLEARES**

Contenido Mínimo: 2.1 Modelo de la gota líquida. 2.2 Fórmula semiempírica de masas. 2.3 Estabilidad de isóbaros. 2.4 Modelo del gas de Fermi. 2.5 Modelo de capas. 2.6 Números mágicos. 2.7 Interacción espín-órbita. 2.8 Modelo colectivo. 2.9 Transiciones radiactivas.

**UNIDAD 3.- PROCESOS NUCLEARES**

Contenido Mínimo: 3.1 Desintegración radioactiva y constante de desintegración. 3.2 Actividad. 3.3 Equilibrio secular. 3.4 Familias transuránicas. 3.5 Emisión alfa. 3.6 Emisión beta. 3.7 Emisión gamma. 3.8 Reacciones Nucleares. 3.9 Sistema centro de masa y energía umbral. 3.10 Fisión y fusión nuclear.

**UNIDAD 4.- PASO DE LA RADIACIÓN POR LA MATERIA**

Contenido Mínimo: 4.1 Sección eficaz. 4.2 Pérdida de energía y poder de frenado. 4.3 Interacción de la radiación con la materia. 4.4 Coeficiente de absorción. 4.5 Dispersión coherente. 4.6 Efecto fotoeléctrico. 4.7 Efecto Compton. 4.8 Sección eficaz de Klein-Nishina. 4.9 Creación y aniquilación del par electrón-positrón. 4.10 Física del neutrón. 4.11 Sección eficaz de captura neutrónica.

**UNIDAD 5.- MÉTODOS EXPERIMENTALES**

Contenido Mínimo: 5.1 Propiedades de la radiación ionizante. 5.2 Detectores de radiación: cámara de ionización. 5.3 Contador proporcional. 5.4 Contador

G-M. 5.5 Contador de centelleo y de estado sólido. 5.6 Espectrómetro de partículas. 5.7 Aceleradores de partículas. 5.8 Física de reactores.

#### UNIDAD 6.- PARTÍCULAS FUNDAMENTALES

Contenido Mínimo: 6.1 Partículas y antipartículas. 6.2 Inestabilidad de las partículas fundamentales. 6.3 Interacciones y leyes de conservación, invariancia y simetría. 6.4 Carga leptónica y carga bariónica. 6.5. Isospín y extrañeza - Hadrones. 6.6 Interacción débil e interacción fuerte.

#### FISICA MÉDICA

#### UNIDAD 1.- MATERIA Y TRANSFORMACION NUCLEAR

1.1 El átomo. 1.2 Núcleo atómico. 1.3 Radiactividad, Actividad y Vida media. 1.4 Decaimiento alfa, beta, captura electrónica y gama. 1.5 Reacciones nucleares. 1.6 Fisión. 1.7 Fusión.

#### UNIDAD 2.- RAYOS X

2.1 Tubo de rayos X. 2.2 Bremsstrahlung. 2.3 Rayos X característicos. 2.4 Unidades de Kilovoltaje. 2.5 Ortovoltaje y Megavoltaje. 2.6 Terapia superficial. 2.7 Acelerador lineal. 2.8 Betatrón. 2.9 Ciclotrón. 2.10 Unidad de Cobalto 60

#### UNIDAD 3.- INTERACCION DE LA RADIACION CON LA MATERIA

3.1 Ionización. 3.2 Coeficiente de atenuación. 3.3 Interacción de la radiación con la materia. 3.4 Dispersión coherente. 3.5 Efecto fotoeléctrico. 3.6 Efecto Compton. 3.7 Producción de pares. 3.8 Interacción de partículas cargadas con la materia. 3.9 Medición de la radiación ionizante. 3.10 Cámara de ionización. 3.11 Cámara Farmer - Electrómetro.

#### UNIDAD 4.- MEDICION DE DOSIS ABSORBIDA

4.1 Exposición. 4.2 Kerma. 4.3 Dosis absorbida. 4.4 Dosis absorbida en aire. 4.5 Dosis absorbida en cualquier medio. 4.6 Teoría de la cavidad de Bragg - Gray. 4.7 Stopping power. 4.8 Cámara cilíndrica y plano paralela. 4.9 Transferencia de dosis absorbida. 4.10 Disimetría de película.

#### UNIDAD 5.- BASES FISICAS DE LA RADIOTERAPIA

5.1 Modalidades de Radioterapia. 5.2 Energía de la radiación en radioterapia externa. 5.3 Técnicas de tratamiento: SSD y SAD. 5.4 Disimetría Física. 5.5 Curvas de dosis en profundidad. 5.6 Curvas de isodosis. 5.7 Disimetría clínica. 5.8 Radioterapia superficial. 5.9 Gammaterapia. 5.10 Electroterapia. 5.11 Braquiterapia intersticial y endocavitaria. 5.12 Radioterapia metabólica.

#### UNIDAD 6.- PROTECCION RADIOLOGICA

6.1 Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes. 6.2 Radioisótopos naturales y artificiales. 6.3 Dosis equivalente. 6.4 Dosis efectiva. 6.5 Límites de dosis efectiva ocupacional y público. 6.6 Cálculo de blindaje. 6.7 Normas generales de protección radiológica.

#### FISICA ATOMICA Y MOLECULAR

#### UNIDAD 1: LA MASA Y EL TAMANO DEL ATOMO

Contenidos mínimos: 1.1 Núcleo atómico 1.2 Determinación de la masa 1.3 Métodos de determinación del número de Avogrado 1.4 Determinación

del tamaño del átomo 1.5 Problemas referidos al temario

#### UNIDAD 2: EL ELECTRON

Contenidos mínimos: 2.1 Producción de electrones libres 2.2 Tamaño del electrón 2.3 La carga del electrón 2.4 La carga específica e/m del electrón 2.5 El carácter ondulatorio del electrón y otras partículas 2.6 Interferometría con átomos.- Problemas

#### UNIDAD 3: EL MODELO DE BOHR DEL ATOMO DE HIDROGENO.

Contenidos mínimos: 3.1 Principios básicos de espectroscopia 3.2 El espectro óptico del átomo de hidrógeno 3.3 Postulados de Bohr.- Movimiento del núcleo 3.4 Espectro de átomos hidrogenoides 3.5 Excitación de los saltos cuánticos por colisiones. 3.6 Extensión de Sommerfeld del modelo de Bohr y la justificación experimental del segundo número cuántico 3.7 Eliminación de la degeneración orbital por el cambio de masa relativista 3.8 Límites de la teoría de Bohr-Sommerfeld 3.9 El principio de correspondencia.- átomos de Rydberg.- Positronio.- Muonio, y antihidrogeno.- Problemas.

#### UNIDAD 4: ELIMINACIÓN DE LA DEGENERACIÓN ORBITAL EN EL ESPECTRO DE ATOMOS ALCALINOS.

Contenidos mínimos: 4.1 Física del neutrón y sección eficaz de captura neutrónica Estructura de capa. 4.2 Apantallamiento, el diagrama de Grotrian 4.3 Capa cerrada.- Problemas.

#### UNIDAD 5: MAGNETISMO ORBITAL Y DE SPIN (ESTRUCTURA FINA)

Contenidos mínimos: 5.1 Momento magnético del movimiento orbital. 5.2 Presesión y orientación en un campo magnético. 5.3 Spin y momento magnético del electrón 5.4 Determinación del radio giro magnético por el método de Einstein-Hass. 5.5 Detección de la cuantización direccional por Stern y Gerlach. 5.6 Estructura fina y acoplamiento Spin-Orbita. 5.7 Cálculo del desdoblamiento Spin-Orbita en el modelo de Bohr. 5.8 Esquema de nivel de los átomos alcalinos. 5.9 Estructura fina en el átomo de hidrógeno.- Problemas.

#### UNIDAD 6: ATOMOS EN UN CAMPO MAGNETICO

Contenidos mínimos: 6.1 Teoría cuántica del efecto Zeeman ordinario. 6.2 Tratamiento teórico cuántico del Spin del electrón y el protón. 6.3 Tratamiento mecánico cuántico del efecto Zeeman anómalo con acoplamiento Spin-Orbita. 6.4 Teoría cuántica de un Spin en campos magnéticos mutuamente perpendiculares, uno constante y uno dependiente del tiempo. 6.5 Las ecuaciones de Bloch.- teoría relativista del electrón. La ecuación de Dirac.- Problemas.

#### UNIDAD 7: ATOMOS EN UN CAMPO ELECTRICO

Contenidos mínimos: 7.1 Observación del efecto Stark. 7.2 Teoría cuántica de los efectos Stark lineal y cuadrático. 7.3 Interacción de un átomo de dos niveles con un campo de radiación coherente.- Problemas.

**UNIDAD 8: LEYES GENERALES DE LAS TRANSICIONES OPTICAS**

Contenidos mínimos: 8.1 Simetrías y reglas de selección. 8.2 Anchos de línea y formas de línea. 8.3 Transiciones ópticas.

**UNIDAD 9: ATOMOS MULTIELECTRONICOS**

Contenidos mínimos: 9.1 Espectro del átomo de Helio. 9.2 Repulsión de electrones y el principio de Pauli. 9.3 Acoplamiento del momento angular. 9.4 Momento magnético de átomos multielectrónicos. 9.5 Excitaciones múltiples.- Problemas.

**UNIDAD 10: UNA INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO DE LAS MOLECULAS**

Contenidos mínimos: 10.1 La aproximación de Born-Oppenheimer. 10.2 La teoría de orbital molecular.- teoría de orbital molecular para moléculas poli atómicas. 10.3 La teoría de Bandas de los sólidos.- Cálculo de la estructura electrónica. 10.4 El método auto consistente de Hartree-Fock. 10.5 Correlación del electrón, teoría de perturbación de muchos cuerpos de Moller-Plesset. 10.6 Rotaciones y vibraciones moleculares transiciones electrónicas moleculares propiedades eléctricas de las moléculas. 10.7 Propiedades magnéticas de las moléculas.- Problemas.

**2.1.2.6. TESIS DE GRADO RELACIONADAS CON FÍSICA NUCLEAR REALIZADAS EN LA CARRERA DE FÍSICA - UMSS**

1. Monitoreo de Radioactividad Ambiental a gran altura, Terrazas. Vargas, Juan Carlos (2006).

2. Cálculo numérico de la energía total del estado Fundamental para sistemas atómicos, Flores Flores, Freddy (2008).

3. La radiación del cuerpo negro en la mecánica estadística no extensiva - Análisis comparativo, Andrade Uzieda, Marko (2009).

4. Análisis por fluorescencia de rayos X, Revollo Zurita, Henry (2012).

**2.1.2.7. PUBLICACIONES EN LA CARRERA DE FÍSICA - UMSS EN RELACIÓN A LA FÍSICA NUCLEAR**

1. Coeficiente de extinción de radiación eritémica en la columna de agua en lagunas de alta montaña del Tunari. Moreira R., Castellón E., Lucano M., Fuentes I. Revista COPERNICO, Departamento de Física, UMSS (2012).

2.1.3. *Carrera de Física, Universidad Autónoma Tomás Frías (UATF), Potosí (Física - UATF 2018)*

**2.1.3.1. ANTECEDENTES Carrera de Física - UATF (Potosí)****1. FUNDACION DE LA UATF**

El funcionamiento de la Facultad Libre de Derecho a partir del año de 1876, subordinada al Cancelariato de Chuquisaca, es el primer antecedente para el nacimiento de la UATF. Oficialmente la Universidad Potosina nace por Ley de 15 de Octubre de 1892,

**2. AUTONOMÍA**

Mediante Decreto - Ley de 8 de octubre de 1937 se reconoce la autonomía al distrito universitario de Potosí, siendo el primer Rector Autonomista el Dr. Alberto Saavedra Nogales.

**3. PRINCIPIOS**

Art. 1. La Universidad Autónoma "Tomás Frías" recuperada su condición de Universidad Nacional, Científica, Democrática y Popular, es una institución de derecho público que se desenvuelve jurídicamente, conforme a las normas del presente Estatuto al amparo de la Autonomía Universitaria proclamada por la Constitución Política del Estado y demás leyes concordantes.

Art. 2. La Autonomía Universitaria conquista histórica y revolucionaria de nuestro pueblo, consiste en la amplia e irrestricta práctica orgánica e institucional de los siguientes principios fundamentales: autarquía económica y administrativa, autonomía académica, cogobierno paritario docente estudiantil, democracia interna, pluralismo ideológico, libertad de cátedra y efectiva democratización de la educación superior.

La Universidad Autónoma "Tomás Frías" en ejercicio de su autonomía, es parte integrante de la Universidad Boliviana, la que coordinará sus fines y funciones mediante el Estatuto Orgánico de la Universidad Boliviana.

Art. 3. La autarquía económica y administrativa, consiste en la libre percepción y disposición de los recursos económicos y financieros de la Universidad, así como el legítimo nombramiento de sus autoridades y personal administrativo con sujeción a las normas establecidas por los reglamentos correspondientes, sin intromisión ni interferencia de ninguna fuerza extrauniversitaria.

Art. 4. La autonomía académica consiste en la aprobación y la ejecución independiente de planes, programas y demás instrumentos pedagógicos de todas las Facultades, Carreras y establecimientos universitarios, a la sola condición de que respondan a los adelantos científicos y tecnológicos, una la teoría con la práctica y la ciencia con el trabajo y la producción, contribuyan a la formación de una conciencia social crítica y revolucionaria de la juventud, interpretando los altos ideales emancipatorios de nuestro pueblo, así como los intereses locales y nacionales y promuevan el desarrollo socio-económico y cultural soberano del país.

Art. 5. La autonomía académica consiste, además en la provisión de catedráticos idóneos que respondan a tales requerimientos y sean designados inexcusablemente mediante procedimientos de Concurso de Méritos y Examen de Competencia y en su caso de Oposición.

Art. 6. El cogobierno paritario docente-estudiantil, conquista democrática de los Universitarios, es la base del desenvolvimiento institucional de la Universidad, que consiste no solamente en la cogestión gubernamental responsable, solidaria y mancomunada; sino también en la cogestión administrativa a través de delegados estudiantiles democráticamente elegidos para dicho fin.

Art. 7. La democracia universitaria consiste en el deber y el derecho de elegir y ser elegido mediante voto secreto, directo y universal, para los distintos roles de mando y poder universitarios y la Facul-

tad de pedir destitución de quienes no respondan al mandato conferido o traicionen los altos fines y principios de la Universidad. También debe entenderse como el sometimiento de las minorías a las mayorías, a fin de garantizar la unidad universitaria.

Art. 8. El pluralismo ideológico y la libertad de cátedra, consisten en mantener el principio de la universalidad universitaria, que posibilite el libre juego de todas las ideas vigentes en nuestro tiempo, a sola condición de que no vulneren los fines y principios antes mencionados, permitiendo igualmente el ejercicio de la cátedra paralela para fomentar la superación de la enseñanza y acrecentar el juicio crítico y científico en el seno de la Universidad.

Art. 9. La democratización de la Educación Superior, finalmente, consiste en la difusión de la cultura y la formación universitaria, llevándola hacia el seno de las masas populares, obreras y campesinas, a través de adecuadas unidades educativas y servicios de extensión que no exijan otro requisito que el de su capacidad receptiva y experiencia práctica al margen de toda forma de discriminación.

#### 4. FINES Y OBJETIVOS.

Art. 10. La Universidad Autónoma "Tomás Frías", en su que hacer científico y cultural, se identifica con los intereses de los sectores populares integrándose a ellos en la lucha por la liberación nacional.

Art. 11. Forma profesionales idóneos con conciencia crítica y creativa de acuerdo a las necesidades del desarrollo soberano e independencia del país.

Art. 12. Su actividad está orientada a la formación científica, tecnológica, cultural y social de la población en todas sus clases sociales. Su misión por consiguiente es el cultivo, enseñanza, investigación y difusión de la ciencia y la técnica, las artes y las letras.

Art. 13. Profundiza la popularización y amplia democratización de la enseñanza, por la libre admisión de obreros y campesinos en sus aulas, sin otro requisito que su capacidad y aptitud vocacional.

Art. 14. La Universidad contribuirá a la creación de una conciencia nacional, partiendo del conocimiento de la realidad de dependencia, opresión y explotación del país, en la perspectiva de la integración y la libre determinación nacional dentro del contexto de países latinoamericanos y mundial de los pueblos que luchan por la sociedad más justa y el respeto a los derechos humanos.

#### CREACION DE LA CARRERA DE FISICA

La Carrera de Física de la UATF se creó por decreto supremo durante la dictadura de Hugo Banzer, el 14 de agosto de 1972, como una necesidad de hacer ciencia en Bolivia, se creó la misma junto a las Carreras de matemática y química. Posteriormente se creó la Carrera de Estadística el año 1980, el año 1996 aproximadamente se creó la Carrera de licenciatura en Informática, que cambió su razón de ser a partir del año 2005 y se llama ahora ingeniería Informática pero sigue en la Facultad de Ciencias Puras. La Facultad de Ciencias Puras a la fecha cuenta con 5 carreras. Las Carreras en cuestión, para la parte investigativa, dependen de la Dirección

de Investigación de Ciencia y Tecnología DICYT, donde se creó el Instituto de Investigaciones de la Facultad de Ciencias Puras el año 2010, y se estableció como tal el año 2012.

#### 2.1.3.2. DATOS PRINCIPALES DE LA CARRERA DE FISICA

Nombre Completo: FISICA

Facultad: CIENCIAS PURAS

Fecha de Fundación: 14/08/1972

Duración de la Carrera: 10 SEMESTRES

Diploma Académico: LICENCIATURA EN FÍSICA

Título en Provisión Nacional: LICENCIATURA EN FÍSICA

Modalidades de Ingreso: PREUNIVERSITARIO - ADMISIÓN LIBRE

Dirección: AVENIDA EL MAESTRO ( EDIF. CENTRAL)

Ciudad: Potosí

Teléfono: (591) 6231520

Correo Electrónico: fisica@uatf.edu.bo

Universidad: Autónoma Tomás Frías (UATF)

#### 2.1.3.3. MISION Y VISION

Misión

Implementar e impulsar la ejecución del nuevo rediseño curricular de la Carrera de Física, preparación y gestión de proyectos para acreditar el patrimonio de la Carrera, organizar todas las tareas académicas con la finalidad de obtener una formación de recursos humanos en el área de Física, con creatividad, conciencia crítica y ambiental, con valores que muestren competencia para crear, transformar la ciencia y la tecnología para el beneficio de la sociedad y de nuestra región.

Visión

Lograr la calidad y excelencia académica mediante el Liderazgo, eficiencia y reingeniería en el marco de una formación humanística universal.

#### 2.1.3.4. OBJETIVOS

Lograr la calidad y excelencia académica en la Carrera de Física, proyectando el liderazgo en la prestación de servicios, asimilando conciencia de integración y desarrollo tecnológico para coadyuvar en la formación y mejoramiento por competencias de los recursos humanos en el área de Física, generando una conciencia crítica, creativa y ambiental.

#### 2.1.3.5. NORMAS DE TITULACION

Reglamento de Graduación directa de la Facultad de Ciencias Puras.

#### 2.1.3.6. PERFIL PROFESIONAL

- Conocimiento de las ciencias básicas como: Matemática, Química y Física.
- Métodos y técnicas de Investigación.
- Desarrollo de diseños experimentales en Laboratorio.
- Conciencia crítica del aspecto socio económico de la industria actual.
- Trabajo en grupo.

#### 2.1.3.7. AREA DE ACCION

- Investigación Básica, Teórica y Aplicada en Ciencias Físicas.
- Proyectos de Investigación en Física Aplicada.
- Resolución de problemas industriales.
- Control de calidad.
- Generación y adecuación de tecnologías apropiadas.
- Asesoramiento científico.
- Docencia en la enseñanza de la Física.

#### 2.1.3.8. MATERIAS RELACIONADAS CON LA FÍSICA NUCLEAR

- METODOS MATEMATICOS DE LA FISICA
- ECUACIONES DIFERENCIALES
- CALCULO COMPLEJO
- MECANICA CLASICA
- ELECTRONICA PARA FISICOS
- FISICA MODERNA
- SIMULACION DE MODELOS FISICOS
- MECANICA CUANTICA
- ELECTROMAGNETISMO
- TERMODINAMICA
- CIENCIA DE MATERIALES
- MECANICA ESTADISTICA
- FISICA NUCLEAR
- ELECTRODINAMICA
- TALLER DE INVESTIGACION I, II, III.

#### SYLLABUS DE LA MATERIA DE FISICA NUCLEAR FIS 382

CONTENIDO MINIMO: Introducción.- Detección de radiaciones nucleares.- Aceleradores de partículas.- Transiciones radioactivas.- elementos de estructura y sistematización nuclear.- emisión alfa.- Emisión gamma.- Radiactividad beta.- Sistemas de dos cuerpos y las fuerzas nucleares.- Reacciones nucleares.- Los neutrones.

##### PROGRAMA ANALITICO:

1. INTRODUCCION. 1.1. Definiciones. 1.2. Terminología y unidades.
2. DETECCION DE RADIACIONES NUCLEARES. 2.1. Clasificación. 2.2.1. Cámara de Ionización. 2.2.2. Contador Geiger Muller 2.2.3. Cámara de Burbujas. 2.2.4. Espectrógrafo de masas. 2.3. Problemas de Aplicación.
3. ACELERADORES DE PARTÍCULAS. 3.1. Clasificación. 3.1.1. Aceleradores de Van de Graff.

3.1.2. El ciclotrón. 3.1.3. El Betatrón. 3.1.4. Acelerador lineal 3.2. Problemas de Aplicación.

4. TRANSICIONES RADIOACTIVAS. 4.1. Teoría continua - una sola substancia. 4.2. Teoría continua - más de una substancia 4.3. Bifurcación 4.4. Medidas de la radioactividad.- Dosimetría. 4.5. Medición de constantes radioactivas. 4.6. Problemas de Aplicación.

5. ELEMENTOS DE ESTRUCTURA Y SISTEMATIZACION NUCLEAR. 5.1. Carga. 5.2. Masa. 5.3. Radios Nucleares. 5.4. Modelo de la gota líquida 5.5. Modelo de Capas. 5.5. Fuerzas Nucleares. 5.6. Problemas de Aplicación.

6. EMISION ALFA. 6.1. Introducción. 6.2. Sistematización de la desintegración alfa. 6.3. Problemas de aplicación.

7. EMISION GAMMA. 7.1. Introducción. 7.2. Reglas de Selección. 7.3. Fluorescencia nuclear. 7.4. Problemas de Aplicación.

8. RADIATIVIDAD BETA. 8.1. Introducción. 8.2. Relaciones energéticas en la desintegración beta. 8.3. Clasificación de las interacciones. 8.4. Teoría de Fermi de la desintegración beta. 8.5. Teoría de la interacción beta. 8.6. Problemas de Aplicación.

9. SISTEMAS DE DOS CUERPOS Y LAS FUERZAS NUCLEARES. 9.1. El deuterón. 9.2. Dispersión neutrón protón a bajas energías. 9.3. El sistema y la dispersión protón - protón. 9.4. Independencia de cargas de las fuerzas nucleares. 9.5. Fuerza nucleón - nucleón. Fuerzas de intercambio. 9.6. Fotodesintegración del deuterón. 9.7. Problemas de Aplicación.

10. REACCIONES NUCLEARES. 10.1. Introducción. 10.2. Características generales de las reacciones secciones eficaces. 10.3. Reacciones inversas. Balance detallado. 10.4. Mecanismos de reacción. Aspectos cualitativos del núcleo compuesto. 10.5. Resonancias. 10.6. Modelo óptico. 10.7. El núcleo compuesto - Densidad de niveles. 10.8. El núcleo como gas de Fermí. 10.9. Reacciones directas. 10.10. Procesos de fisión. 10.11. Reacciones nucleares con iones pesados. 10.12. Problemas de Aplicación.

11. NEUTRONICA. 11.1. Fuentes de neutrones. 11.2. Moderación de neutrones. 11.3. Distribuciones energéticas de neutrones procedentes de fuentes monoenergéticas. 11.4. Teoría de la difusión. 11.5. La ecuación de la edad. 11.6. Difusión de neutrones térmicos. 11.7. Reacción en cadena en una pila. 11.8. Cinética del reactor. 11.9. Reacciones de fusión. 11.10. Problemas de Aplicación.

##### BIBLIOGRAFIA.

- Núcleos y partículas de E. SEGRÉ. Ed. Reverté 1994.
- Física nuclear I. KAPLAN. Ed. Aguilar.
- Experimental nuclear physics K.N. MUKHIN. Ed. Mir. Publishers Moscow.
- Nuclear physics Engineering
- The Atomic Nucleus Robley D. Evans McGRAW - HILL 1990

### 2.1.3.9. TESIS DE GRADO RELACIONADAS CON FÍSICA NUCLEAR REALIZADAS EN LA CARRERA DE FÍSICA - UATF

- Evaluación de ambientes contaminados por Uranio 238: Santiago Mamani H.
- Calculo del corazón de un reactor nuclear a uranio débilmente enriquecido: Silverio Chávez R.
- Cálculo de las funciones de espacio para la fuente de neutrones Am - Be: Raúl Mamani M.
- Evaluación de Gas Radon 222 en ambientes de la ciudad de Potosí: Ms.C. Raúl Mamani M.

### 2.1.3.10. PUBLICACIONES REALIZADAS EN LA CARRERA DE FÍSICA - UATF, RELACIONADAS CON FÍSICA NUCLEAR

- Evaluacion de Gas Radon 222 en actividades de minería: Ms. C. Raúl Mamani M., Dr. Ing Jaime Claros J., Dr. Ing Jurgen Weyer, Dr Holger Chirveches S.
- Evaluacion de Gas Radón 222 y progenie en Actividades de Interior mina a 4000 m.s.n.m. y efectos sobre la salud, Dr. Ing. Jurgen Weyer. Ms.C. Raúl Mamani M., Dr. Ing Jaime Claros J., Dr Ing Denisse Arnold, Dr. Hoger Chirveches S.. Dr René Vasquez A.

## 2.2. SOCIEDAD BOLIVIANA DE FÍSICA (SOBOFI) (SOBOFI 2018)

### ANTECEDENTES de la SOBOFI

CONSIDERANDO, que la Sociedad Boliviana de Física, en adelante SOBOFI, tiene personería jurídica, y que está funcionando en forma continua desde 1994.

CONSIDERANDO, que la comunidad de profesionales y estudiantes de física en Bolivia requiere de una mayor integración, puesto que la principal actividad de los físicos en Bolivia está centrada en tres universidades del sistema estatal, pero existe una cantidad considerable de profesionales que ejercen fuera de éste ámbito académico.

CONSIDERANDO, que existe un gran vacío entre la actividad de la comunidad de físicos en Bolivia y los profesores de nivel secundario que enseñan esta ciencia, y entre los profesionales físicos y los que ejercen profesiones afines a la Física.

POR TANTO, con la finalidad de incentivar las actividades conjuntas realizadas hasta el momento y estimular todas aquellas encaminadas a destacar el papel importante de la física como ciencia fundamental y aplicada, se establece apropiada la refundación de la Sociedad Boliviana de Física, en adelante SOBOFI, como organización actuante en el ámbito nacional, de carácter no lucrativo y regido por el presente ESTATUTO, de acuerdo con los siguientes artículos:

### CAPITULO I - DE LOS OBJETIVOS

Artículo 1º.- Queda conformada la SOCIEDAD BOLIVIANA DE FISICA, en adelante SOBOFI, por la aprobación del presente Estatuto, manteniendo su carácter de asociación civil de carácter nacional y sin fines de lucro.

Artículo 2º.- Los objetivos de la SOBOFI, son:

a) Contribuir al progreso científico y tecnológico del país, tanto en el conocimiento mismo como en la aplicación de la Física en todos sus aspectos;

b) Fomentar el conocimiento en el ámbito público de la importancia de la Física en el desarrollo del país y de las actividades de formación en esta disciplina;

c) Fomentar y difundir el conocimiento de la Física como disciplina en los colegios y escuelas, así como en otros centros de instrucción;

d) Organizar y difundir la Olimpiada Boliviana de Física ( OBF ), como forma de estímulo del estudio de la Física a nivel de los colegios secundarios del país;

e) Representar a Bolivia en todos los eventos internacionales relacionados con la Física y en particular en las diferentes Olimpiadas de Física;

f) Elevar los padrones de la ética profesional, de la educación científica y tecnológica;

g) Estimular las investigaciones científicas y tecnológicas promoviendo y difundiendo, de forma amplia los avances y logros de la Física, en todas sus especialidades;

h) Actuar como centro de información en Física, coordinar y dar publicidad a las actividades de las filiales regionales y de especialidad;

i) Promover, difundir y orientar publicaciones relacionadas con la Física, en particular de la Revista Boliviana de Física ( RBF );

j) Asegurar un ámbito de encuentro y discusión entre científicos, docentes, estudiantes y profesionales afines, mediante la organización de eventos científicos, y en particular, la Reunión Nacional de la SOBOFI ;

k) Facilitar el intercambio de información y de puntos de vista sobre la Física y la importancia de ésta última, dentro de la política científica nacional;

l) Mantener intercambio con otras sociedades científicas y culturales, así como industrias, nacionales e internacionales, principalmente aquellas que se dedican a las actividades relacionadas con los métodos, técnicas o aplicaciones de la Física;

m) Otorgar premios, distinciones y reconocimientos en el ámbito de las actividades de docencia e investigación de sus miembros;

n) Organizar cualquier otro evento y aprobar cualquier otra actividad que esté encaminada a la consecución de los anteriores objetivos.

### CAPITULO II - DE LOS SOCIOS

Artículo 3º.- Los socios de la SOBOFI, deberán ser profesionales en física, estudiantes de alguna de las carreras de Física del país, profesionales que realicen actividades que involucren directamente técnicas o métodos de Física.

Artículo 4º.- Los socios de la SOBOFI, estarán clasificados en las siguientes categorías:

1 Profesional, que son aquellos socios que tengan

título universitario en Física.

2 Estudiante, que son aquellos socios que están cursando, en forma regular, estudios universitarios en alguna de las Carreras de Física del Sistema Nacional de Universidades, o en la especialidad de Física de alguno de los Institutos Normales de Educación Superior.

3 Asociado, que son aquellos socios que realizan actividades relacionadas con la Física y que no están comprendidos en las categorías anteriores.

Artículo 5º.- Podrán ser socios de la SOBOFI, aquellas personas que cumplan con los requisitos del Art. 4º y soliciten su ingreso en forma individual presentando una prueba de su condición de tales.

Artículo 6º.- Son derechos de los miembros de la SOBOFI:

- a) Participar, con voz y voto, en las reuniones plenarios de las Reuniones Nacionales de la SOBOFI;
- b) Elegir a las directivas regionales y/o nacionales de la SOBOFI, de acuerdo al Art. 12º;
- c) Poder ser elegido como miembro de las directivas regionales o nacional, de acuerdo al Art. 12º;
- d) Inscribirse, de acuerdo a lo especificado por cada filiar de especialidad, como socio de la misma;
- e) Presentar ponencias orales o de panel en las Reuniones Nacionales de la SOBOFI;
- f) Recibir un ejemplar de la Revista Boliviana de Física, y otras publicaciones que realicen las filiales de la SOBOFI, a las que el socio pertenezca.

...

NOTA: Para más información de la SOBOFI, visite la web: <http://fiumsa.edu.bo/sobofi/estatutos.htm>

#### 2.2.1. PRESENTACIONES EN LAS REUNIONES NACIONALES DE LA SOBOFI EN RELACIÓN A LA FÍSICA NUCLEAR

1. E. Coronel Canaviri. "Aplicación del efecto de Quenching de radiación Cherenkov del K-40 natural como técnica fotométrica". Revista Boliviana de Física 27, 26. (2015).
2. E. E. Centeno Mamani. "Digitalización de imágenes radiológicas". Revista Boliviana de Física 24, 35 (2014).
3. B. Lopez. "Espectrómetro de electrones". Revista Boliviana de Física 21, 33. (2012).
4. I. Poma. "Tecnologías de reactores nucleares". Revista Boliviana de Física 21, 35. (2012).
5. P. Miranda. "Monitor de neutrones NM64 de Chacaltaya". Revista Boliviana de Física 21, 35. (2012).
6. E. Barañado. "Simulación de variables físico-médicas en una cámara hiperbárica monoplaza". Revista Boliviana de Física 18, 53. (2011).
7. Búsqueda de destellos de rayos X en el monte chacaltaya con detectores de agua Cherenkov. Revista Boliviana de Física 18, 53. (2011).

8. R. Ticona. "Dosimetría de neutrones - Monitor de neutrones". Revista Boliviana de Física 16, 36. (2010).
9. E. Choque. "Diseño e implementación de una cámara hiperbárica monoplaza". Revista Boliviana de Física 15, 64. (2009).
10. I. Poma. "Física nuclear experimental". Revista Boliviana de Física 13, 132. (2007).
11. P. Miranda. "Control de soldadura industrial mediante Rayos-X: Tendido de la tubería Ovejuyo - Pampahasi". Revista Boliviana de Física 4, 71. (1998).

#### 2.3. AGENCIA BOLIVIANA DE ENERGÍA NUCLEAR (ABEN)

La Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN) nace como institución pública descentralizada, con personería jurídica y patrimonio propio, con autonomía de gestión administrativa, técnica, legal, económica y financiera, de duración indefinida y bajo tuición del Ministerio de Hidrocarburos y Energía. Se crea según el decreto supremo No.- 2697 del Estado Plurinacional de Bolivia, de fecha 9 de Marzo de 2016.

La agencia tendrá las funciones de implementar y ejecutar la política en materia de tecnología nuclear; promover y desarrollar en el país la investigación en el campo de la ciencia y tecnología nuclear y sus aplicaciones con fines pacíficos; operar las instalaciones nucleares en el marco del Programa Nuclear Boliviano (PNB); entre otras.

Se han planificado tres instalaciones: i) un complejo ciclotrón - radiofarmacia con unidades de Tomografía por emisión de positrones (PET - CT) localizadas en diferentes ciudades del Estado Plurinacional, ii) Un reactor nuclear de investigación con potencia menor a 200 kW para producción de radioisótopos y prestación de servicios (eventualmente análisis por activación neutrónica y neutrón backscattering) y iii) celdas experimentales gamma y de haces de electrones y eventualmente una planta de irradiación gamma semi industrial o industrial. Adicionalmente se dispondrá de un complejo de laboratorios asociados a las tres instalaciones.

#### 2.3.1. CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO EN TECNOLOGÍA NUCLEAR

El Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear - CIDTN, será el lugar donde se construyan las instalaciones detalladas en la sección anterior, eventualmente se dispondrá de tecnología rusa (Empresa Rosatom) en las instalaciones ii) y iii) El centro contará con las siguientes instalaciones:

- En el Sector Salud, un Centro Nacional Ciclotrón - Radiofarmacia, cuyo fin es el de mejorar los niveles de servicio en salud para el diagnóstico y tratamiento del cáncer y otras patologías empleando tecnología médica avanzada, además de fortalecer los centros de radioterapia existentes en el país.

- En el Sector Industrial, una Planta Multipropósito de Irradiación para contribuir a la seguridad e inocuidad alimentaria, al incremento de la productividad agroindustrial y apoyar a los sectores productivos para la exportación con certificación de inocuidad.
- En el Sector de Ciencia y Tecnología, un Reactor Nuclear de Investigación de baja potencia, cuyo objetivo es contribuir al desarrollo científico y tecnológico del país, en los campos de la medicina, industria, ciencias ambientales, biológicas, físicas, químicas, petroquímicas, hidráulicas, geológicas y de materiales, entre otras, mediante la investigación básica y aplicada.
- En el Sector Académico, Laboratorios de Investigación Nuclear y Capacitación, cuyo objetivo es el de contribuir a la formación y capacitación teórica y práctica en las áreas de ciencias, ingeniería y tecnología nuclear con fines pacíficos, fortaleciendo las universidades del país.

#### 2.4. PROGRAMA NUCLEAR BOLIVIANO (Ministerio de Hidrocarburos 2015)

##### 2.4.1. ANTECEDENTES

El Programa Nuclear Boliviano, enmarcado en la agenda 2025 del Gobierno nacional, tiene el objetivo de actualizar y apoyar a los sectores de salud, industria, ciencia, tecnología y académico. Se planifica la Construcción e Implementación del Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear. El operador de las instalaciones será la Agencia Boliviana de Energía Nuclear - ABEN.

Se construirá en la ciudad de El Alto la infraestructura del Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear - CIDTN, para fines médicos, industriales y de investigación.

El Instituto Boliviano de Ciencia y Tecnología Nuclear - IBTEN, autoridad nacional competente - ANC, en materia de uso de radiaciones ionizantes será la entidad que tendrá a su cargo el licenciamiento para las fases de construcción y operación de las instalaciones.

##### 2.4.2. RESUMEN DE INICIATIVAS DE DESARROLLO DEL SECTOR

El año de 1960 se crea la Comisión Boliviana de Energía Nuclear, COBOEN, impulsada por las actividades de investigación que se desarrollaban en el Instituto de Física Cósmica de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA). En la gestión de 1963 se crea el Instituto de Medicina Nuclear, dependiente de la COBOEN.

En los años 70, el Departamento de Ingeniería Nuclear de la COBOEN llegó a plantear la instalación de un reactor nuclear de investigaciones para su utilización en la producción de radioisótopos como una aplicación en la medicina, industria y agricultura, como también para aplicaciones analíticas y la formación de recursos humanos. Esta iniciativa no

prosperó por no contarse con los recursos necesarios, sin embargo la Dirección Ejecutiva de la COBOEN asignó terrenos para el dicho Centro Nuclear, en la localidad de Viacha a 20 km de la sede de gobierno.

##### 2.4.3. RRHH

La necesidad de Recursos Humanos (RRHH) es imperante en el sentido de poder alcanzar las metas y planes por los nuevos programas como ser la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN), el Programa Nuclear Boliviano (PNB), etc., para lo cual existen estrategias de motivación a la juventud Boliviana, como ser: las Olimpiadas Estudiantiles Científicas Plurinacionales, para que en un futuro próximo la juventud pueda especializarse en el área nuclear, como ser: la Física Nuclear, la Ingeniería Nuclear, la Física Médica, etc.

Ya desde los comienzos de las carreras de Física, Ciencias Químicas, Medicina, Ingeniería, etc. estudiantes y profesionales Bolivianos se han formado y están formándose en distintos centros de enseñanza y/o institutos de investigación en el área nuclear, como ser: Reactores Nucleares, Medicina Nuclear, Física Médica, etc. en distintos países, como ser: Argentina, Brasil, Italia, Rusia.

Actualmente el gobierno boliviano está planificando la formación de recursos humanos tanto en maestría como doctorado para continuar enriqueciendo las capacidades científicas y tecnológicas para el buen funcionamiento del futuro Centro de Investigación y Desarrollo Nuclear, que dependerá de la ABEN - PNB.

#### 2.5. INSTITUTO BOLIVIANO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA NUCLEAR (IBTEN) (IBTEN 2018)

##### 2.5.1. VISIÓN - MISIÓN

###### VISIÓN

Controlar y fiscalizar el uso de material nuclear, radiactivo y equipos generadores de radiaciones ionizantes para proteger a la población boliviana y el medioambiente de sus efectos nocivos, impulsando la aplicación de la tecnología nuclear precautelando, los recursos naturales.

###### MISIÓN

Somos la Institución que de manera segura y oportuna controla la utilización de las radiaciones ionizantes y que aplica la ciencia y tecnología nuclear de forma pacífica en los sectores económicos y sociales contribuyendo de forma efectiva al vivir bien de la población boliviana.

##### 2.5.2. CENTRO DE INVESTIGACIONES Y APLICACIONES NUCLEARES (CIAN)

El centro de investigaciones y aplicaciones nucleares "CIAN", es uno de los dos centros pertenecientes al instituto boliviano de ciencia y tecnología nuclear "IBTEN", es el brazo operativo del IBTEN en la vigilancia del medio ambiente. Se encuentra ubicado en el municipio de Viacha - comunidad Surusaya, aproximadamente a 3 km de la plaza principal de Viacha, prolongación de la Av. Bolívar.

**OBJETIVOS DEL CIAN**

El CIAN desarrolla investigación y aplicación de técnicas nucleares y convencionales con fines pacíficos en diversos campos y medio ambiente precautelando el vivir bien de la población boliviana.

**OBJETIVOS ESPECIFICOS DEL CIAN**

Identificar con otras organizaciones problemas que puedan solucionarse mediante la utilización de la ciencia y tecnología nuclear.

Monitorear los proyectos en ejecución ejecutados por las unidades del Centro de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares.

Coadyuvar en la ejecución de proyectos relación con la preservación o mejora de la calidad ambiental.

Articular las demandas institucionales planteadas por la autoridad ambiental competente con las capacidades analíticas del IBTEN - CIAN.

Promover el involucramiento de organizaciones en proyectos regionales desarrollados en el país o mediante la adhesión a iniciativas de otros países.

Socialización de actividades en las que participaron servidores públicos dependientes de la dirección del CIAN.

Apoyo a proyectos cuya contraparte principal no es el IBTEN, pero que requieren de una gestión integrada de los mismos con participación de organizaciones con capacidades diferentes de aporte pero complementarias

**2.5.2.1. UNIDAD DE ANALISIS Y CALIDAD AMBIENTAL (UACA)****UNIDAD DE ANALISIS Y CALIDAD AMBIENTAL**

La unidad de análisis y calidad ambiental "UACA" es una de las unidades dependientes del cian del Instituto Boliviano de Ciencia y Tecnología Nuclear. Tiene una experiencia de más de 20 años en la prestación de servicios de análisis. Posee un personal con mucha experiencia y altamente capacitado. Cuenta con una infraestructura adecuada y un equipamiento renovado y moderno. Posee laboratorios reconocidos como competentes por el organismo internacional de energía atómica "OIEA"

**OBJETIVOS**

Prestar servicios de análisis ambientales a instituciones privadas y gubernamentales, dando cumplimiento a la ley 1333 de medio ambiente y sus reglamentos utilizando las técnicas analíticas nucleares.

Aportar con su tecnología, procesos y productos a cualquier proyecto de desarrollo que contribuya al bienestar general de la población boliviana.

**ACTIVIDADES SERVICIOS DE ANÁLISIS**

Físico químico de suelos, aguas, sedimentos, vegetales, fertilizantes naturales, minerales y muestras.

Físico químico de fertilizantes y plaguicidas en formulaciones.

Físico químico de minerales y muestras geológicas.

Químico en filtro con partículas aerotransportadas.

Clasificación de la calidad de los cuerpos de agua.

Isotopos estables en aguas subterráneas (Espectrometría Laser).

**2.5.2.2. UNIDAD DE INVESTIGACIÓN Y APLICACIONES NUCLEARES (UIAN)**

La unidad de investigaciones y aplicaciones nucleares "UIAN" es un componente del CIAN.

**Objetivos**

Coadyuvar a reducir la inseguridad alimentaria, mediante el empleo de técnicas nucleares. Mutaciones radio inducidas, en procura de obtener variedades con mayor resistencia al estrés hídrico, estrés de heladas, etc.

Remediación de suelos erosionados.

Desarrollo de un criterio cuantitativo de determinación del grado de probabilidad de los suelos.

Contribuir al mejoramiento y productividad de especies agrícolas, integrando el panorama técnico-científico de la biotecnología, apoyando su innovación mediante la interacción con el área rural.

Realizar diversos trabajos en producción, conservación y mejoramiento de cultivos agrícolas mediante técnicas convencionales y nucleares.

Actividades físicas de suelos

Servicio de análisis

Pre tratamiento de muestras, determinación de parámetros físicos de suelos:

Textura

Densidad aparente

Densidad real

Porosidad

Análisis hidro-físico

Granulometría de fertilizantes sólidos

Determinación del contenido de humedad y de la materia seca en Vegetales y en otras muestras.

Oferta de servicios analíticos matrices

Suelos

Fertilizantes

Vegetales

Textura, densidad aparente

Densidad real

Porosidad de suelo

Humedad de suelos (capacidad de campo, punto de marchitez permanente).

Granulometría de fertilizantes sólidos.

- de humedad

- de materia seca

Muestreo de matriz suelo

Tomar sub muestras en zigzag en toda el área a muestrearse, y realizar cuarteos sucesivos hasta obtener 1 kg de muestra, la cual representará a toda la superficie muestreada. Depositar la muestra en bolsas plásticas o bolsitas de nylon consistente. Etiquetarlo bien, y enviar al laboratorio.

**2.5.3. CENTRO DE PROTECCIÓN Y SEGURIDAD RADIOLÓGICA (CPSR)**

Brazo operativo de la Autoridad Nacional Competente: IBTEN, en el control del uso seguro de material radiactivo y equipos generadores de radiaciones ionizantes.

El propósito del Centro de Protección y Seguridad Radiológica "CPSR" es dar cumplimiento a la ley

de protección y seguridad radiológica, que principalmente busca el uso seguro de material radiactivo en las distintas actividades en las que se emplea.

El CPSR tiene las siguientes funciones:

1. Asesorar a los diferentes organismos públicos o privados en todos los aspectos concernientes a la protección y seguridad del personal y del público en operaciones que impliquen exposición a radiaciones ionizantes.

2. Fiscalizar las labores de producción, adquisición, uso, almacenamiento, instalación, manipulación, transporte, comercialización y descarte de las fuentes de radiaciones ionizantes en el país.

3. Dictar normas para la correcta ejecución de todas estas actividades, extendiendo licencias a instituciones públicas, o privadas para la utilización de radiaciones ionizantes en todos los campos de aplicación.

4. Elaborar y ejecutar programas de protección y seguridad radiológica acordes con lo establecido en la ley de protección radiológica.

5. Divulgar mediante cursos de capacitación los conocimientos relativos a la protección y seguridad en el empleo de las radiaciones ionizantes.

Cuenta con dos Unidades:

#### 2.5.3.1. UNIDAD DE RADIOPROTECCIÓN EN INSTALACIONES (URI)

Se encarga de la regulación del uso de fuentes de radiación.

##### 1. Regulación de instalaciones

Determinar y verificar niveles de seguridad mediante inspecciones de acondicionamiento, habilitación, verificación, especiales y a requerimiento. Evaluación y emisión de licencias de construcción para prácticas relevantes. Evaluación de documentación, antecedentes y condiciones de trabajo, sugiriendo la emisión, renovación o suspensión de licencias institucionales. Emisión de autorizaciones para actividades específicas en función a la revisión de documentación, antecedentes y condiciones de trabajo de las diferentes instituciones.

##### 2. Regulación de trabajadores

Evaluación de documentación, antecedentes y aptitudes para la emisión, renovación o suspensión de licencias individuales. Capacitación en protección radiológica en función a las diferentes prácticas reguladas. Evaluación en protección radiológica de todo personal considerado ocupacionalmente expuesto y así como de los responsables de protección radiológica. Controlar registros de dosis de trabajadores ocupacionalmente expuestos.

##### 3. Otras actividades

Se encarga del inventario nacional de material radiactivo y generadores de rayos X, además del control de transporte de material radiactivo. Encargado de la importación, exportación y devolución de material radiactivo y generadores de rayos X. Elaboración de documentos específicos de regulación. Asesoramiento radiológico. Respuesta a emergencias radiológicas. Gestión de residuos radiactivos. Además Forma parte activa del Comité de Seguridad Física Nuclear y Radiactiva.

#### 2.5.3.2. UNIDAD DE DOSIMETRÍA DE RADIACIONES IONIZANTES (UDRI)

Tiene como finalidad ser referente en metrología de radiaciones ionizantes y brindar servicios especializados científico-técnicos en protección radiológica para el control y uso seguro de las radiaciones ionizantes.

Existen dos áreas a cargo de esta unidad, mismas que se desarrollan en lo que se constituyen laboratorios, y que son las siguientes:

##### a) METROLOGÍA DE RADIACIONES IONIZANTES

La confiabilidad en las medidas de dosis o de actividad es fundamental en Protección Radiológica. Estas medidas de radiación deben tener la confianza de organismos nacionales e internacionales.

##### LABORATORIO DE METROLOGÍA DE RADIACIONES IONIZANTES - LMRI

Llamado así desde mayo 2006, a partir de contar con instrumentos de referencia para medida de radiaciones ionizantes provenientes de los radio nucleídos emisores gamma, tanto para radio protección como para radioterapia.

Las principales funciones de un laboratorio de esta naturaleza son establecer, mantener o mejorar patrones secundarios o terciarios con fines de dosimetría de la radiación; dirigida a evaluar y controlar la calidad del haz de radiación en Teleterapia (tratamiento de tumores) y en Protección Radiológica (calibración de monitores de radiación).

##### b) SERVICIOS ESPECIALIZADOS CIENTÍFICO - TÉCNICOS

###### DOSIMETRIA PERSONAL

Monitoreo individual de personas que trabajan con radiaciones ionizantes para estimar, a través del dosímetro personal, sus dosis efectivas. Se dispone de lectores de dosímetros personales bajo la técnica de termoluminiscencia y muflas para tratamientos térmicos de los cristales detectores de Fluoruro de Litio.

###### CALIBRACION DE MONITORES DE RADIACION

A través de valores de referencia se ajustan los instrumentos medidores de radiación para su respuesta correcta. Un instrumento calibrado permite la evaluación apropiada de la zona de trabajo y garantiza la salud de los trabajadores.

###### ANALISIS RADIOMETRICOS (en protección radiológica)

Se cuenta con un analizador multicanal y fuentes radiactivas de calibración. Sistema que permite determinar la no contaminación radiactiva de una muestra mediante espectrometría gamma.

#### 2.5.4. CENTRO DE DOCUMENTACIÓN NUCLEAR (CDN)

Desde que Bolivia es miembro del Organismo Internacional de Energía Atómica, en 1963, ha recibido información especializada en procura de promover a la energía nuclear y sus aplicaciones con fines pacíficos, dentro de una organización Nacional de-

nominada Comisión Nacional de Energía Nuclear. En 1983, la COBOEN se divide en Áreas del conocimiento, generando el Instituto Boliviano de Ciencia y Tecnología Nuclear. El IBTEN hereda la información relacionada con la aplicación y uso pacífico de la Energía Nuclear dentro de la Denominada la Biblioteca especializada en el Centro de Investigaciones Nucleares (CIN) del IBTEN en la localidad de Viacha. Como una decisión estratégica en la gestión 2011, se constituye el Centro de Documentación Nuclear (CDN) que recibe toda la documentación de la Biblioteca Especializada y desarrolla un nuevo proyecto de transferencia de Información.

El CDN Especializado en temas nucleares y de protección radiológica, cuyo objetivo es facilitar el acceso a la investigación científica. Cuenta con: Publicaciones periódicas, monografías, tesis, boletines, glosarios, enciclopedias y revistas del OIEA.

### 3. LEGISLACION (Ministerio de Gobierno 2018)

El Parágrafo I del Artículo 378 de la Constitución Política del Estado Plurinacional de Bolivia, determina que las diferentes formas de energía y sus fuentes constituyen un recurso estratégico, su acceso es un derecho fundamental y esencial para el desarrollo integral y social del país, y se regirá por los principios de eficiencia, continuidad, adaptabilidad y preservación del medio ambiente.

El Parágrafo I del Artículo 379 del Texto Constitucional, establece que el Estado desarrollará y promoverá la investigación y el uso de nuevas formas de producción de energías alternativas, compatibles con la conservación del ambiente.

Por Decreto Supremo N° 5389, de 14 enero de 1960, se crea la Comisión Boliviana de Energía Nuclear para promover, dirigir, implementar y difundir el uso pacífico de la tecnología nuclear, en nuestro país, al no contar con los instrumentos de política nuclear, reestructurado por Decreto Supremo N° 19583, de 3 de junio de 1983, creándose el Instituto Boliviano de Ciencia y Tecnología Nuclear - IBTEN, el cual concentraría las actividades de investigación y aplicación de técnicas nucleares, planificación y supervisión del desarrollo de la tecnología nuclear, y aplicación de la Ley de Protección Radiológica, y que cumplirá las funciones de contraparte nacional oficial, para todos los convenios y relaciones internacionales sobre tecnología nuclear, como Institución Científico-Técnico descentralizado, con personería jurídica, patrimonio propio, autonomía administrativa y financiera dependiente de la Presidencia de la República.

El “Programa Nuclear Boliviano (PNB)”, es considerado como un instrumento y mecanismo mediante el cual el Estado promoverá el uso pacífico de la energía nuclear, tanto en los ámbitos de las aplicaciones energéticas como tecnológicas, capaz de apalancar el desarrollo integral del conocimiento científico y tecnológico para el vivir bien.

Mediante Decreto Supremo N° 2697 del 9 de marzo de 2016 se crea la Agencia Boliviana de Energía Nuclear, cuya sigla es ABEN, como institución pública

descentralizada, con personalidad jurídica y patrimonio propio, con autonomía de gestión administrativa, técnica, legal, económica y financiera, de duración indefinida y bajo tuición del Ministerio de Hidrocarburos y Energía. La ABEN tiene por finalidad desarrollar, suministrar y comercializar bienes y servicios de tecnología nuclear con fines pacíficos. La ABEN tendrá las siguientes funciones:

- Implementar y ejecutar la política en materia de tecnología nuclear.
- Proponer y desarrollar planes y programas en materia de tecnología nuclear. Suministrar o comercializar bienes en materia de tecnología nuclear.
- Desarrollar y prestar servicios en materia de tecnología nuclear.
- Promover y desarrollar en el país la investigación en el campo de la ciencia y tecnología nuclear y sus aplicaciones con fines pacíficos.
- Operar las instalaciones nucleares en el marco del Programa Nuclear Boliviano.
- Ejercer la propiedad y resguardo estatal de los materiales fisionables que pudieran ser introducidos y desarrollados en el país.
- Ejercer la propiedad estatal de los materiales radiactivos contenidos en los elementos combustibles irradiados, generados dentro del territorio boliviano.

### 4. INTERACCION GOBIERNO, INDUSTRIA Y ACADEMIA

Los nuevos planes (ABEN-PNB, etc.) proponen una fuerte interacción Gobierno - Industria y Academia.

En la academia, las carreras de Física de las universidades estatales (UMSA, UPEA, UMSS, UATF) existen, además de las materias relacionadas, docentes - investigadores que trabajan estudiando distintos experimentos y sus futuras aplicaciones en la industria.

De igual manera, se ha creado recientemente, el 20 de Mayo de 2016, la Sociedad Boliviana de Energía Nuclear (SOBOEN) con la participación de distintas instituciones bolivianas vinculadas al área, como ser:

- Instituto de Medicina Nuclear (INAMEN)
- Instituto Boliviano de Ciencia y Tecnología Nuclear (IBTEN)
- Centro de Imagen Molecular (CIM)
- Oncológico del Oriente Boliviano
- Instituto Oncológico Nacional
- Instituto de Medicina Nuclear de Sucre
- Caja Petrolera de Salud
- Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN)

- La Carrera de Física de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA)
- La Universidad Mayor de San Simón (UMSS)

El objetivo de la SOBOEN es que profesionales de distintas especialidades, como ser, médicos nucleares, físicos - médicos, físicos nucleares, ingenieros en energía, ingenieros químicos, profesionales especializados en derecho nuclear, etc. darán asesoramiento técnico, científico y tecnológico al gobierno boliviano.

El gobierno propone, mediante la ABEN - PNB, dar un fuerte impulso a 4 sectores: Salud, Industria, Ciencia - Tecnología y Academia (más información en el punto 2.2.1).

- En el Sector Salud, un Centro Nacional Ciclotrón - Radiofarmacia, para mejorar el diagnóstico y tratamiento del cáncer y otras patologías.
- En el Sector Industrial, una Planta Multipropósito de Irradiación para contribuir a la seguridad e inocuidad alimentaria.
- En el Sector de Ciencia y Tecnología, un Reactor Nuclear de Investigación de baja potencia, cuyo objetivo es contribuir al desarrollo científico y tecnológico del país.
- En el Sector Académico, Laboratorios de Investigación Nuclear y Capacitación, cuyo objetivo es el de contribuir a la formación y capacitación teórica y práctica en las áreas de ciencias, ingeniería y tecnología nuclear con fines pacíficos, fortaleciendo las universidades del país.

#### 5. INTERCAMBIO Y MOVILIDAD ESTUDIANTIL

Desde los comienzos de las carreras de física, medicina, ingeniería, etc. estudiantes y profesionales Bolivianos se han formado y están formándose en distintos centros de enseñanza y/o institutos de investigación en el área nuclear, como ser: Reactores Nucleares, Medicina Nuclear, Física Médica, etc. en distintos países, como ser: Argentina, Brasil, Italia, Rusia.

Actualmente el gobierno boliviano está planificando la formación de recursos humanos tanto en maestría como doctorado para continuar enriqueciendo las capacidades científicas y tecnológicas para el buen funcionamiento del futuro Centro de Investigación y Desarrollo Nuclear.

#### 6. USO DE TIC Y DE LA COMUNICACIÓN

”Con la Ley 070 Avelino Siñani Elizardo Pérez (ASEP) se enfatiza la apropiación de conocimientos de la Tics en las escuelas y colegios principalmente. A partir de ahí se impulsa los telecentros para favorecer a la sociedad y la comunidad educativa el uso de las nuevas tecnologías de la información, formándose el Programa Nacional de Telecomunicaciones de Inclusión Social (Prontis), para el aprovechamiento de

las TIC a nivel del sistema educativo nacional, sin embargo, el Ministerio de Educación por ejemplo está desarrollando el proyecto de ”Mi escuela conectada” dotando de computadoras a una cierta cantidad de Unidades Educativas, para el fortalecimiento del proceso de enseñanza-aprendizaje. El Prontis financiará la conexión a la red internet.

Los aportes del internet al cambio pedagógico en la educación superior, se concentra en las carreras y/o institutos de investigación de cada unidad académica, así por ejemplo la carrera de Física de la Facultad de Ciencias Puras y Naturales tiene un portal donde exhibe una comunicación fluida con los medios sociales a cerca del campo de investigación que los investigadores realizan.

Con la reactivación de la energía nuclear en Bolivia, la Facultad de Ingeniería ve la necesidad de abrir una carrera de Ingeniería Nuclear en la que se haga uso de las TICs como un primer paso hacia el fortalecimiento del conocimiento en materia de energía nuclear.

Los experimentos que usualmente se realizan en el reactor de investigación RA-6 en argentina serán de mucho apoyo a países de la región, en vista de que será vía Internet el acceso a la tecnología de los reactores nucleares de investigación y su potencial uso en varias disciplinas del conocimiento, como ser la física de reactores nucleares.

#### 6.1. PUBLICACIONES EN LA PRENSA NACIONAL

- “Reactor de fusion nuclear para energía eléctrica”, Anwibuma - Física - UMSA, Bolivia, Domingo 8 de Agosto de 2010.
- “Energía Nucleoeléctrica, alternativa para Bolivia”, Anwibuma - Física - UMSA, Bolivia, Domingo 20 de Febrero de 2011.
- “Fusión nuclear, confinamiento magnético e inercial”, Anwibuma - Física - UMSA, Bolivia, Domingo 5 de Febrero de 2012.

#### 7. COOPERACION Y PARTICIPACION EN REDES ACADEMICAS (Ministerio de Educación 2011)

##### 7.1. CONVENIOS

Recientemente el país ha firmado muchos convenios y/o tiene planes de hacerlo, con distintas instituciones académicas, organizaciones no gubernamentales y gubernamentales, como ser:

BOLIVIA - CANADA (BOLIVIA-CANADÁ 2015) Se prevé que próximamente el Ministerio de Hidrocarburos y Energía de Bolivia y la Universidad de Alberta (Canadá) firmen un acuerdo para la transferencia de tecnología, la capacitación de recursos humanos y el desarrollo de investigaciones conjuntas en hidrocarburos, electricidad y nuclear.

Las autoridades de ambas instituciones se reunieron el pasado 9 de junio para comenzar a negociar el acuerdo, que se espera sea firmado en julio. Del encuentro participaron el ministro de Hidrocarburos y Energía boliviano, Luis Alberto Sánchez; y

por parte de la casa superior de estudios, el Decano Stan Blade y el gerente regional para América de la Universidad de Alberta, Cristian Gonzáles Paez.

Bolivia pretende invertir fuertes sumas en el sector hidrocarburoífero en los próximos diez años, para ello se necesitará recursos humanos que puedan construir, operar, administrar, investigación básica, investigación aplicada y gerentar todos los proyectos estratégicos. De esta forma, dentro del marco del “Programa Nuclear Boliviano”, la Universidad de Alberta representa un socio estratégico gracias a su trayectoria vinculada al área hidrocarburoífera en la parte social, ambiental y en la parte técnica y productiva.

BOLIVIA - RUSIA (BOLIVIA-RUSIA 2016; LANENT 2015a)

El actual Ministerio de Hidrocarburos y Energía, Luis Alberto Sánchez, y el presidente de la empresa rusa ROSATOM, Sergei Kiriyenko, sostuvieron un encuentro el pasado 17 de Junio de 2016, en el FORO INTERNACIONAL ECONÓMICO, llevado a cabo en San Petersburgo, donde acordaron la suscripción de tres Memorándums de Entendimiento, sobre Capacitación de Personal, Comunicación y Aceptación Pública en el tema nuclear, de acuerdo a los más altos estándares internacionales y el acompañamiento constante del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), expresó Sánchez desde Rusia.

La reunión se sostuvo al más alto nivel entre las delegaciones boliviana, encabezada por Sánchez, y la rusa encabezada por Kiriyenko, quien fue ex primer ministro de Rusia y ahora Director de la empresa en tecnología nuclear más importante a nivel mundial.

Con relación al documento sobre Capacitación de Personal, Sánchez explicó que “jóvenes de El Alto y de todo el país recibirán formación en Rusia a nivel de licenciatura, y profesionales serán especializados en postgrado en el área de las aplicaciones pacíficas de la tecnología nuclear. “Estos jóvenes y profesionales que serán capacitados serán quienes se hagan cargo del programa nuclear boliviano y lleven adelante las aplicaciones del centro nuclear”, manifestó Sánchez.

Respecto al memorándum sobre comunicación, el Ministro sostuvo que “es necesario a fin de informar a la población sobre los beneficios de cada una de las instalaciones del centro nuclear para que la población las use de acuerdo a sus necesidades”. En este sentido, consideró importante en este tema el apoyo de Rusia que un país con amplia experiencia en la tecnología nuclear y su difusión”, sostuvo la autoridad.

Asimismo, el Ministro señaló que se trabaja en los últimos detalles del documento el cual establece las condiciones y acuerdos en el marco del cual se suscribirán otros dos contratos para la realización de estudios técnicos de geología y desarrollo de la infraestructura del futuro centro en Bolivia.

El Foro Internacional Económico de San Petersburgo tiene como objetivo ser un instrumento para el negocio que ayude a superar barreras geográficas

e informativas que separan a Rusia de otros países. Reúne a más de 6.000 representantes del ámbito político y empresarial, además de científicos y representantes sociales.

Posteriormente, el pasado Viernes 8 de Julio de 2016, el Ministerio de Hidrocarburos y Energía y la empresa rusa ROSATOM, firmaron los siguientes convenios de cooperación

- “Acuerdo para el Desarrollo del Proyecto de Construcción del Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN)”
- “Aceptación Pública del uso de la Tecnología Nuclear”.
- “Capacitación de Personal en el uso de la Tecnología Nuclear”

El primer documento, “Acuerdo para el Desarrollo del Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear”, establece el programa de actividades y tareas futuras a realizar para la preparación y ejecución del Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN), con la visión de que sea el más avanzado de Sudamérica, de acuerdo a los más altos estándares internacionales y con el acompañamiento permanente del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

El segundo acuerdo, “Memorándum de Entendimiento sobre la Cooperación en el Campo de la Aceptación Pública del Uso Pacífico de la Tecnología Nuclear”, está referido al ámbito de la comunicación que permitirá realizar una adecuada socialización y difusión de la tecnología nuclear a la población boliviana.

El tercer documento, “Memorándum de Entendimiento sobre la Preparación y Capacitación de Personal en el Campo del Uso de la Tecnología Nuclear”, permitirá desarrollar, de manera conjunta, una serie de actividades que aseguren el poder contar con profesionales bolivianos altamente especializados en las aplicaciones pacíficas de la tecnología nuclear, para la fase de implementación y operación del CIDTN.

BOLIVIA - CERN (EJU 2015)

Hay un convenio (pendiente) con el CERN, Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (Consejo Europeo para la Investigación Nuclear).

## 7.2. PARTICIPACIÓN EN REDES ACADÉMICAS

Las Redes Nacionales de Investigación Científica y Tecnológica actuales (2016) (Viceministerio de Ciencia y Tecnología 2017a,b) han sido impulsadas por el Viceministerio de Ciencia y Tecnología, organismo dependiente del Ministerio de Educación, responsable de la generación de políticas en apoyo al desarrollo de las actividades de ciencia, tecnología e innovación del país.

El Sistema WEB Integrado de Información científica, tecnológica y de innovación, se constituye

en la herramienta de difusión y procesamiento de información en ciencia, tecnología e innovación; con funcionalidades que permiten la interacción de los actores participantes del Sector de Ciencia y Tecnología. Tiene como misión la de planificar, promover y fortalecer la ciencia, la tecnología y la innovación, respaldando iniciativas y proyectos para contribuir al desarrollo social, económico y cultural del país. Su visión es la de ser el núcleo institucional de referencia nacional e internacional en temas de ciencia, tecnología e innovación, contribuyendo al desarrollo nacional.

Las Redes Nacionales de Investigación Científica y Tecnológica tienen como objetivo general articular investigadores, especialistas y expertos, a través de la conformación de grupos de trabajo temáticos (Redes Nacionales de Investigación Científica y Tecnológica), para la generación y actualización de conocimientos, difusión de avances, cooperación interinstitucional, apoyo al sector socio-productivo y elaboración e implementación de proyectos de investigación científica, tecnológica e innovación. Contribuyendo de esta manera al aprovechamiento, transformación sostenible y generación de valor agregado en sectores y regiones priorizadas a nivel nacional, regional y sectorial.

Sus objetivos específicos son:

- Promover la cooperación y la generación de capacidades científico-tecnológicas de los miembros involucrados en las Redes.
- Formular y ejecutar proyectos de investigación, desarrollo e innovación de manera conjunta entre los miembros de las Redes, involucrando a sectores socio-productivos.
- Difundir los resultados alcanzados a través de las Redes, generados a partir de su implementación.

Las Redes Nacionales de Investigación Científica y Tecnológica actuales son:

1. Alimentos
2. Biodiversidad
3. Bosques
4. Comunicación Ciencia y Cultura
5. Energías
6. Incubadoras de Base Tecnológica
7. Nuclear
8. Observación de la Tierra
9. Paleontología
10. Recursos Hídricos
11. Remediación Ambiental
12. Saberes Locales y Conocimientos Ancestrales
13. Tecnologías de Información y Comunicación

## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente documento obedece a una revisión bibliográfica, asistencia a charlas técnicas, foros debate, etc. sobre temas referentes al estado y las tendencias sobre la educación nuclear en el Estado Plurinacional de Bolivia, desde sus inicios, a comienzos

de 1960 hasta las nuevas y últimas tendencias en el país.

Se debe elaborar una política de gestión de desechos radiactivos que aseguren efectos mínimos al medio ambiente y a la sociedad en general, así como también garantizar estudios profesionales geotécnicos, hidrológicos, ingenierías (civil, sanitaria, eléctrica, geológica, electrónica, nuclear, etc.) para la construcción de las instalaciones que se están planificando realizar a corto plazo en el país a través de la ABEN - PNB, con asesoramiento de la OIEA.

Se recomienda que la toma de decisiones en todas las actividades relacionadas con el Programa Nuclear Boliviano (PNB), con sus cuatro pilares fundamentales:

- COMPLEJO CICLOTRÓN RADIO FARMACIA (SCR)
- PLANTA MULTIPROPOSITO DE IRRADIACIÓN (PMI)
- REACTOR NUCLEAR DE INVESTIGACIÓN (RNI)
- LABORATORIO DE INVESTIGACIONES NUCLEARES Y CAPACITACIÓN (LINC)

cuente con la participación activa, no solo del estado, sino también de las universidades a través de sus Institutos de Investigación y de los sectores industriales.

Si bien las aplicaciones nucleares son amplias, tanto en la salud pública, la industria, etc., existen otros mecanismos de irradiación igual de efectivos, como ser los realizados por partículas cargadas aceleradas, como por ejemplo haces de protones, que pueden ser originados en un ciclotrón o un sincrotrón, para la terapia de protones o protonterapia (Wikipedia 2015), o el uso de haces de electrones con aplicaciones multipropósito, como ser ciencia de materiales, industria, agricultura, farmacia, preservación de patrimonios, etc. (Ramírez-Ávila et al. 2015) Es por este motivo que se recomienda potenciar dichas técnicas hasta los niveles más óptimos.

No se debe descuidar la búsqueda del mejoramiento continuo del Sistema Educativo del Estado Plurinacional de Bolivia, mediante el apoyo permanente a propuestas educativas que fomenten la enseñanza de las ciencias, sobre todo vinculadas con el área nuclear, desde tempranas etapas en todas las Unidades Educativas tanto rurales como urbanas, mediante programas ya establecidos como ser, la Olimpiada Boliviana de Física, la Olimpiada Boliviana de Astronomía y Astrofísica, en coordinación con el Ministerio de Educación, el Diplomado en Física para profesores de Colegio, como iniciativa de la Carrera de Física de la UMSA, etc., buscando el mejoramiento continuo del sistema educativo boliviano en estas disciplinas: Física, Astronomía y Astrofísica y sus directas transversales: Biología, Química, Matemática, Geología, Ciencias Sociales, etc..

Por último se recomienda no dejar de participar en redes internacionales, fomentar la investigación científica y tecnológica, y dar énfasis a una adecuada gestión del conocimiento nuclear (IAEA 2015;

LANENT 2015b) tanto a nivel nacional, latinoamericano e internacional.

#### **Conflicto de intereses**

Los autores declaran que no hay conflicto de intereses con respecto a la publicación de éste documento.

#### REFERENCIAS

- Ministerio de Hidrocarburos (2015), Presentación del Ministerio de Hidrocarburos y Energía del Estado Plurinacional de Bolivia (La Paz, Bolivia)
- BOLIVIA-CANADÁ (2015), <http://www.lanentweb.org/es/capacitacion-nuclear-bolivia-canada>
- BOLIVIA-RUSIA (2016), <http://enlace.comunicacion.gob.bo/index.php/2016/06/17/en-el-marco-del-foro-mas-importante-de-europa-bolivia-y-rusia-acuerdan-firma-de-memorandums-para-capacitacion-difusion-e-implementacion-del-centro-nuclear/>
- EJU (2015), <http://eju.tv/2015/09/martin-subieta-el-fisico-boliviano-que-busca-particulas-de-dios/>
- Física - UATF (2018), <http://www.uatf.edu.bo/facultades.php>
- Física - UMSA (2018), <http://www.fiumsa.edu.bo>
- Física - UMSS (2018), <http://www.fcyt.umss.edu.bo>
- IAEA (2015), <https://www.iaea.org/nuclearenergy/nuclearknowledge/>
- IBTEN (2018), <http://ibten.gob.bo/portal/index.php>
- LANENT (2015a), <http://www.lanentweb.org/es/rusia-bolivia-capacitacion-nuclear>
- (2015b), <http://www.lanentweb.org/es>
- Ministerio de Gobierno (2018), <http://www.gacetaoficialdebolivia.gob.bo>
- SOBOFI (2018), <http://fiumsa.edu.bo/sobofi/index.html>
- Viceministerio de Ciencia y Tecnología (2017a), <http://www.cienciaytecnologia.gob.bo/contenido/RedesInvestigacion>
- (2017b), <http://www.infocyt.gob.bo>
- Wikipedia (2010), <https://en.wikipedia.org/wiki/Yellowcake>
- (2015), <http://es.wikipedia.org/wiki/Protonterapia>
- Ministerio de Educación, VCyT (2011), REDES NACIONALES DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, D.R. Ministerio de Educación del Estado Plurinacional de Bolivia (La Paz, Bolivia)
- (2012), PROGRAMA NUCLEAR DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA, RED NACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA NUCLEAR (La Paz, Bolivia)
- Ramírez-Ávila, G. M., Carrasco, C. & Romero-Bolaños, L. (2015), <http://www.ibten.gob.bo/portal/index.php?opt=frontmod=detalleid=47>

## EL CAOS Y SU TRASCENDENCIA: ENTREVISTA CON JAMES YORKE

## CHAOS AND ITS TRANSCENDENCE: INTERVIEW WITH JAMES YORKE

GONZALO MARCELO RAMÍREZ-ÁVILA\*

Instituto de Investigaciones Físicas  
Universidad Mayor de San Andrés  
Campus Universitario c. 27 Cota-Cota, Casilla 8635, La Paz, Bolivia

### RESUMEN

James Yorke es uno de los científicos más prominentes e influyentes en lo que concierne a la teoría del caos pues fue el acuñador de este término en la jerga científica. En octubre de 2016 coincidí con este personaje en Dresde, Alemania, donde consideré que sería importante hacerle una entrevista para la Revista Boliviana de Física con el fin de motivar a la comunidad de físicos bolivianos en el estudio de la dinámica no lineal.

Código(s) PACS: 01.60.+q — 05.45.Gg

*Descriptores:* Biografías, tributos, notas personales — Control del caos, aplicaciones del caos

### ABSTRACT

James Yorke is one of the most prominent and influential scientists in which concerns chaos theory since he was the one who proposed this term in scientific jargon. In October 2016 I met this personage in Dresden, Germany, where I thought it would be appropriate to do an interview for the Bolivian Journal of Physics to motivate the community of Bolivian physicists in the study of nonlinear dynamics.

*Subject headings:* Biographies, tributes, personal notes — Control of chaos, applications of chaos

### 1. INTRODUCCIÓN

Corrían los primeros días del mes de octubre de 2016 y en el Instituto Max Planck para la Física de los Sistemas Complejos (MPIPKS, por su sigla en alemán) en Dresde, Alemania, tiene lugar el taller “Multistability and Tipping: From Mathematics and Physics to Climate and Brain”. Entre los conferencistas invitados estaba James A. (Jim) Yorke (JY). Durante los días del evento, observé que JY seguía con atención muchas de las charlas y participaba activamente formulando preguntas muy inteligentes que permitían que los expositores lograsen aclarar los puntos más importantes de sus temas. El último día del evento, le propuse hacerle una entrevista para la Revista Boliviana de Física (RBF) y muy gentilmente, a pesar de que varios otros participantes lo requerían para diferentes aspectos, me concedió parte de su valioso tiempo, en el que no solo hicimos la entrevista sino también me hizo una demostración experimental del comportamiento caótico de un péndulo doble y también recibí de su parte algunos consejos que podrían ayudar a mejorar mi actividad científica.

Antes de presentar la transcripción de la entrevista, es bueno hacer un breve resumen de la vida y obra de JY (ver Fig. 1) con información obtenida de

Wikipedia (2017). Obtuvo su doctorado en la Universidad de Maryland en 1966 y posteriormente trabajó en esa institución hasta llegar a ocupar el puesto de profesor y detentar una cátedra en el Departamento de Matemática de donde se jubiló oficialmente en junio de 2013, aunque sigue muy activo en sus actividades científicas. Tuvo una prolífica labor tanto académica como científica, habiendo dirigido más de 50 tesis doctorales y tener más de 600 publicaciones como se ve en Google Scholar (2017), entre las cuales se destacan por su impacto, el control del caos planteado por Ott, Grebogi, & Yorke (1990) y que hasta les valió una nominación al premio Nobel en 2016; el trabajo donde por primera vez se introduce el término “caos” expuesto por Li & Yorke (1975) y que tiene una gran importancia desde el punto de vista histórico como lo establecieron Aubin & Dahan Dalmedico (2002); y el método de reconstrucción de espacios de fases a partir de series temporales desarrollados por Sauer, Yorke & Casdagli (1991), el mismo que sirvió como base de una investigación del Grupo de Sistemas Complejos de la UMSA, llevada a cabo por Gérard *et al.* (2016), donde se caracterizaron los sonidos de tarkas utilizando estas técnicas.

### 2. ENTREVISTA

**RBF:** Estamos con Jim Yorke quien es quizás uno de los científicos más conocidos, en el campo de la

\*<http://www.fiumsa.edu.bo/docentes/mramirez/>



FIG. 1.— James A. Yorke (nacido el 3 de agosto de 1941 en Plainfield, Nueva Jersey, EEUU). Es un Investigador Distinguido y Profesor de Matemática y Física y además de ex Director del Departamento de Matemática de la Universidad de Maryland en College Park, como se menciona en Wikipedia (2017). Foto tomada en Dresde el sábado 8 de octubre de 2016 en el MPIPKS.

dinámica no lineal y quisiera preguntarle ¿Cuál fue su principal motivación para estudiar la no linealidad?

**JY:** Bueno, antes de empezar en dinámica no lineal, yo estaba estudiando ciertas áreas de geometría diferencial. Luego, cuando me interesé en la dinámica simplemente visualicé el movimiento, cómo se mueven las cosas generando cambios y pensar en la idea del cambio como un todo, es simplemente un área perfecta en la cual trabajar. Realmente me gustó, estaba encantado puesto que podía relacionarme con eso. A veces sistemas con retardos temporales, o derivadas múltiples, dan una muy buena noción del cambio.

**RBF:** El periodo 3 implica caos, ¿Qué representa esto para usted? y ¿cuál es el origen y la razón para haber elegido la palabra “caos”?

**JY:** Para mí, todos saben lo que es el caos puesto que la vida de todos es caótica. El caos significa que un pequeño cambio en un momento crucial, puede provocar un enorme cambio en tu vida; lo mismo sucede con ciertos circuitos eléctricos y una gran variedad de cosas. El caos significa que pequeños cambios producen grandes cambios. Han habido películas acerca del caos donde, por ejemplo, el cierre repentino de una puerta del tren subterráneo que evita el ingreso en este de una mujer que corría, y luego te muestran como evoluciona su vida. Después, repiten parte de la escena pero esta vez, ella logra entrar al vagón, lo que produce un cambio radical en la evolución de su vida. Existe otra película acerca del caos, llamada “La Avispa”, una pequeña película donde se muestra a una persona conduciendo su auto y una avispa zumbando sobre su cabeza; el conduc-

tor coge y agita un periódico con el fin de matar a la avispa pero falla en su intento, lo que provoca que la avispa le pique trayendo como consecuencia el choque de su auto. Este hecho, se constituye en el inicio de una espiral descendente en su vida. Al igual que en la anterior película, se repite la escena pero ahora el conductor acierta y mata a la avispa y su vida transcurre normalmente y todo está bien. Dependiendo si matas a la avispa o no, tu vida podría transcurrir de manera muy diferente, ..., de eso se trata el caos. Usualmente vemos aspectos matemáticos, en los cuales, pequeños cambios producen grandes cambios.

**RBF:** El control de caos, un trabajo muy importante ¿Cuáles son los principales aspectos y consecuencias del mismo?

**JY:** Debo decir que este es uno de nuestros trabajos que tuvo un gran impacto, pero lo tuvo por una extraña razón, siendo esta, el hecho de que los físicos generalmente no aprenden acerca de teoría de control<sup>1</sup>; en cambio, los ingenieros normalmente aprenden de teoría de control; en tanto que los matemáticos lo hacen a veces, pero los físicos nunca. Entonces, cuando empezamos a decirles como podrían usar en sus experimentos el control del caos, haciendo, por ejemplo, un pequeño cambio en la resistencia eléctrica o un pequeño cambio en la corriente y podrían determinar que ocurrirá en sus sistemas caóticos. Les gustó mucho y pensaron que era una gran idea; entonces, lo que hicimos fue explicarles a los físicos acerca de la teoría de control y lo que también hicimos fue decirles cómo podrían controlar sus experimentos sin tener un modelo matemático de los mismos. Porque después de todo, es difícil tener un modelo exacto de un experimento. Consiguientemente, les comentamos que simplemente podían ver el sistema dinámico y cómo este evoluciona y que podrían crear un conjunto de datos para el cual encontrarán órbitas periódicas que con pequeños cambios en, digamos, la resistencia de un circuito, podrían ver la dinámica de la órbita que es casi periódica y ajustando la resistencia hacia atrás y adelante a manera de retroalimentación, podrían controlar el circuito y podrían mantenerlo periódico a pesar de que este sería intrínsecamente caótico si se mantuviese la resistencia constante. Se podría también ajustar ligeramente la resistencia y provocar una migración a una órbita periódica diferente y conseguir estabilizarla. Todo lo anterior, sin tener ecuación alguna. De eso se trata el control del caos.

**RBF:** En su opinión, ¿cuál es el estado del arte en la teoría del caos?

**JY:** Sorprender es una naturaleza del caos, sorprender a la gente. Nunca sé en qué dirección avanza. Esperaría hacer descubrimientos que me sorprendan y por ende, no puedo planear cómo sorprenderme. Así, hablo con la gente, ellos toman ideas, yo obtengo ideas, trabajamos juntos y nos

<sup>1</sup> Actualmente en la Carrera de Física de la UMSA, se tiene una materia denominada “Teoría de Control” a cargo del Ing. Pedro Miranda.

sorprendemos a nosotros mismos y el caos nos sorprende. Entonces, la dirección a la cual se dirige el caos es difícil de decir pero hay una tendencia a que sea encaminado hacia aplicaciones. A pesar de ello, yo sigo interesado en estudiar los fundamentos de la teoría del caos. Nuevamente, no sé a dónde nos llevará esto. Una forma de ver esto, es realizar experimentos numéricos; tengo un programa: “Dynamics” que escribí, el cual se encuentra disponible en mi página web<sup>2</sup>. Lo utilizo para explorar sistemas y encontrar cosas nuevas que prácticamente no esperaba; eso es muy interesante para mí. Está claro que al ver ejemplos y constatar que son sorprendentes, se debe tener experiencia en caos.

**RBF:** ¿Cuáles considera que son los desafíos principales para la dinámica no lineal?

**JY:** Los desafíos para sorprender. Me gusta la investigación, no sólo los detalles de cómo funciona algo en particular, sino encontrar cosas que la gente no esperaría que estén ahí. Por ejemplo, encontramos y fuimos unos de los primeros en publicar acerca de fronteras de las cuencas, cuencas de atracción para sistemas físicos y encontramos que en el estudio de sistemas matemáticos muy abstractos y de variable compleja que se aplicaban a sistemas físicos en muchas maneras. Luego descubrimos “cuencas acibilladas”, las cuales son mucho más raras que la cuencas regulares de atracción; son tan raras que la gente no esperaba que existan y de repente, ... ahí están y ocurren en muchos casos. Controlar el caos es algo que no se esperaba pero de repente empezamos a pensarlo; reflexionamos acerca de los límites de lo que es conocido y así buscar sistemas que son ligeramente diferentes; por ejemplo, sistemas continuos que tienen derivadas discontinuas y qué tipos de bifurcaciones experimenta el sistema; exploramos ese tipo de sistemas, ... estamos permanentemente explorando.

**RBF:** Algunas personas dicen que la ciencia no lineal es la ciencia del siglo XXI ¿Cómo considera esta afirmación?

**JY:** Yo diría que la dinámica no lineal es la “ciencia del todo” porque un sistema debería ser horriblemente especial para ser lineal. La Mecánica Cuántica se comporta de manera diferente pero eso es porque se lidia con ondas de probabilidad pero si uno se fija en un sistema caótico y ve la distribuciones de probabilidad y cómo evolucionan estas en el tiempo, se comportan casi como lo hacen las funciones de onda pero como en casi todos los sistemas, pequeños cambios resultarán en grandes cambios. Una vez, quise preguntar a una joven mujer que estaba asistiendo a una clase, cómo se conocieron sus padres. Esto fue en Wisconsin, ella dijo que su madre tomó un taxi y empezó a hablarle al conductor, congeniaron, quedaron para volverse a ver y finalmente se casaron. Esta muchacha fue el resultado de esto. Entonces, ¿dónde estuviese esta joven si su madre hubiese tomado otro taxi? De eso trata el hecho de que

pequeños cambios van produciendo grandes cambios; no sólo un evento, sino eventos una y otra vez. A veces los estudiantes postulan a una universidad en la que no son aceptados y creen que su vida está destruida por esto; pero luego van a otra universidad donde la pasan muy bien y es perfecta para ellos. Lo que la teoría del caos nos dice es que a pesar de que debemos planear el futuro, también debemos estar preparados para cambiar nuestros planes. La gente más exitosa es aquella que es buena en el plan B.

**RBF:** Acerca de esto, ¿considera que estas propiedades características del caos están en cierta forma relacionadas con el concepto de serendipia?

**JY:** La serendipia tiene que ver con el plan B. Se tiene originalmente un plan A y de pronto aparece una oportunidad y uno toma esta oportunidad. La serendipia significa que uno toma la oportunidad y algo nuevo aparece. La persona que creo Amazon llamado Jeffrey Bezos señala que la mayoría de los arrepentimientos no son por haber hecho algo, sino por no haberlo hecho; los arrepentimientos son por omisión más que por comisión.

**RBF:** En lo que concierne a premios, de los que usted obtuvo importantes galardones, ¿Cuál es su opinión, por ejemplo, respecto a la medalla Fields?

**JY:** La medalla Fields identifica a personas extremadamente brillantes y en cierta forma es mejor que el premio Nobel en el sentido de que las personas en matemática, una vez cumplidos los 40, saben que no deben preocuparse sin importar lo inteligentes que sean. Así, pueden dejar de preocuparse por esto; en cambio, se ve a físicos preocupados por obtener el premio Nobel y de manera realista, en la mayoría de los casos, hay mucha gente que está muy cerca de ganar el premio Nobel o que lo merecen. Ahora mismo tienen el problema del experimento LIGO acerca de la gravedad y a quién darle el premio Nobel. Hay muchas situaciones en las cuales te preguntas en cómo te sentirías si estuvieses trabajando en un determinado campo y les dieran el premio Nobel a tres de tus colaboradores y considerases que tú fuiste el cuarto colaborador y no pueden dártelo pues sólo se lo otorga como máximo a tres personas y que por esa razón te dejaron fuera... tendrías un sentimiento terrible. Los medallistas Fields no tienen que preocupar por esto puesto que no se comparte el premio con colaboradores sino solo se otorga la medalla a gente brillante y cuando se llega a los 40 ya no es motivo de preocupación<sup>3</sup>.

**RBF:** Vamos a pasar ahora a algunas aspectos relacionadas con Bolivia y la física en general. Hablando de la especialización de un Departamento de Física, ¿por qué considera que el mismo debiese estar bastante especializado? y ¿cuál debiera ser el criterio para escoger las áreas principales en uno que

<sup>2</sup> Un libro de utilización de este software fue escrito por Nusse, Yorke & Kostelich (1994)

<sup>3</sup> En 2003, JY compartió la importante distinción “Japan Prize” con Benoît Mandelbrot por sus trabajos en caos y fractales respectivamente. Este premio está dotado de una suma de 50 Myenes que en dólares americanos representa aproximadamente la suma de 458 300. Detalles del premio otorgado a JY, los da Sanjuán (2003).

estuviese en Bolivia?

**JY:** A medida que la ciencia evoluciona, habrá en cierta forma más especialización; por lo que si hace 15 años se tenían grupos especializados en relatividad general, ahora se tienen grupos especializados en el experimento LIGO que es un subconjunto de la temática gravitacional. Pienso que una universidad como la de La Paz debiera hacer, es intentar ser la mejor universidad para que pueda formar y atraer a la mejor gente posible. Lo anterior no implica cubrir todas las áreas de la física; hay muchas universidades en Latinoamérica y un estudiante tal vez no pueda ir a una universidad específica, y mas bien, debiera escoger una universidad donde en lo posible haya un centro de excelencia. Por supuesto que puede ser difícil ir a otro país pero aún así, lo que atrae es la excelencia. Opino que la universidad debiera preguntarse: “¿en qué áreas puede ser fuerte y sobresalir?” y cada año, cuando contrate nuevo personal académico y de investigación, debiera cuestionarse “¿quién es la mejor persona que se pueda contratar?” Esa persona usualmente será alguien estrechamente relacionado a uno de los grupos y no significa un ex-estudiante de uno de los grupos sino un buen investigador que tenga una visión independiente pero que pueda colaborar con la gente de dicho grupo. se construye la mejor universidad teniendo a un personal que coadyuve en las principales tareas del Departamento. En general, los ex-estudiantes son las personas más interesadas en esto y los que más compenetrados están en los aspectos de enseñanza y trabajo con los estudiantes, lo que es un aspecto primordial puesto que sin eso, no tendría mucho sentido el tener una universidad ¿verdad? Lo más importante son los estudiantes.

**RBF:** ¿Cuáles son las formas de motivar en la gente joven el estudio de la Física en general y el de la dinámica no lineal en particular?

**JY:** Cuando yo estaba en colegio, podíamos ir a la tienda de la esquina y comprar libros de bolsillo acerca de ciencia, cosas que podían ser leídas por el público en general. Yo hice eso; por ejemplo, habían libros acerca de relatividad y cosmología y de muchos otros temas como ser la biología. Con esa experiencia, me enfoqué en la importancia de ofrecer libros que no sean caros para el público. Tengo un libro acerca de dinámica no lineal, y escogimos la editorial Springer que nos da los precios más baratos para el público, lo cual fue nuestro criterio. Ellos han mantenido el precio bastante razonable y tienen ediciones especiales para muchos países, probablemente también para Bolivia. Cuando se escribe un libro, no se gana mucho dinero, por lo que pensar en cuánto dinero se ganará es irrelevante. Se trata mas bien de a quiénes se va a influenciar, a quiénes se pueden inspirar. También hay revistas científicas de divulgación como “science news” que leí desde que estaba en colegio. Esta revista bi-semanal viene con artículos de todas las ciencias; algunos de ellos son interesantes y otros no. De todos modos, un estudiante debería tratar de averiguar tanto como pueda de todo tipo de áreas: física, astronomía, biología,

matemática, ... Conocer áreas, no leyendo textos muy complicados sino leyendo cosas fácilmente accesibles para estudiantes.

**RBF:** En referencia a publicaciones, ¿considera que es importante mantener la RBF a pesar de todas las dificultades en relación a la edición de esta?

**JY:** No sé nada acerca de la RBF.

**RBF:** Le puedo informar que es una revista que tiene unos 20 años de antigüedad y el principal objetivo de esta es publicar las investigaciones desarrolladas por personas de los diferentes Departamentos de Física en Bolivia. Al principio funcionó muy bien pero ahora hay un leve declive porque la gente que puede publicar prefiere hacerlo en una revista internacional. Por ello, la RBF se encuentra en una situación de carencia de artículos actualmente.

**JY:** Creo que algo interesante de hacer sería diseñar sitios web puesto que se constituyen en un recurso. Es un poco diferente pues por ejemplo, si se quisiese saber ¿qué tipo de artículos están publicando los investigadores de los departamentos de Física en Bolivia? entonces, se podría tener una lista de dichos artículos y quizás dónde se encuentran. Muchas veces, estos artículos están disponibles de manera gratuita en arXiv. También podrían tener en el sitio web artículos científicos interesantes para audiencias generales como que haya un artículo acerca de LIGO, explicando de qué se trata y qué se está intentando hacer; o que haya un artículo sobre CRISPR<sup>4</sup> que es un tema de biología en el cual se tiene un tremendo avance puesto que mediante esta herramienta, se puede insertar genes; o artículos de divulgación de inteligencia artificial en los cuales, la palabra “profundo” aparece una y otra vez, como “pensamiento profundo” y “azul profundo”<sup>5</sup>; significa que tienen inteligencia artificial, siendo conjuntos de redes interactuantes de muchas capas. Las denominadas redes complejas de multicapas o redes de redes se están volviendo tremendamente importantes. En realidad, este concepto cobró importancia en los últimos cinco años. Entonces, ¿dónde están los artículos de divulgación que un estudiante de colegio pueda leer? Quizás podría haber un recurso que los lleve a dichos artículos sin tener el artículo en el sitio web. Se podría preguntar a los visitantes del sitio: ¿cuál es su artículo favorito?, ¿cuál es el mejor artículo que leyó en el último año? Eso serían para las personas más técnicas. También, comentar libros interesantes como ser alguno que trate de cómo evolucionó la vida y cómo las células complejas evolucionaron de bacterias, habiendo dos tipos de bacterias y a las que se bacterias y arqueas, que en cierta forma se unieron y una se convirtió en una celda de potencia para la otra. Así de repente, la célula tendría una celda de potencia independiente y podía tener muchas copias de estas. Lo anterior marcó la diferencia, pero estas células complicadas

<sup>4</sup> Herramienta de edición genómica.

<sup>5</sup> Computadora jugadora de ajedrez que enfrentó y derrotó en 1997 al entonces campeón mundial de ajedrez Garry Kasparov tal como se señala en Wikipedia (2017a).



FIG. 2.— Péndulo doble en funcionamiento y que presenta una gran variedad de comportamientos, desde regulares hasta caóticos. El vídeo mostrando el movimiento de este péndulo en diferentes situaciones, se lo puede ver en YouTube (2016). Foto tomada en Dresde el sábado 8 de octubre de 2016 en el MPIPES.

también evolucionaron en muchas estructuras que tenían núcleo, cosa que las bacterias no tenían. Así, estas células tenían celdas de potencia, sexo, motilidad, paredes flexibles, etc. Todas estas cosas ocurren en casi todas las células complejas y no así en las bacterias. Entonces, es un libro fascinante. También es bueno para los físicos porque explica cómo la energía potencia a las células; ese es el tema central.

**RBF:** Para terminar esta entrevista, ¿podría dar un mensaje a la comunidad de físicos de Bolivia?

**JY:** Mi mensaje a los futuros físicos y a los actuales es que no piensen con demasiada anticipación, no intenten planear toda su vida no digan: “Voy a escribir

4 artículos acerca de algún tema”, sólo exploren el tema y encuentren las cosas más sorprendentes que puedan y estén listos para cambiar al plan B cuando se presente una oportunidad.

Al finalizar la entrevista, JY quiso hacer una demostración experimental del caos, utilizando para ello, un péndulo doble que se muestra en la Fig. 2 y cuyo vídeo está disponible en YouTube (2016).

### 3. EPÍLOGO

Como el lector habrá percibido durante la lectura de esta entrevista, la teoría del caos continúa siendo una de las pasiones de JY lo que le permite transmitir de manera didáctica los conceptos ligados a la misma. Es uno de los artífices de los conceptos desarrollados por el prestigioso grupo de caos de la universidad de Maryland descrito en Chaos UMD (2017), y entre los que también se cuentan a Edward Ott, Celso Grebogi, Rajarshi Roy entre otros y también a colaboradores dentro de su propia institución como Eugenia Kalnay así como externos, entre los que mencionamos a Jason Gallas<sup>6</sup>.

### AGRADECIMIENTOS

Agradezco al MPIPES por haber posibilitado mi participación en el taller “Multistability and Tippling: From Mathematics and Physics to Climate and Brain”. A Sergio Yañez Pagans (hoy en la Universidad de Arizona) por el excelente trabajo de edición del vídeo de la entrevista y por su permanente entusiasmo en las actividades científicas. A Fernando Poma Ajoruro por haber realizado parte de la transcripción y por la permanente colaboración que brinda al Grupo de Sistemas Complejos de la UMSA.

### Conflicto de intereses

El autor declara que no hay conflicto de intereses con respecto a la publicación de éste documento.

### REFERENCIAS

- Wikipedia contributors. “James A. Yorke.” Wikipedia, The Free Encyclopedia. Wikipedia, The Free Encyclopedia, Web. 22 Mayo 2017.
- Google Scholar. “James A. Yorke.”, Web. 19 Junio 2017.
- Ott E., Grebogi C. & Yorke J. A. (1990), *Physical Review Letters*, **64**(11), 1196.
- Li T.-Y. & Yorke J. A. (1975), *The American Mathematical Monthly*, **82**(10), 985.
- Aubin D. & Dahan Dalmedico A. (2002), *Historia Mathematica*, **29**, 273.
- Sauer T., Yorke J. A. & Casdagli M. (2002), *Journal of Statistical Physics*, **65**(3), 579.
- Gérard A., Yapu-Quispe L., Sakuma S., Ghezzi F. & Ramírez-Ávila G. M. (2016), *Chaos*, **26**(9), 093114.
- Madrid-Casado C. M. 2010, “Historia de la Teoría del Caos Contada para Escépticos: Cuestiones de Génesis y Estructura”. En *Encuentros multidisciplinares* de la Universidad Complutense de Madrid.
- Nusse H. E., Yorke J. A. & Kostelich E. J. (1994) *Dynamics: numerical explorations: accompanying computer program dynamics* (Nueva York: Springer).
- Sanjuán M. A. F. (2003), *Gaceta de la Real Sociedad Matemática Española*, **6**(1), 81.
- Wikipedia contributors. “Deep Blue (chess computer).” Wikipedia, The Free Encyclopedia. Wikipedia, The Free Encyclopedia, Web. 16 Julio 2017.
- Sitio WEB del Grupo de Caos de la Universidad de Maryland, <http://www.chaos.umd.edu/chaos.html>, Web. 27 Mayo 2017.
- James Yorke interview by Marcelo Ramirez, Bolivian physicist, <https://www.youtube.com/watch?v=cGNMyT6NNT0>, Web. 7 Diciembre 2016.

<sup>6</sup> Tanto Kalnay como Gallas están ligados a la RBF por ser o haber sido parte del Comité Editorial.



---

## REVISTA BOLIVIANA DE FÍSICA

### COMITÉ EDITORIAL

**Sociedad Boliviana de Física Instituto de Investigaciones Físicas**

**Carrera de Física**

**Dr. Diego Sanjinés Castedo**

Email: sanjines@fiumsa.edu.bo

**Lic. Alfonso Velarde Chávez**

Email: avelarde@fiumsa.edu.bo

**Dr. Flavio Ghezzi Moris**

Email: fghezzi@fiumsa.edu.bo

**Dr. Armando R. Ticona Bustillos**

Email: aticon@fiumsa.edu.bo

Casilla 8635, La Paz – Bolivia. Tel.: (591-2) 2792999, Fax: (591-2) 2792622

---

#### Misión

La Revista Boliviana de Física (RBF) es el órgano oficial de la Sociedad Boliviana de Física (SOBOFI) y se publica semestralmente en forma conjunta con el Instituto de Investigaciones Físicas y la Carrera de Física de la Universidad Mayor de San Andrés (IIF-UMSA).

La RBF busca difundir la producción científica de la comunidad de físicos y profesionales de ciencias afines, especialmente dentro de Iberoamérica.

#### Secciones

Los artículos, revisiones y colaboraciones se distribuyen en las siguientes secciones:

- A. **Artículos:** Son trabajos que presentan material nuevo y original. Para su publicación, deben ser revisados y aprobados por árbitros del Consejo Editorial. Los artículos deberán tener un resumen no mayor a 200 palabras y secciones de Introducción, Métodos y Procedimientos, Resultados y/o Discusión de datos, Conclusiones y Referencias.
- B. **Contribuciones y Revisiones:** Estos trabajos no presentan, necesariamente, material original sino que definen la posición del (de los) autor(es) sobre un determinado tópico de debate (en el caso de Contribuciones) o bien, son una revisión de temas conocidos en algún área de la física (en el caso de Revisiones). Las contribuciones deberán estar orientadas hacia la difusión de algún problema o debate interpretativo. Las revisiones estarán orientadas a exponer temas de trascendencia para el desarrollo de las ciencias relacionadas con la física, o exponer en forma didáctica algún tema que los autores encuentren que no ha sido tratado en forma adecuada en la literatura asequible en lengua castellana.
- C. **Memorias de la Reunión Anual de la SOBOFI u otras reuniones de física:** Esta sección reúne los resúmenes de los trabajos presentados durante la última Reunión Nacional Anual de la SOBOFI o de otras reuniones científicas importantes sobre física.
- D. **Enseñanza de la Física:** Esta sección está dedicada a artículos que tratan sobre problemas relacionados a la enseñanza de la física o a la promoción del estudio de la física entre los jóvenes estudiantes. Se incorporan regularmente en esta sección los exámenes de las Olimpiadas de Física y las Olimpiadas de Astronomía y Astrofísica. Las contribuciones a esta sección son seleccionadas exclusivamente por el Comité Editorial.
- E. **Historia:** Esta sección se dedica a la conmemoración de hechos importantes en la historia de la Física Boliviana e Iberoamericana. De igual manera, se orienta a la recopilación de publicaciones relacionadas a la física que, por su importancia histórica, merecen ser nuevamente publicadas.

#### Instrucciones para los autores

Los trabajos enviados para su publicación deberán estar escritos preferentemente en castellano. Trabajos escritos en inglés podrán ser aceptados por el Comité Editorial y, pasado el proceso de aceptación, serán traducidos al castellano para su publicación en la RBF.

Los autores deberán enviar sus trabajos preferentemente en los formatos  $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$ , *MS Word*, o *sólo texto* (con extensiones *.tex*, *.doc* y *.txt*, respectivamente), ya sea mediante una copia en dispositivo magnético o bien por correo electrónico. En este caso, deberán incluir una carátula donde se especifique el título del trabajo, los nombres de los autores, las direcciones (postal y/o electrónica) y el resumen del trabajo. Además, las figuras, tablas y notas de pie de página contenidas deberán estar indicadas en el texto, debidamente numeradas y referenciadas. Las figuras deberán tener una resolución razonable a fin de que puedan ser vistas con suficiente claridad por el lector.

Los artículos científicos serán revisados por el Comité Editorial y posteriormente por un par de árbitros anónimos quienes dan el veredicto sobre si el artículo es aceptado o no.

La comunicación de los autores con los árbitros se realiza únicamente a través del editor encargado del área.

Los trabajos y consultas sobre la RBF deberán enviarse a las direcciones del Comité Editorial indicadas arriba.

**Conflicto de interés:** Los autores que envíen artículos para su publicación en la RBF admiten que no tienen conflicto de interés en relación a los trabajos realizados y presentados.

## CONTENIDO

EDITORIAL

*Editor*

### A. ARTÍCULOS

SINCRONIZACIÓN DE NEURONAS MODELADAS POR MAPAS Y  
CARACTERIZADAS POR PERIODICIDADES

*Ignacio Calderon de la Barca & Gonzalo Marcelo Ramírez-Ávila*

MEDICIÓN Y ANÁLISIS DEL AEROSOL DE CARBONO NEGRO EN  
EL OBSERVATORIO DE HUANCAYO, PERÚ

*Luis Suarez, Christian Torres, Detlev Helmig & Jacques Hueber*

INTERACCIONES EFECTIVAS DE LARGO ALCANCE EN UNA  
RED EN LA APROXIMACIÓN SEMICLÁSICA

*Evaristo Mamani, M. Calcina-Nogales & Diego Sanjinés*

### D. ENSEÑANZA DE LA FÍSICA

ESTADO Y TENDENCIA DE LA EDUCACIÓN NUCLEAR EN EL  
ESTADO PLURINACIONAL DE BOLIVIA

*Bustos R. et al.*

### E. HISTORIA

EL CAOS Y SU TRASCENDENCIA: ENTREVISTA CON JAMES  
YORKE

*Gonzalo Marcelo Ramírez-Ávila*