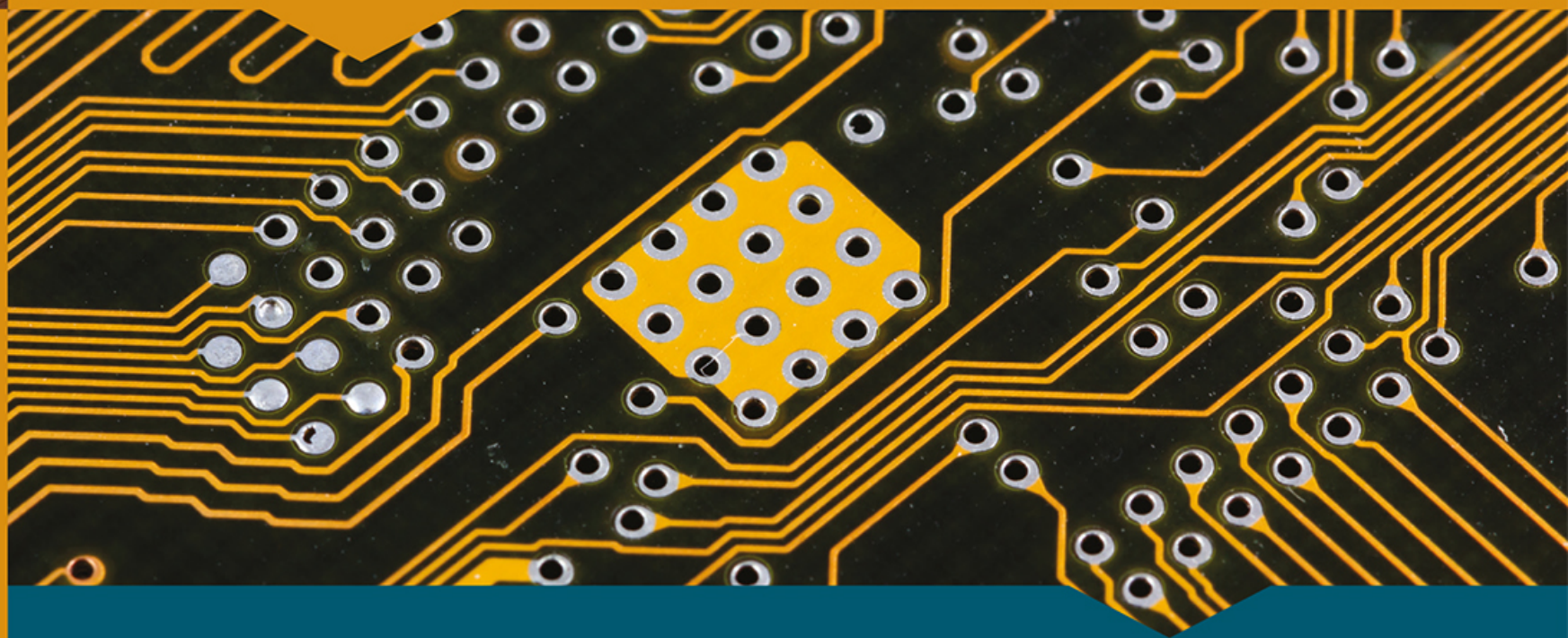


CASTILLO PÉREZ | DURÓN GONZÁLEZ (coords.)

La electrónica y las ciencias computacionales en los últimos veinte años



EDITORIAL
UNIVERSITARIA

Centro
Universitario
de Ciencias Exactas
e Ingenierías

Universidad
de Guadalajara

CASTILLO PÉREZ | DURÓN GONZÁLEZ (coords.)

La electrónica y las ciencias computacionales en los últimos veinte años

CASTILLO PÉREZ | DURÓN GONZÁLEZ (coords.)

La electrónica y las ciencias computacionales en los últimos veinte años



**EDITORIAL
UNIVERSITARIA**

**Centro
Universitario
de Ciencias Exactas
e Ingenierías**

**Universidad
de Guadalajara**



Itzcóatl Tonatihu Bravo Padilla
Rectoría General

Miguel Ángel Navarro Navarro
Vicerrectoría Ejecutiva

José Alfredo Peña Ramos
Secretaría General

Cesar Octavio Monzón
Rectoría del Centro Universitario
de Ciencias Exactas e Ingenierías

José Alberto Castellanos Gutiérrez
Rectoría del Centro Universitario
de Ciencias Económico Administrativas

Alonso Castillo Pérez
Dirección de la División de Electrónica
y Computación

José Antonio Ibarra Cervantes
Corporativo de Empresas Universitarias

Sayri Karp Mitastein
Dirección de la Editorial Universitaria

Primera edición electrónica, 2015

Coordinadores

Alonso Castillo Pérez
Mónica Judith Durón González

Textos

© Alonso Castillo Pérez, Edwin Christian Becerra Álvarez, María Susana Ruiz Palacios, Martín Javier Martínez Silva, Horacio Soto Ortiz, Stewart René Santos Arce, Alonso Castillo Ramírez, Aurora Espinoza Valdez, Guillermo Obregón Pulido, Alma Yolanda Alanís García, Edgar Nelson Sánchez Camperos, Nancy Arana Daniel, Luis Alberto Casillas Santillán, Alfredo Gutiérrez Hernández, Carlos Alberto López Franco, Eduardo Gerardo Mendizabal Ruiz, Emmanuel Nuño Ortega, Adriana Peña Pérez Negrón, Israel Román Godínez, Sulema Torres Ramos, Silvia Mora Lee, Paola Beatriz Castro García, José Alejandro Morales Valencia, Hugo Abraham Vélez Pérez, Juan Carlos Degollado Daza, Luz Marina Reyes Barrera, Rebeca del Carmen Romo Vázquez, Avenilde Romo Vázquez.

En la formación de este libro se utilizaron las familias tipográficas Minion Pro, diseñada por Robert Slimbach, y Ronnia, diseñada por Veronika Burian y José Scaglione.

La electrónica y las ciencias computacionales en los últimos veinte años / Alonso Castillo Pérez, Mónica Judith Durón González, coords. ; Edwin Christian Becerra Álvarez... [et al] ; prefacio Alonso Castillo Pérez. -- 1a ed. -- Guadalajara, Jalisco : Editorial Universitaria : Universidad de Guadalajara, 2015.
(Colección Monografías de la Academia)
Incluye referencias bibliográficas

ISBN 978-607-742-314-0

1. Procesamiento electrónico de datos
2. Electrónica 3. Computación I. Castillo Pérez, Alonso, coordinador y prefacio II. Durón González, Mónica Judith, coordinadora III. Becerra Álvarez, Edwin Christian IV. Serie

621.381 5 .E38 CDD
TK7867 .E38 LC

D.R. © 2015, Universidad de Guadalajara



**EDITORIAL
UN
IVERSITARIA**

Editorial Universitaria
José Bonifacio Andrada 2679
Colonia Lomas de Guevara
44657 Guadalajara, Jalisco

01 800 834 54276
www.editorial.udg.mx

ISBN 978-607-742-314-0

Octubre de 2015

Hecho en México
Made in Mexico



Este trabajo está autorizado bajo la licencia Creative Commons Atribución-NoComercialSinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND) lo que significa que el texto puede ser compartido y redistribuido, siempre que el crédito sea otorgado al autor, pero no puede ser mezclado, transformado, construir sobre él ni utilizado con propósitos comerciales. Para más detalles consúltase <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>

Todos los derechos de autor y conexos de este libro, así como de cualquiera de sus contenidos, se encuentran reservados y pertenecen a la Universidad de Guadalajara. Por lo que se prohíbe la reproducción, el registro o la transmisión parcial o total de esta obra por cualquier sistema de recuperación de información, sea mecánico, fotoquímico, electrónico, magnético, electroóptico, por fotocopia o cualquier otro, existente o por existir, sin el permiso por escrito del titular de los derechos correspondientes.

Queda prohibido cualquier uso, reproducción, extracción, recopilación, procesamiento, transformación y/o explotación, sea total o parcial, sea en el pasado, en el presente o en el futuro, con fines de entrenamiento de cualquier clase de inteligencia artificial, minería de datos y texto y, en general, cualquier fin de desarrollo o comercialización de sistemas, herramientas o tecnologías de inteligencia artificial, incluyendo pero no limitando a la generación de obras derivadas o contenidos basados total o parcialmente en este libro y/o en alguna de sus partes. Cualquier acto de los aquí descritos o cualquier otro similar, está sujeto a la celebración de una licencia. Realizar alguna de esas conductas sin autorización puede resultar en el ejercicio de acciones jurídicas.

Índice

8 Prefacio

ALONSO CASTILLO PÉREZ

13 Capítulo I. Electrónica

14 Los circuitos integrados en los últimos veinte años

EDWIN CHRISTIAN BECERRA ÁLVAREZ

24 Convergencia en los sistemas de comunicación en los últimos veinte años

MARÍA SUSANA RUIZ PALACIOS

MARTÍN JAVIER MARTÍNEZ SILVA

35 Veinte años de comunicaciones fotónicas: retos y oportunidades actuales

HORACIO SOTO ORTIZ

51 Unificación de los métodos de regularización y análisis variacional para procesamiento reconstructivo de señales e imágenes mediante aproximación basada en computación neuronal adaptiva robusta

STEWART RENÉ SANTOS ARCE

73 Capítulo II. Matemáticas

74 Los últimos veinte años en la teoría de grupos finitos

ALONSO CASTILLO RAMÍREZ

86 **Aplicaciones de grafos**

AURORA ESPINOZA VALDEZ

94 **El estudio del caos en los últimos veinte años**

GUILLERMO OBREGÓN PULIDO

103 Capítulo III. Ciencias de la computación

104 **Veinte años de redes neuronales artificiales
en control inteligente**

ALMA YOLANDA ALANÍS GARCÍA

EDGAR NELSON SÁNCHEZ CAMPEROS

117 **Los últimos veinte años en el reconocimiento de patrones
visuales con redes neuronales**

NANCY ARANA DANIEL

127 **Sistemas basados en conocimiento**

LUIS ALBERTO CASILLAS SANTILLÁN

139 **Internet de las cosas en los últimos veinte años**

ALFREDO GUTIÉRREZ HERNÁNDEZ

149 **La robótica en los últimos veinte años**

CARLOS ALBERTO LÓPEZ FRANCO

157 **La visión computacional en los últimos veinte años**

EDUARDO GERARDO MENDIZABAL RUIZ

167 **De la telerrobótica a la sincronización de redes de robots
en los últimos veinte años**

EMMANUEL NUÑO ORTEGA

178 **La realidad virtual en los últimos veinte años**

ADRIANA PEÑA PÉREZ NEGRÓN

188 La bioinformática en los últimos veinte años

ISRAEL ROMÁN GODÍNEZ

201 Los últimos veinte años en el procesamiento
de lenguaje natural

SULEMA TORRES RAMOS

213 Capítulo IV. Bioingeniería

214 La terapia celular en los últimos veinte años

SILVIA MORA LEE

PAOLA BEATRIZ CASTRO GARCÍA

232 La biología sintética en los últimos veinte años

JOSÉ ALEJANDRO MORALES VALENCIA

241 El análisis del movimiento en los últimos veinte años

HUGO ABRAHAM VÉLEZ PÉREZ

257 Epílogo

258 La danza de dos agujeros negros. El problema de dos cuerpos
en relatividad general

JUAN CARLOS DEGOLLADO DAZA

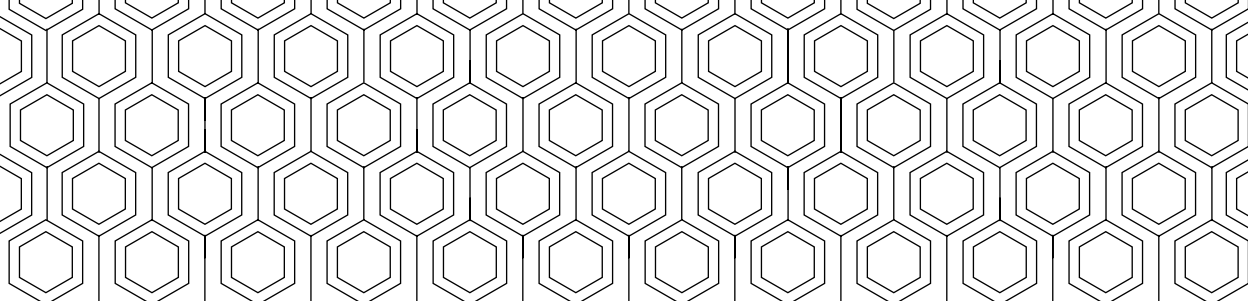
263 ¿Existe la energía oscura?

LUZ MARINA REYES BARRERA

268 La mujer en la ingeniería durante los últimos veinte años

REBECA DEL CARMEN ROMO VÁZQUEZ

AVENILDE ROMO VÁZQUEZ



Prefacio

ALONSO CASTILLO PÉREZ

Durante la cuarta edición del Festival Científico y Cultural de la División de Electrónica y Computación (Divec Fest 2014) se celebró el vigésimo aniversario de la Red Universidad de Guadalajara, que dio origen al Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías y a dicha División.

La celebración consistió en hacer un recuento histórico de lo que ha ocurrido en los últimos veinte años en los campos de la electrónica y la computación. Se intentó recabar información que facilitara la comparación entre los avances científicos y tecnológicos relacionados con el quehacer de la División, y las adecuaciones que permiten al sistema educativo —presumiblemente más conservador y falto de flexibilidad— enfrentar la vorágine del conocimiento. Este proyecto estuvo limitado por los temas que los especialistas de alto nivel que colaboran con la División pudieron desarrollar, de tal forma que algunos campos importantes no fueron tratados y en cambio se presentaron otros en los que sólo había variaciones sutiles.

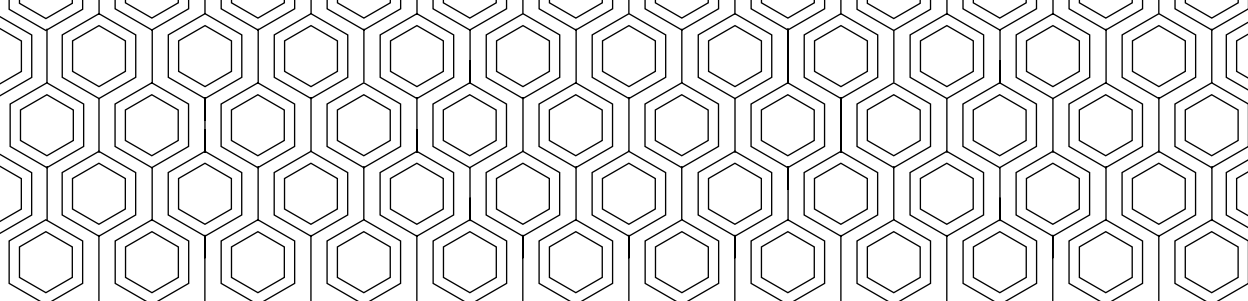
Es importante mencionar que, en su creación, la Red Universitaria depositó la responsabilidad académica en los departamentos y suprimió las facultades. La División de Electrónica y Computación nació con el Departamento de Ciencias Computacionales, dependiente de la Facultad de Informática y Computación (de la que aún no egresaba ni la primera generación), y el Departamento de Electrónica, conformado por el programa educativo

de Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica, establecido en 1966 en la Facultad de Ingeniería. No obstante las diferencias históricas entre sus orígenes, los dos departamentos nacieron carentes de investigación, la cual se ha desarrollado, de manera importante, en la nueva estructura.

La celebración representó una oportunidad, a veinte años de la creación de la Red, para dejar constancia de la visión de los investigadores de la División en estas disciplinas.

Esta aventura, a la que respondieron con calidez un grupo de académicos, permitió suprimir las “numeralias”, que en los años recientes se acostumbra en los informes, y en su lugar dar cuenta de los avances académicos de la División mediante las memorias que reúne este texto conmemorativo.

Con la finalidad de hacer extensiva dicha celebración, se ha decidido hacer esta edición especial de aniversario para que esté al alcance de los interesados en ciencia y tecnología. En el futuro, nos gustaría tener nuevas aportaciones sobre estos mismos temas, así como de nuestras preocupaciones centrales: ¿qué tan eficaz es el sistema de educación superior para la formación de ingenieros y las nuevas tecnologías? ¿Qué brecha existe entre los avances de la electrónica y la computación, y la democracia? ¿Cuáles son las consecuencias actuales y futuras de esta brecha?



Preface

ALONSO CASTILLO PÉREZ

In the framework of the fourth edition of the Scientific and Cultural Festival of the Unit of Computer Sciences and Electronics (Divec Fest 2014), the twentieth anniversary of the Net of the University of Guadalajara was celebrated. This Net gave birth to the University Center of Exact Sciences and Engineering, and to this Unit.

As a part of the celebration, a brief historical review of the events that have happened in the last twenty years in the fields of the electronics and the computer sciences was made. This was an attempt to collect information to facilitate the comparison between the scientific and technological advances related to the fields of the Unit, and the adjustments that enable the educative system to face the whirlwind of knowledge. This project was limited by the topics that the high level specialists that collaborate with the Unit were able to develop. As a consequence, some topics were not covered, and some of the ones presented had only smooth variations.

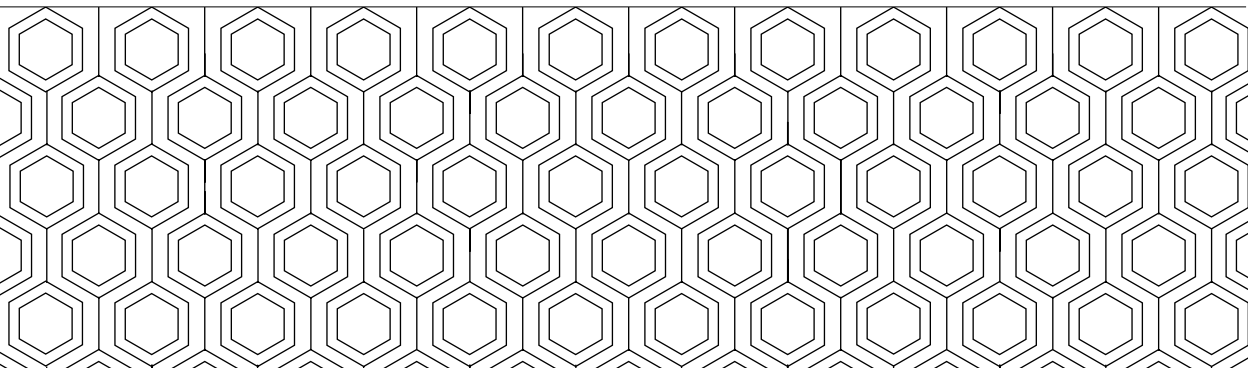
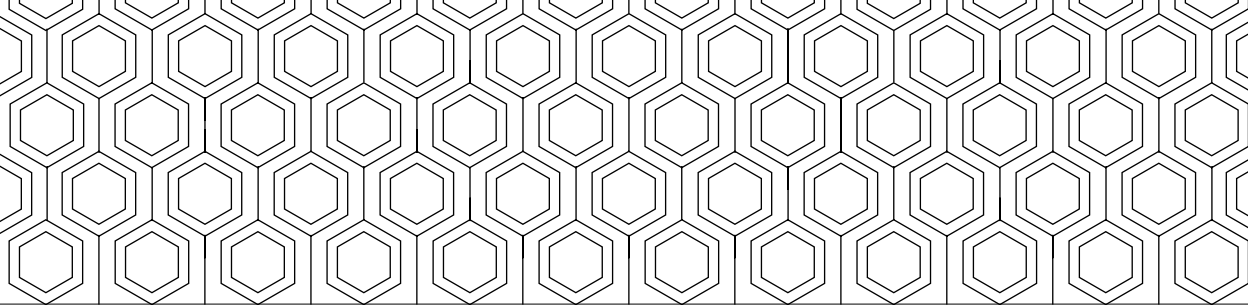
It is important to mention that since the moment the Net was created, the academic responsibility was given to the Departments, and the Faculties disappeared. The Unit of Computer Sciences and Electronics was born with the Department of Computer Sciences, which initiated in the Faculty of Informatics and Computer Sciences (where not even the first generation had graduated), and the Department of Electronics, operating the bachelor's

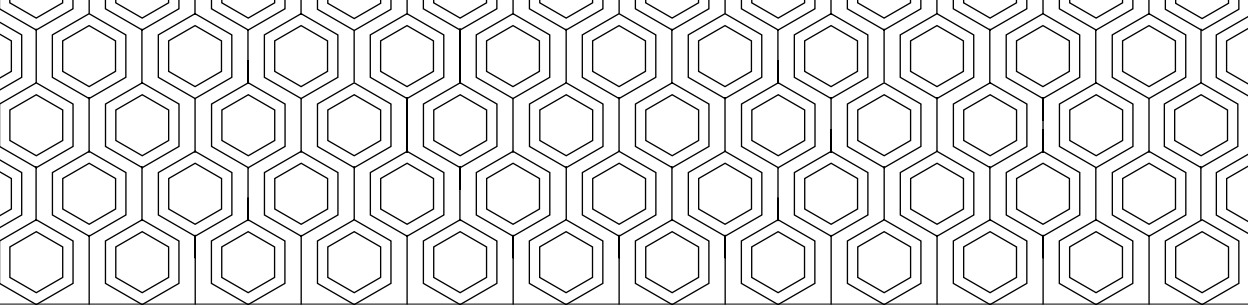
program in Communications and Electronics Engineering, established in 1966 in the Faculty of Engineering. In spite of the fact that there were historical differences between the origins of these Departments, both of them were born with a lack of research, which has been actively abated in the new structure.

This celebration offered an opportunity, after twenty years of the creation of the Net, to exhibit the vision of the researchers of the Unit in these disciplines.

This adventure, which was warmly accepted by a group of academics, permitted to suppress the “statistics” that are commonly used in political reports, and instead show the academic advances of the Unit through the memoirs gathered in this commemorative text.

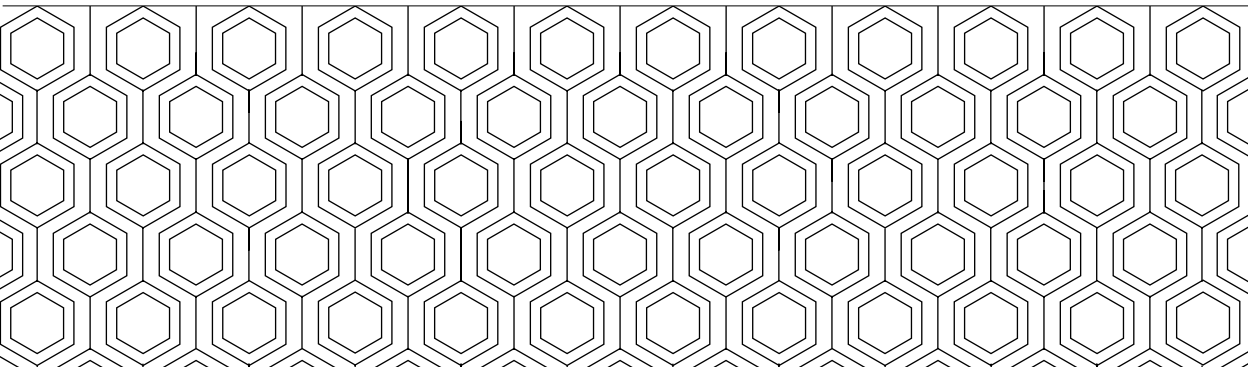
In order to make this celebration extensive, it was decided to publish this especial anniversary edition, so it is available to everyone interested in science and technology. In the future, we would like to have new contributions not only to these topics, but also to our central concerns: Is our high education system efficient in the formation of engineers for new technologies? What is the gap between the advances of electronics and computer sciences, and democracy? What are the current and future consequences of this gap?

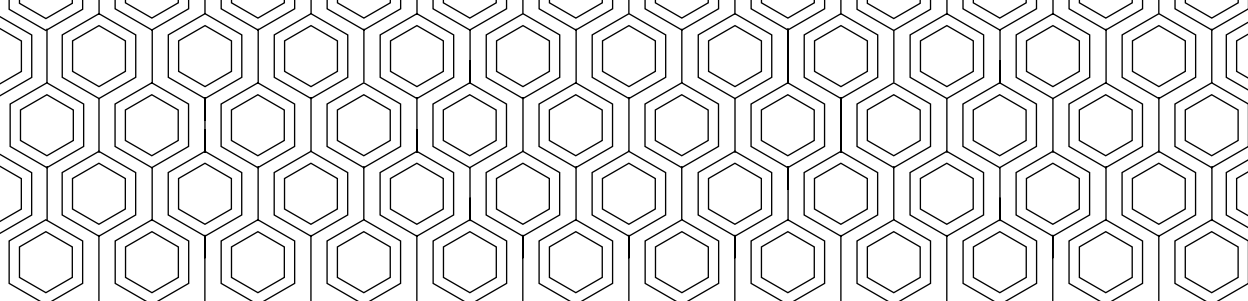




Capítulo I.

Electrónica





Los circuitos integrados en los últimos veinte años

EDWIN CHRISTIAN BECERRA ÁLVAREZ

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA,
CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍAS,
UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

Introducción

Los circuitos integrados (CI), también conocidos como chips o microchips, son pequeños componentes que contienen en su interior material semiconductor, el cual forma un circuito que es capaz de realizar diferentes funciones, tales como: procesamiento de señales, transmisión y recepción de señales, regulación de voltaje, entre otras [1-3]. Y precisamente porque es posible hacer que un CI haga prácticamente cualquier función, es de gran interés su estudio y diseño. También por eso en las dos últimas décadas ha crecido la demanda de dichos circuitos.

Por otro lado, la tecnología CMOS se utiliza mucho para realizar CI, lo cual permite obtener soluciones de bajo costo y alto desempeño y hace que un producto se posicione en la cima del mercado [4]. Además, es importante señalar que la longitud del canal para los transistores MOS se sigue reduciendo día a día, eso hará posible que la tecnología CMOS siga siendo utilizada para diseñar CI probablemente por las siguientes dos décadas[5].

Por lo tanto, para comprender la evolución de los CI en las últimas dos décadas, se debe conocer cómo la tecnología CMOS ha cambiado con el paso del tiempo, ya que cuando se mejora la tecnología CMOS se crean CI más complejos, lo cual trae consigo nuevos retos que resolver. Por ejemplo, la reducción de la longitud del canal en los transistores MOS tiene como consecuencia que el ruido de sustrato en un chip afecte en mayor medida los circuitos que operan sobre dicho sustrato [6].

Por tal razón se crea un compromiso entre utilizar una tecnología CMOS robusta que ofrece un menor nivel de ruido en el sustrato y una tecnología CMOS de última generación, en la que el nivel de ruido afecta a los circuitos de forma considerable, pero también se tiene un mayor nivel de integración y, por tanto, el costo puede disminuir. Finalmente, para comprender mejor dicha evolución de los CI es necesario adentrarse en el diseño microelectrónico, el cual será analizado a continuación.

Diseño microelectrónico

El diseño microelectrónico ha ido tomando más importancia con el paso del tiempo debido a que se sigue incrementando el nivel de integración en los CI, es decir, se puede integrar mayor número de dispositivos electrónicos dentro de la misma área.

Por otro lado, esta tendencia permite incrementar la complejidad de los sistemas integrados o SoC (del inglés, *System on Chip*), ello se traduce en una mejora de las prestaciones que pueden ofrecer dichos sistemas.

Sin embargo, para diseñar SoC se utilizan diferentes elementos de circuitos, siendo un gran reto la integración de inductores y varactores dentro de un CI. A continuación se revisará qué son los inductores y los varactores.

Inductores

Los inductores son algunos de los elementos más críticos en el diseño de circuitos. Pueden ser utilizados en varios bloques de RF, como son el LNA (del inglés, *Low Noise Amplifier*), el VCO (del inglés, *Voltage Controlled Oscillator*) y los filtros tanto activos como pasivos [7-9]. Por otro lado, en algunas topologías de LNA se emplean junto con condensadores para

acoplar el amplificador en la frecuencia de interés o como parte de una impedancia de carga.

En la figura 1 se muestra el plano de un inductor de la librería de celdas RF para una tecnología CMOS de 90 nm de ST [10]. Este tipo de inductores están formados por espiras en el metal siete. Sin embargo, cuentan con entrada y salida desde el metal cinco hasta el metal siete. Por otro lado, tienen implementado un escudo de protección hecho con polisilicio y conectado a tierra.

Es importante señalar que hace dos décadas no era posible pensar en un inductor de tales características, debido en parte a la limitación en el número de niveles de metalización (aproximadamente tres niveles de metalización), y también a las limitaciones tecnológicas para producir metales [11].

El inductor que se muestra en la figura 1 se dimensiona utilizando tres variables: el diámetro (dl), que puede tomar valores desde 40 μm hasta 140 μm ; el número de vueltas (ntl), cuyo rango va desde 2.5 hasta 6.5, y finalmente el ancho (wl) del metal, que acepta valores desde 10 μm hasta 11.99 μm . En este punto es importante notar que a pesar de ser una tecnología nanométrica los inductores presentan dimensiones mayores que los transistores, y debido a que dichos elementos ocupan la mayor parte del área en un circuito, puede no existir mucha diferencia en el uso del área entre diferentes tecnologías para una misma topología. Sin embargo, en una tecnología de hace dos décadas se tienen inductores cuya área puede llegar a los 4 mm^2 , a diferencia del inductor mostrado en la figura 1, que tiene un área menor a 1 mm^2 [11]. Por otro lado, los elementos parásitos asociados a los inductores pueden degradar su funcionamiento de forma significativa. Todo esto implica la necesidad de modelar dichos elementos, de esa manera se puede ver que el inductor está formado por diferentes capas de material (metales en la parte superior y polisilicio en la parte inferior). Dichas capas crean condensadores parásitos hacia sustrato, además de la capacidad presente entre las espiras.

Una figura que se emplea comúnmente para caracterizar qué tan parecido es un inductor real a un inductor ideal es el llamado factor de calidad. Ese factor se define a partir de la impedancia del inductor [12]. Por lo cual el factor de calidad del inductor está dado por [3]

$$Q_{il} = \frac{\text{Im}[Z_{il}]}{\text{Re}[Z_{il}]} \approx \frac{t_1(t_1+t_3) + C_{o1}^2 R_{b1}(R_{b1}t_1(t_1+t_3) + t_4 z_1) \omega^2}{C_{o1} t_4 z_1 \omega} \quad (1)$$

donde

$$\begin{aligned} t1 &= 1 + sCs1z1 \\ t2 &= 1 + sCo3Rb3 \\ t3 &= sCo3 (Rb3t1 + z1) \end{aligned} \quad (2)$$

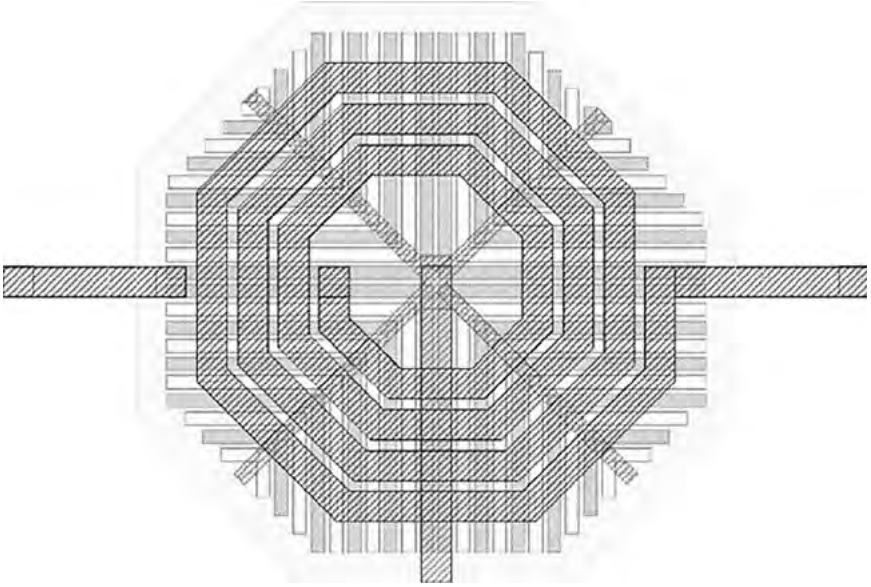


Figura 1. Plano de un inductor de librería para la tecnología CMOS 90 nm [10].

$$\begin{aligned} t4 &= 2 + 2sCs1z1 + sCo3 (2Rb3t1 + z1) \\ z1 &= Rs1 + sLs1 \end{aligned} \quad (3)$$

siendo los condensadores C_{b1} , C_{b2} y C_{b3} los que representan capacidades parásitas del inductor hacia el sustrato; R_{b1} , R_{b2} y R_{b3} son resistencias parásitas hacia el sustrato; R_{s1} y R_{s2} representan la resistencia parásita de las líneas de metal que forman el inductor; L_{s1} y L_{s2} son el valor del inductor, y C_{s1} y C_{s2} representan las capacidades de acoplamiento entre las espiras del inductor.

La ecuación (1) muestra que un inductor integrado es en realidad un circuito RLC, el cual puede ser muy diferente de los inductores discretos, ya que si no se tiene cuidado dicho elemento tendrá un efecto capacitivo o resistivo dominante, es decir, se comportará como un capacitor o un resis-

tor, respectivamente. Por lo tanto, en la actualidad el problema de integrar inductores se basa en obtener un factor de calidad adecuado (comúnmente menor que 20), a diferencia de los CI de hace más de una década, cuando se utilizaban inductores discretos principalmente debido a las limitaciones tecnológicas al integrar dichos elementos.

Otro de los elementos críticos en el diseño de los CI son los varactores, para lograr la integración de dichos elementos se han propuesto diferentes metodologías, una de ellas son los varactores MOS, de los que se hablará a continuación.

Varactores MOS

Los varactores son elementos que idealmente se comportan como un condensador variable, pero en la realidad dicha variación de capacidad está limitada por las características del dispositivo. Esta propiedad permite tener una alternativa para diseñar circuitos que requieren de un capacitor variable. Sin embargo, se necesita contar con un modelo adecuado de los mismos ya que son dispositivos no lineales.

Por ejemplo, el varactor MOS de la tecnología CMOS 90 nm soporta una tensión de control desde -3 V hasta 3 V. Sin embargo, la tensión máxima de alimentación para los transistores estándar es de 1.2 V, lo que implica que dicha tensión de control puede superar la alimentación de los transistores. Por otro lado, su geometría se basa en tres variables: wv que define el ancho —admite valores desde $3\ \mu\text{m}$ hasta $40\ \mu\text{m}$ —, lv el largo —con una longitud mínima de $0.35\ \mu\text{m}$ y máxima de $2\ \mu\text{m}$ — y por último nfv que define el número de varactores unitarios conectados en paralelo y toma valores entre 1 y 50.

Históricamente, los primeros varactores que se utilizaron en el diseño de CI (hace aproximadamente dos décadas) se basaron en el uso de diodos polarizados de forma inversa, la cual permite obtener una variación de la capacitancia del diodo en función del voltaje de polarización [13]. Sin embargo, las limitaciones de dichos dispositivos son mucho mayores que las que ofrecen los varactores en la actualidad, como es el caso del varactor MOS.

Por otro lado, actualmente los varactores MOS presentan diversas ventajas —como mayor rango de variación de capacidad—, al mismo tiempo que traen consigo nuevos retos —elementos parásitos que pueden limitar su implementación en ciertas aplicaciones [14].

En base al modelo de pequeña señal para el varactor MOS, la variación de la capacidad del varactor se puede aproximar por [15]

$$C_c \approx \frac{f_d}{1 + e^{-f_r}} + \frac{f_a}{1 + e^{f_r}} \quad (4)$$

siendo

$$\begin{aligned} f_a &\approx \frac{C_m}{1 + e^{2(V_c + V_f) \left(\frac{C_m - C_{fb}}{C_{fb}} \right)}} \\ f_d &\approx \frac{C_{fb}}{\left[1 + 0.1 \ln(1 + e^{f_r}) \right]^{0.3}} \\ f_r &\approx 10(V_c + V_f) \end{aligned} \quad (5)$$

donde ϵ es la permitividad del silicio, C_m es la capacidad máxima del varactor, C_{fb} es la variación en capacidad debida a las difusiones laterales, V_c es la tensión de control del varactor y V_f es la tensión de bandas planas [15].

Por otro lado, de forma similar al inductor, el factor de calidad Q_{iv} del varactor viene dado por [14]

$$Q_{iv} = \frac{\text{Im}[Z_{iv}]}{\text{Re}[Z_{iv}]} \approx \frac{(C_c + C_p)(R_{p1} + R_{p2} + R_w)\omega}{(C_c + C_p)(L_1 + L_2)\omega^2 - 1} \quad (6)$$

donde L_1 y L_2 son inductancias parásitas debidas a las líneas de conexión y R_{p1} y R_{p2} son las resistencias parásitas asociadas a dichas líneas de conexión, C_p es un condensador parásito que forma la capacidad intrínseca del varactor, C_c representa un condensador variable controlado por la diferencia de tensión en éste y finalmente R_w es la resistencia del pozo N (NW, del inglés N-Well), cuyo valor depende de la caída de tensión en C_c [15].

Como se observa en las ecuaciones (4) y (6), la complejidad de un varactor MOS se puede aproximar a la complejidad de un transistor MOS, sin embargo, a pesar de dicha complejidad las ventajas de los varactores MOS

son mucho mayores en comparación con los varactores que se utilizaron en un inicio para el diseño de CI hace dos décadas.

Además de los elementos analizados anteriormente que se usan para diseñar un CI, se cuenta también con elementos como los transistores MOS, que se analizan enseguida.

Transistores MOS

Los transistores MOS se han escalado desde hace más de dos décadas con el objetivo de obtener mayor velocidad, bajo consumo, mayor grado de integración y, sobre todo, un bajo costo. Todo esto ha dado como resultado que se tenga actualmente una longitud de compuerta menor a 35 nm [16] y dichos dispositivos semiconductores se encuentren en el régimen de los nanómetros, a diferencia de hace dos décadas, cuando se tenían dispositivos en el orden de micrómetros.

Por otro lado, de acuerdo al ITRS (del inglés *International Technology Roadmap for Semiconductors*), en 1994 se tuvo una longitud de canal de 4 μm , lo cual implica un voltaje de alimentación $V_{DD} \approx 3 \text{ V}$, como se muestra en la figura 2; sin embargo, en 2014 se tiene una longitud de canal de 20 nm, y de acuerdo a la figura 2 el voltaje de alimentación es $V_{DD} < 1 \text{ V}$.

Es importante señalar que esa tendencia muestra que conforme se decrementa la longitud del canal en los transistores MOS, se pueden manejar menores voltajes de alimentación, como se muestra en la figura 2. Por lo cual, si en dos décadas se logró una reducción en V_{DD} mayor a 80%, y si dicha tendencia continúa aproximadamente igual, en un futuro se pueden esperar dispositivos menores a 10 nm y voltajes de alimentación muy bajos.

Los transistores MOS son una pieza fundamental para los CI, ya que se pueden ver como los bloques de construcción base para diseñar diferentes funciones, y debido a que se tienen transistores con longitudes de compuerta en el orden de nanómetros, también se tienen efectos de canal corto,^[15] los cuales dificultan en gran medida el trabajo de diseño. Por otro lado, dichos efectos hacen que los modelos matemáticos y las metodologías de diseño que existentes anteriormente tengan que evolucionar de forma que se consideren efectos de canal corto para que sigan siendo válidas.

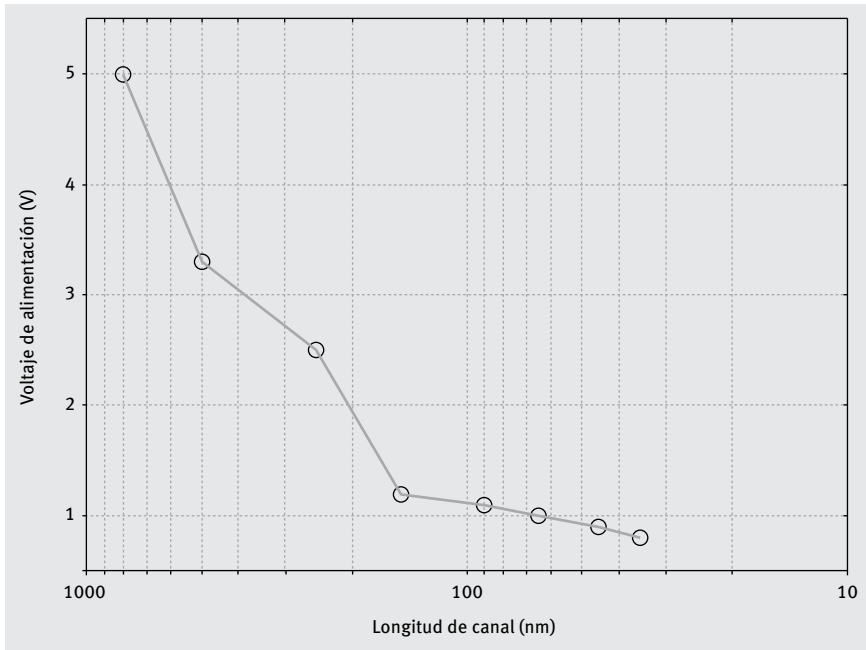


Figura 2. Escalado en los transistores CMOS.

Conclusiones

La evolución de los CI durante los últimos veinte años ha sido enorme, en este periodo elementos como los inductores, varactores y transistores MOS han sufrido enormes cambios.

Por otro lado, el transistor MOS es el dispositivo principal para los CI y es el responsable de la evolución de éstos. Cuando se decrementa la longitud de canal en un transistor MOS, también se hace posible reducir el consumo de potencia debido a que se puede operar con un voltaje menor de alimentación, se puede incrementar la frecuencia de operación obteniendo dispositivos más rápidos, y sobre todo el punto más importante es que los costos de producción se pueden reducir considerablemente, lo cual hace atractivo el hecho de incrementar el grado de integración.

En el caso de los inductores, se ha pasado de utilizar inductores discretos a integrarlos en el mismo chip, sin embargo, este proceso de integración incrementa la complejidad para diseñar un inductor integrado, ya que su factor de calidad llega a ser bajo —menor a 20—. Sin embargo, esta integración permite crear SoCs, lo cual antes era sólo un sueño.

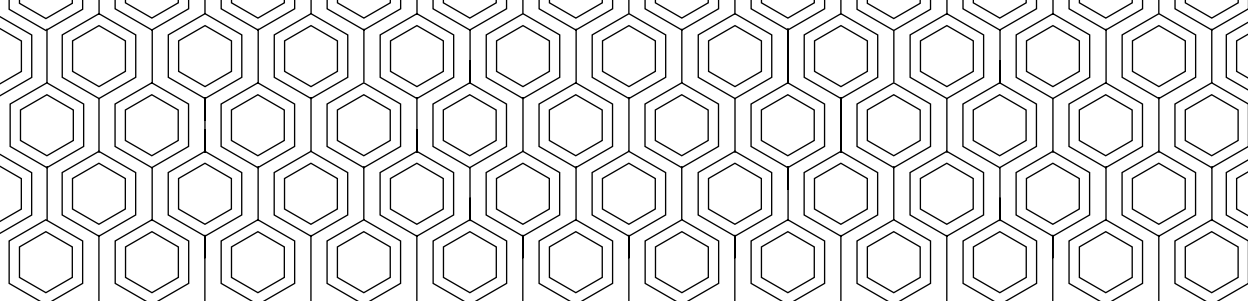
En los varactores sucede algo similar a lo de los inductores, al inicio su implementación era a través de diodos polarizados en inverso, lo cual impone grandes limitaciones. Sin embargo, actualmente se cuenta con varactores MOS que pueden ofrecer un mayor rango de variación de capacitancia, así como mayor rango en el voltaje de control.

Finalmente, resta decir que gracias al avance en los CI, actualmente contamos con dispositivos de menor costo y mayores prestaciones, como es el caso de los teléfonos inteligentes, que son algo común en estos días y que hace dos décadas eran sólo un sueño.

Referencias

- [1] D. Leenaerts *et al.*, *Circuit Design for RF Transceivers*. Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [2] E. C. Becerra-Alvarez, F. Sandoval-Ibarra, and J. M. de la Rosa, “Flexible nanometer CMOS low-noise amplifiers for the next-generation software defined-radio mobile systems”, in *Integrated Circuits for Analog Signal Processing*, E. Tielo-Cuautle, Ed., USA: Springer, 2013, pp. 145-170.
- [3] E. C. Becerra-Alvarez, *Diseño de amplificadores de bajo ruido reconfigurables y multiestándar*. Germany: Publicia, 2014.
- [4] B. Razavi, *Design of Analog CMOS Integrated Circuits*. New York: McGraw-Hill, 2001.
- [5] T. H. Lee, *The Design of CMOS Radio-Frequency Integrated Circuits*, 2nd. ed. Cambridge University Press, 2004.
- [6] M. Badaroglu, P. Wambacq, G. V. der Plas, S. Donnay, G. G. Gielen and H. J. D. Man, “Evolution of substrate noise generation mechanisms with CMOS technology scaling,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*, vol. 53, pp. 296-305, February 2006.

- [7] E. C. Becerra-Alvarez, F. Sandoval-Ibarra y J. M. de la Rosa, "Design of a 1-V 90-nm CMOS adaptive LNA for multi-standard wireless receivers," *Revista Mexicana de Física*, vol. 54, pp. 322- 328, August 2008.
- [8] J. M. de la Rosa, R. Castro-López, A. Morgado, E. C. Becerra-Alvarez, R. del Río, F. V. Fernández, and B. Pérez-Verdú, "Adaptive CMOS analog circuits for 4G mobile terminals—Review and state-of-the-art survey," *Microelectronics Journal*, vol. 40, pp. 156-176, January 2009.
- [9] E. C. Becerra-Alvarez, F. Sandoval-Ibarra, and J. M. de la Rosa, "Design of an adaptive LNA for hand-held devices in a 1-V 90-nm standard RF CMOS technology: from circuit analysis to layout," *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 7, p. 9, April 2009.
- [10] S. Microelectronics, *CMOS090GP Design Rule Manual 90 nm General Purpose Bulk CMOS Process*, noviembre de 2005.
- [11] C. H. Ahn and M. Allen, "A new toroidal-meander type integrated inductor with a multilevel meander magnetic core," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 30, pp. 73-79, January 1994.
- [12] P. Vizmuller, *RF Design Guide*. Artech House, 1995.
- [13] M. Soyuer, K. A. Jenkins, J. N. Burghartz, and M. D. Hulvey, "A 3 V 4 GHz nMOS voltage-controlled oscillator with integrated resonator," in *Proceedings of the 1996 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)*, pp. 394-395, February 1996.
- [14] T. Ytterdal *et al.*, *Devide Modeling for Analog and RF CMOS Circuit Design*. John Wiley & Sons, 2003.
- [15] T. H. Morshed, *BSIM4.6.4 MOSFET Model*. 2009.
- [16] T. Hiramoto, "Transistor evolution for CMOS extension and future information processing technologies," pp. 3-6, June 2009.



Convergencia en los sistemas de comunicación en los últimos veinte años

MARÍA SUSANA RUIZ PALACIOS

MARTÍN JAVIER MARTÍNEZ SILVA

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA,

CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍAS,

UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

Los inicios de las radiocomunicaciones

Cuando se habla de sistemas de comunicación, de manera intuitiva generalmente nos imaginamos que se relacionan con personas. En la historia de la humanidad, la necesidad de comunicar ideas, pensamientos, emociones, sentimientos ha estado presente, pero sobre todo la forma de cómo se hace ha definido las características sociales y culturales de un grupo o una civilización.

En las últimas dos décadas, los sistemas de comunicación se han integrado en nuevos sistemas. Las tecnologías han permitido la evolución de repositorios o almacenamientos de información, entre otros dispositivos. Todo ello, con la finalidad de proveer nuevas herramienta de comunicación. Hoy en día, la forma de comunicarnos también define algunos rasgos, pero,

a diferencia de otras épocas, los recursos son más, tanto en número como en diversidad.

El cuanto a la convergencia, ésta se entiende como la unión de herramientas que tienen como propósito permitir más conectividad entre los individuos. Para hablar del proceso de convergencia en los sistemas de comunicaciones, es necesario hacer un repaso de las tecnologías existentes en diferentes épocas (véase la tabla 1). En términos generales, se puede decir que la industria de las telecomunicaciones ha manifestado cambios drásticos tanto tecnológicos como de mercadotecnia cada diez años en promedio. Por otra parte, es necesario comprender las relaciones existentes entre los diferentes actores de la industria de las telecomunicaciones y las políticas de regulación, ellas posibilitan que la convergencia sea un hecho. Además de que la convergencia, con diferentes rasgos, ha permitido que grupos sociales se manifiesten, y ha propiciado una mayor equidad en el acceso a la información, entre otros beneficios.

Como se puede observar en la tabla 1, el desarrollo de los primeros dispositivos y sistemas de comunicación obedecieron al progreso en los conocimientos de circuitos eléctricos, la ecuación de onda y otros saberes. Ya que los enlaces de radio se realizaron con circuitos implementados con tubos al vacío, una de las limitantes era generar la señal de oscilador a frecuencias altas, mientras que con los enlaces telefónicos por cable fue necesario analizar el fenómeno de la propagación de la señal en el medio de transmisión. El análisis inicial de pérdidas de la señal se realizó de forma experimental asociada con un conjunto de ecuaciones del circuito del sistema telefónico [1, 2]. Los principales retos en ambos casos fue lograr enlaces transatlánticos, lo cual se consiguió a inicios del siglo xx. Por otra parte, en esta época son más importantes los inventos de la radio y la televisión, por dos razones, la primera es que la transferencia de la señal llega a más personas, y la segunda, que en términos sociales se descubre una nueva manera de comunicar noticias, mensajes y generar entretenimiento.

En conclusión, se puede decir que durante casi dos siglos (1800-1980) se inventaron dispositivos que permitieron comunicar a las personas de diferentes maneras. Posterior a esto, conforme nuevas tecnologías fueron disponibles (como el invento del transistor y los circuitos integrados) se ha dado paso a nuevas formas de servicios de comunicación, los cuales han tendido a converger.

Tabla 1. Relación entre época y tecnología [3, 4, 5]	
Época	Contribución
1800	Teoría electromagnética clásica (Maxwell)
1880	Ondas electromagnéticas (Hertz)
1876	Inención del teléfono
1897	Ondas de radio (Marconi)
1899	Primera radio de comunicación internacional
1901	Primer mensaje de radiocomunicación del Atlántico
1906	Primera radiodifusión de audio, en Massachusetts
1921	Primer sistema de radiotelefonía, en Detroit
1926	Primer televisor
1928	Primera conexión telefónica entre Londres y Nueva York
1946	Inicio del servicio comercial en la banda de 35 y 150 MHz
1946	Primera computadora (ENIAC), construida con tubos de vacío
1947	Se inventó el transistor de unión bipolar
1958	Primera transmisión desde el espacio
1962	Primer satélite activo, usado para enlaces televisivos
1964	Primera computadora personal
1970	Red Aloha (precedente de la red Ethernet)
1971	Advanced Research Projects Agency Network (ARPANET)
1980	Distribución de teléfonos celulares
1989	Red Digital de Servicios Integrados (RDSI)
1991	Red LAN
1994	Internet
2002	Bluetooth
2003	WiMAX (encaminada a dispositivos como <i>smartphones</i> , <i>tablets</i> , entre otros)
2003	Interoperabilidad mundial para acceso por microondas (Wifi)

Es decir que los desarrollos por separado, al interconectarse, produjeron la primera convergencia de comunicaciones en la década de los noventa, cuando el protagonista principal es la internet. Una segunda convergencia se plantea con la aparición del WiFi, pues, si se han inventado nuevos dispositivos como teléfonos inteligentes, *tablets*, entre otros, éstos por sí solos

no tienen impacto si no están conectados de manera inalámbrica a una red. De hecho, el término *convergencia* fue definido hasta 2002 por la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones), en Dubai, como: “Cada vez más, se espera de cualquier proveedor de servicios que sea capaz de ofrecer cualquier servicio de comunicación a cualquiera, en cualquier lugar, utilizando cualquier tipo de tecnología disponible”.

Tecnologías de los años noventa

En general las tecnologías de los años noventa se dividían en tres grupos: semiconductores, equipos de telecomunicaciones y *software*.

En la industria de los semiconductores se realizaban esfuerzos para el desarrollo de MEMS (*microelectromechanical systems*), pretendiendo penetrar en el mercado con el lema “Necesidades y aplicaciones”, por lo que la industria hacía desarrollos encaminados en áreas como tecnología médica, seguridad, comunicaciones, energía y automóviles, centrándose en la integración de sistemas y, por consiguiente, haciendo realidad lo que hoy conocemos como miniaturización.

En cuanto a equipos de telecomunicaciones, se percibían diferentes enfoques o arquitecturas, cada uno de ellos ofrecía ventajas y tenía desventajas que a futuro permitirían su supervivencia en el mercado. Uno de los eslóganes que identificaban esta época era “Todas las cosas para todas las personas”. Hasta este momento, la red telefónica de abonados (alámbrica) había evolucionado, permitiendo la conectividad alrededor del mundo. Por otra parte, las redes de computadora habían hecho lo mismo. Sin embargo, el problema existente era que cada tecnología que tenía red había desarrollado sus protocolos y estándares, lo cual impedía la interconectividad. Por tal razón, se definió un modelo de red abierta, lo cual permitiría la interconexión de diferentes dispositivos [6], los cuales operarían en diferentes capas hasta llegar a las aplicaciones, como se ve en la figura 1.

Aplicación E-mail, Fax, Telefonía, Videoconferencia, Televisión... e-games, web browsing, web casting Servidor de video, servidor de audio, servidor de imagenes Educación interactiva, televisión interactiva, servicios financieros
Interoperabilidad (Middleware) Nombre de los servidores, seguridad, privacidad, directorio, dinero electrónico. Ambiente de procesamiento distribuido, programas transportables y agentes inteligentes.
Internetworking (red) TCP/UDP transporte, end-to-end Flujo IP/RSVP
Interconexión Servicios de Telecomunicaciones: POTS, ISDN, ATM, Wireless... Servicios de Televisión: CATV, Distribución digital por satélite, VOD... Data Pipes: Modem: POTS, ISDN, ADSL, Cable... Data: LAN, X.25, Frame Relay... Línea de datos: T1/E1, T3/E3, SONET/SDH...

Figura 1. Modelo de red abierta.

Es decir, el desarrollo de redes de computadoras que se fusionaban con la red telefónica permitió a los usuarios de teléfonos conectarse con otras redes. Con esta interconexión es posible lograr mayores velocidades y ofrecer otro tipo de servicios, ya no solamente de transferencia de información y optimización de los recursos disponibles, sino también servicios de entretenimiento, como la televisión por cable. Internet juega un papel importante, pues es lo que se conoce como la primera convergencia, se la describe como simbiosis entre telecomunicaciones y computadoras.

Fenómeno social

Desde el inicio de los años noventa más de 150 países introdujeron nuevas leyes de telecomunicaciones o modificaron la reglamentación vigente. Esto con la finalidad de permitir la regulación en los mercados derivados de la interconexión. Ya que si durante más de 75 años [7] la oferta de servicios de comunicaciones se manejó a través de monopolios, eso ya no era posible en ese momento, pues las compañías telefónicas podían ofrecer otros tipos de servicios. A su vez, los proveedores de servicios de internet podían entonces ofrecer servicios telefónicos. Lo cual planteaba retos fundamentales para los organismos reguladores: ya que la convergencia significaba que dejaban de ser útiles las antiguas distinciones entre servicios, las compañías debían

contar con reglas claras para operar y posicionarse en el mercado, pues por primera vez los proveedores de servicios de telecomunicaciones debían competir por tener una clientela; es decir, se da una competencia abierta por atraer a los clientes.

Adicional a lo que ocurría a escala mundial, en México los problemas que se manifestaron para motivar cambios en las leyes de regulación se sintetizan en los siguientes puntos:

- Elevado nivel de demanda insatisfecha.
- Exigencia por parte de los grandes usuarios, de que se les permitiera construir sus propias infraestructuras y redes cuando los monopolios no pudieran satisfacer la demanda.
- Congestión del tráfico durante las horas pico.
- Escasa calidad de servicio.
- El hecho de que muchos usuarios valoraran los servicios por encima del precio que cobraban los operadores.
- Insuficiente cobertura del territorio.

Derivado de los acuerdos internacionales y de las presiones sociales, en México se privatiza Teléfonos de México, se otorgan concesiones a otros proveedores para ofrecer servicios de telecomunicaciones y nace un nuevo organismo regulador, denominado Comisión Federal de Telecomunicaciones (Cofetel).

Sin embargo, esta convergencia afectaba la función de algunos grupos, como los radioaficionados, pues en el pasado habían contribuido al desarrollo de las comunicaciones inalámbricas debido a los experimentos que realizaban. Sin embargo, en la década de los noventa continuaban realizando experimentación técnica, entrenamiento y además, con sus equipos se propagaban noticias, llamadas de auxilio y comunicaban el estado de personas en desastres naturales; esto último no se veía como una actividad necesaria, pues los nuevos servicios de comunicación, entre los que destacaban la internet y la telefonía celular, permitían realizar esas funciones. En diferentes foros se mencionaron sus contribuciones, pero el sentido común conminaba a pensar que era obsoleta esta manera de propagar noticias. Fue hasta el año 2005 cuando, como parte de las desgracias que ocasionó el huracán Katrina en Estados Unidos de Norteamérica, la red de telecomunicaciones quedó deshecha y no permitió notificar lo ocurrido, así

que los pocos grupos de radioaficionados que quedaban se encargaron de informar del estado en que se encontraban los afectados. Esto ha permitido que los radioaficionados conserven las bandas asignadas y las funciones que históricamente se les ha confiado.

Crecimiento de la red telefónica celular

A mediados de los años noventa se dio un crecimiento logarítmico en la venta y el uso de equipos de teléfonos celulares [8], por lo que América Latina por primera vez se encuentra a la par de otras partes del mundo en cuando a oferta y demanda de servicios de comunicación, muchas familias, antes de tener un teléfono de abonado, tienen un celular.

Como parte de la convergencia se emplea un modelo de telecomunicaciones que consta de tres niveles, en el primero están las conexiones de teléfonos, teléfonos celulares y puntos de enlace (computadoras); el segundo nivel, denominado red inteligente, emplea la señalización S7, cuyo objetivo principal es permitir la autenticación, la movilidad y dar un servicio personalizado; el tercer nivel es la administración de la red telecomunicaciones. En síntesis, se tiene una red telefónica celular.^[9]

Tecnologías de la última década

La alta demanda de telefonía celular motivó mejoras tecnológicas de los equipos y la optimización del uso de las bandas de radiofrecuencia, para lo cual los grupos de investigación e ingenieros de desarrollo han realizado propuestas de innovación, tanto en métodos y técnicas de diseño de circuitos para alta frecuencia como en educación [10, 11]. De esta forma, nuevas propuestas en el diseño de antenas, y el uso de dispositivos como transistores bipolares de heteroestructura (HBT), entre otros, han permitido que los dispositivos reduzcan su tamaño, tengan un consumo de potencia bajo y puedan operar en frecuencias más altas. Todo ello ha permitido la producción masiva de dispositivos, cuya operación está en la banda de un 1 GHz o más. Un ejemplo de estos dispositivos son los GPS (sistema de posicionamiento global). Los teléfonos celulares han evolucionado en las generaciones conocidas como 1G, 2G, 3G y 4G; esta evolución emplea las mismas frecuencias

espectrales, pero las velocidades de datos han aumentado, es decir, cada generación hace un mejor uso del espectro, a través de nuevas técnicas de modulación y acceso al medio.

Una manera simple de generar un ambiente de interoperabilidad entre el celular y una red inalámbrica, es generar una plataforma denominada All IP, en la que todo viaja a través de direcciones de IP (*internet protocol*) como si fuera una red LAN (*local area network*). Lo cual tiene la ventaja de que los nodos de conexión físicos pueden servir como mecanismos de distribución de las señales. Por otra parte, a finales de los años noventa las empresas 3Com, Airones, Intersil, Lucent Technologies, Nokia y Symbol Technologies se reunieron para crear la Wireless Ethernet Compatibility Alliance (WECA), actualmente llamada Wi-Fi Alliance.

El objetivo de WiFi era fomentar el desarrollo de la tecnología inalámbrica y asegurar la compatibilidad de equipos, lo cual fue una revolución, pues los estándares IEEE 802.11 en las versiones b, g y n, una vez creados, se han implementado en muchos equipos y tienen una amplia aceptación a nivel mundial. Un factor importante del éxito de esta tecnología es que explota el uso de la banda ISM (industrial, científica y médica), particularmente en 2.4 GHz y recientemente en la banda de 5.2 Hz. Las bandas de operación ISM son de uso libre, es decir, no debe pagarse ningún costo por concepto de explotación del espectro.

Lo anterior ha planteado una nueva convergencia, la cual se ha denominado como “Teléfonos móviles para comunicaciones móviles” [12], definida por una red NGN (*next generation network*), que es una

Red basada en paquetes que permite prestar servicios de telecomunicación y en la que se pueden utilizar múltiples tecnologías de transporte de Banda Ancha apropiadas por la QoS (*quality of service*), además, las funciones relacionadas con los servicios son independientes de las tecnologías subyacentes relacionadas con el transporte. Permite a los usuarios el acceso sin trabas a redes y a proveedores de servicios y/o servicios de su elección. Soporta movilidad generalizada que permitirá la prestación coherente y ubicua de servicios a los usuarios.

En síntesis, la convergencia de la comunicación inalámbrica se traduce en un dispositivo de mano que está integrado por diferentes sistemas, cada uno de ellos tiene su estándar de operación, por lo que el sistema puede

mantener conectividad en corto alcance con Bluetooth, ZigBee, entre otras especificaciones de protocolos. Además de que puede acceder a internet, o en algunos casos conectarse directamente a un satélite, como los GPS en los teléfonos celulares.

Tal integración ha llevado a resolver diversos problemas, como el de la interferencia, pues diferentes señales arriban a la plataforma; el diseño de las tarjetas de circuito impreso (*printed circuit board*) muy densas con componentes muy pequeños; la reducción en los niveles de absorción de energía del cuerpo humano, entre otros. Hay tres áreas donde los dispositivos se especializan en ofrecer servicios: entretenimiento (televisión, videojuegos, reproducción de video, entre otros), salud (monitoreo de signos vitales, estadísticas y expediente clínico) y seguridad (ubicación de objetos, alarmas en el hogar, entre otros).

Regulaciones establecidas a nivel mundial

Como se ha mencionado, la convergencia sólo es posible si en ella interviene un esquema regulatorio que establezca en forma clara las reglas para que los proveedores de los nuevos servicios de telecomunicación compitan por los usuarios. En este sentido, en América Latina existe la necesidad de liberar el espectro para hacer uso de la banda ancha [13], por lo que en México se ha planteado la Reforma de Telecomunicaciones, uno de sus objetivos es liberar la parte del espectro de la banda de 2.4 GHz, a través del establecimiento de marcos de concesión de licencias unificados, políticas flexibles de gestión del espectro, y convergencia tecnológica. Se espera que en un futuro se cuente con fondos públicos para aplicarse con criterios de transparencia y equidad, para responder a las necesidades de desarrollo de la banda ancha que no sean satisfechas por las inversiones del sector privado, como ocurre en las zonas rurales y remotas. Otro objetivo es equilibrar las demandas del desarrollo de las infraestructuras y la promoción de las inversiones y el fomento de la inversión privada con la necesidad de impulsar la competencia y la innovación.

Sin embargo, las regulaciones que se proponen en países como el nuestro, finalmente obedecen a un modelo que se ha denominado “ecosistema de las tecnologías de la información y telecomunicación” [14], en este modelo se han definido cuatro grupos: uno de ellos son los proveedores de elementos de red (venden dispositivos); otro lo conforman los operadores

de la red; uno más integra a los proveedores de plataformas, contenidos y aplicaciones, y otro grupo son los consumidores finales.

El primer grupo trabaja con estándares, que son reglas de operación para que los dispositivos puedan interconectarse; el segundo grupo se ve afectado por los esquemas de regulación, ya que el cumplimiento de las reglas se refleja en el mercado, o los consumidores que puede acaparar; el tercer grupo depende de las políticas de comercialización y de los tratados a escala global.

Las relaciones que se originan entre estos grupos tienen como propósito generar contenidos a bajo costo, con plataformas de preferencia abiertas con la intención de que el consumidor se sienta atraído para adquirir un dispositivo, sin embargo, el costo que deben invertir las empresas con la finalidad de innovar y permanecer en el mercado es lo que definirá y marcará el dominio en el mercado que hasta este momento está liderado por Estados Unidos de América, Asia y Europa.

En síntesis, las regulaciones que se den en México, finalmente tendrán que sujetarse a las normas y estándares definidos por el primer grupo. Si bien, existen empresas nacionales que ofrecen servicios de telecomunicaciones, aún no se han establecido empresas nacionales que estén en el primer grupo.

Conclusiones

Se han dado dos convergencias de telecomunicaciones, la primera en la década de los noventa, su propósito era integrar las redes en una red mayor de servicios integrados; su modelo de integración era vertical. La segunda convergencia de telecomunicaciones sucedió después de 2003, con la puesta en marcha de WiFi; su modelo de integración es horizontal.

La segunda convergencia ha permitido el desarrollo de aplicaciones como Youtube, redes sociales, entre otras. Es en este sentido, se puede decir que la forma de comunicarnos es más equitativa, libre y abierta.

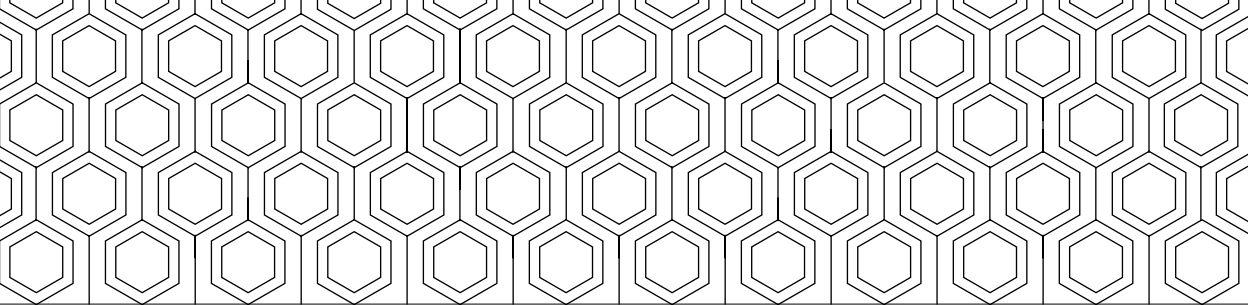
En cada convergencia es necesario establecer marcos regulatorios para la operación de empresas y/o compañías, lo cual determinará sus estrategias de mercado. Por ende, las oportunidades de negocio se amplían.

Para la integración de los sistemas es necesario generar conocimiento y desarrollar innovación. En este sentido, el papel de esta universidad es estratégico, pues en ella se debe generar el ambiente para desarrollar

metodologías de diseño, desarrollo de técnicas, entre otros, que permitan la generación de nuevos negocios o empresas, y así tener la posibilidad de proponer las propias reglas de operación.

Referencias

- [1] A. B. Clark and H.S. Osborne, “Long distance telephone circuits in cable,” *The Bell System Technical Journal*, vol. 11, no. 4, pp. 520-545, 1932.
- [2] L. G. Wade, “Electrical drying of telephone cable,” *The Bell System Technical Journal*, vol. 19, pp. 209-220, 1940.
- [3] W. C. Jakes, Ed. *Microwave Mobile Communications*. John Wiley & Sons, 1994.
- [4] Cornell Drentea. *Receiver Design and Technology*. Artech House, 2010.
- [5] G. Chien, and K. Lawrence Loh, *Past, Present and Future of RF Design in Wireless Communication*. Taiwan: MediaTek.
- [6] M. Decina and V. Trecordi, “Convergence of telecommunications and computing to networking models for integrated services and applications,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, no. 12, pp. 1887-1914, December 1997.
- [7] *Tendencias en las reformas de telecomunicaciones 1999*. UIT, octubre 1999.
- [8] A. Goldsmith. *Wireless Communication*. Cambridge University Press, 2005.
- [9] F. G. Harrison, and S. R. Hearnden , “The challenge to realize convergence of fixed and mobile communications,” *Electronics & Communication Engineering Journal*, pp. 164-168, June 1999.
- [10] K. C. Gupta, T. Itoh, and A. A Oliner. “Microwave and RF education- past, present, and future,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no. 3, pp. 1006-1014, 2002.
- [11] R. C. Joshi and V. M. Dabhi, “Effective RF and microwave education”, *IEEE International RF and Microwave Conference*, Kuala Lumpur, Malaysia, December 2008. Published in *IEEE Explore*, Digital Library, pp. 184-188.
- [12] Z. Ying, “Antennas in cellular phones for mobile communications,” in *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. 7, pp. 2286-2296, 2012.
- [13] “Impacto regulatorio de la convergencia y de la banda ancha para Las Américas”, documento ITU, julio de 2012.
- [14] M. Fransman. *The New ICT Ecosystem Implications for Policy and Regulation*. Cambridge University Press, 2010.



Veinte años de comunicaciones fotónicas: retos y oportunidades actuales

HORACIO SOTO ORTIZ

DIVISIÓN DE FÍSICA APLICADA,

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA

Introducción

Esta exposición ofrece un panorama de la evolución de las comunicaciones fotónicas, presenta su estado del arte y sus grandes retos. En este sentido, se comienza exponiendo la relevancia que tienen hoy en día las comunicaciones ópticas en los sistemas de telecomunicaciones modernos. Se habla de la fibra óptica, así como de la necesidad que tienen las telecomunicaciones actuales de ofrecer banda ancha a sus usuarios y de cómo este escenario ha hecho que los sistemas de comunicaciones ópticas evolucionen. Enseguida, se abordan las tendencias de las comunicaciones ópticas, se identifica como una de ellas la multicanalización densa por división de longitud de onda (DWDM por sus siglas en inglés) y se introduce el procesamiento digital fotónico como herramienta clave para las redes de comunicaciones ópticas del futuro. A continuación, se retoma el procesamiento digital fotónico, se enumeran algunos de los fenómenos no lineales y tecnologías que permiten

su implementación, y se enfatiza en algunas demostraciones de actualidad. Para continuar, se plantean los retos del procesamiento digital fotónico y se introduce la nano-fotónica integrada en silicio, la cual se identifica como la tecnología que transformará en breve los circuitos integrados y la computación. Bajo este contexto, se presentan los sorprendentes avances en nanofotónica integrada en silicio que ha tenido la compañía IBM, se habla de las comunicaciones fotónicas intrachip y del concepto que tendrán las futuras computadoras híbridas, en las que al menos su bus de datos será óptico. Se habla de la revolución tecnológica que se avecina en el mundo con la nueva era de los chips optoelectrónicos, los cuales permitirán efectuar operaciones ultrarrápidas con gran estabilidad. Se identifica entonces a las comunicaciones fotónicas, al procesamiento digital fotónico y a la nanofotónica integrada en silicio como nichos de oportunidad que revolucionarán la tecnología mundial, los cuales representan, en consecuencia, una enorme oportunidad de invertir fuertemente en ellos para transformar a México en una potencia mundial de las nuevas tecnologías del futuro. Se concluye que los temas antes mencionados, por su relevancia académica y sobre todo por la repercusión para nuestra sociedad, son sin duda directrices que indican hacia donde se debe enfocar la ciencia en México.

Sistemas de telecomunicaciones ópticas

Existen muchos tipos de telecomunicaciones, como por ejemplo las vía satélite, inalámbricas, por cable de cobre, y demás. Sin embargo, en los países desarrollados la gran mayoría del tráfico de telecomunicaciones es repartido ópticamente. Por ejemplo, se estima que en Estados Unidos 98% del tráfico global de telecomunicaciones es repartido por fibras ópticas.^[1] Lo descrito anteriormente se debe al gran ancho de banda que posee la fibra óptica, la cual es, en efecto, el canal de transmisión de los sistemas de comunicaciones ópticas guiadas. En particular, la fibra óptica goza de un ancho de banda teórico de 100 Tb/s (100 billones de bits por segundo), lo cual intuitivamente se percibe como una cantidad enorme. Para tener una mejor idea de la capacidad de las fibras ópticas analicemos el siguiente ejemplo académico.

Un solo cable de fibra óptica con 1,000 fibras, el cual tiene un diámetro de magnitud similar a la de la muñeca de una mano adulta (ya que cada

fibra tiene un diámetro de 250 μm ya con recubrimiento), puede soportar una carga del orden de 400 millones de conversaciones telefónicas simultáneas. Ahora bien, en todo el mundo y durante el año 2012 se registraron, en horas pico, 40 millones de conversaciones telefónicas simultáneas. Es decir que por un solo cable de fibra óptica se podrían transmitir todas las conversaciones telefónicas que se llevan a cabo en todo el mundo y aún sobraría muchísimo espacio para otras aplicaciones [2].

Además de su gran ancho de banda, las fibras ópticas poseen las características extraordinarias siguientes:

- Pérdidas bajas
- Inmunidad a interferencia electromagnética
- Alta resistencia a la radiación cósmica
- Baja distorsión en la distribución de la señales
- Bajo peso y diámetro reducido
- Diafonía insignificante (para potencias moderadas)
- Alta seguridad y se puede detectar su intervención
- Amplio rango de temperaturas de operación
- Operación segura en ambientes peligrosos.

Todas estas propiedades han hecho que la fibra óptica sea masivamente utilizada en enlaces de ultralarga distancia, comunicando continentes, y de larga distancia, enlazando ciudades.

Paralelamente al escenario descrito antes, el mundo ha sido testigo del crecimiento explosivo de internet, el cual ha sido causado por la demanda exponencial de los servicios multimedia proporcionados por esta red, a la cantidad cada vez mayor de dispositivos que se conectan a ella, así como al número creciente de estos dispositivos per cápita. El resultado ha sido un aumento desmedido en la demanda de ancho de banda.

Al mismo tiempo, las redes de telefonía celular han crecido de manera desenfrenada, ya que satisfacen la necesidad de comunicación de usuarios móviles y pueden llegar a lugares que son difíciles de cablear. Sin embargo, sin importar las circunstancias, los usuarios móviles exigen servicios multimedia. Lo anterior ha provocado que los sistemas de telefonía celular se vean en la necesidad de aumentar dramáticamente su ancho de banda y por tanto de transmitir con ondas milimétricas de frecuencias cada vez más elevadas. Para tal efecto, se han diseñado topologías con una gran cantidad

de células contiguas, cada una de las cuales contiene una antena cuyo radio de acción es muy corto, ya que las ondas milimétricas son fuertemente absorbidas en el espacio libre. Si el radio de acción de la antena es de entre 20 a 400 m se tiene una picocélula y si es de entre 400 m a 2 Km se cuenta con una nanocélula. Para evitar cuellos de botella y células muy costosas, la tendencia es que éstas, a través de sus antenas, se dediquen únicamente a transmitir y recibir señales. El enrutamiento y el procesamiento de las señales son entonces llevados a cabo en una oficina central, la cual está conectada con fibra óptica con cada una de las células del sistema de comunicaciones móvil. Es decir que la fibra óptica es un conducto clave, mediante el cual la telefonía celular, en los países desarrollados, ha podido aumentar el ancho de banda que ofrece a sus usuarios. Asimismo, y por razones obvias, si la red de telefonía celular crece, la red óptica que conecta a sus células con alguna oficina central lo hace también [3].

Por las razones explicadas en los párrafos anteriores, se puede entender fácilmente por qué la mayor parte del tráfico de telecomunicaciones, en los países desarrollados, es repartido por fibra óptica. De hecho, las fibras ópticas aparte de ser usadas hoy en día de forma masiva en enlaces submarinos intercontinentales y en enlaces de larga distancia, son extensivamente utilizadas en redes metropolitanas, de acceso y de más en más en la llamada última milla, llegando directamente hasta los hogares y oficinas. Es decir que la fibra óptica y por tanto los sistemas de comunicaciones ópticas se han convertido en la columna vertebral de las telecomunicaciones, permitiendo que los otros sistemas de telecomunicaciones puedan soportar el ancho de banda que sus usuarios les demandan.

El crecimiento fulgurante de los sistemas de telecomunicaciones ópticas ha ocasionado que se observen varias tendencias en lo que respecta a su implementación futura, pero principalmente dos son sobresalientes [4]:

- Elaborar redes con multicanalización densa por división en longitud de onda (DWDM por sus siglas en inglés).
- Desarrollar redes completamente ópticas con procesamiento digital fotónico.

En cuanto a las redes DWDM, actualmente son la única alternativa factible, teórica y práctica de aprovechar todo el ancho de banda de las fibras ópticas. Su principio de operación se basa en enviar por una sola fibra óptica

40 o más canales de información. Para ello, cada canal es enviado en una longitud de onda diferente (o color), de manera que al final del trayecto se puede volver a separar de los demás sin perder la información que contiene. Así, por cada fibra óptica, de un gran conjunto de éstas, se envía una portadora modulada, generalmente en amplitud, con una longitud de onda que es distinta de todas las demás del conjunto. Todas estas fibras arriban a un nodo donde su información es multicanalizada (MUX por sus siglas en inglés) dentro de una sola fibra óptica. Es decir que por ésta última viajará toda la información contenida en el conjunto primario de fibras ópticas. Al final del trayecto, se efectúa el proceso de demulticanalización (DMUX por sus siglas en inglés), el cual consiste en separar a cada una de las portadoras de longitud de onda diferente y enviarla por una fibra distinta hacia su destino terminal. Una gran ventaja de los sistemas DWDM es que a su vez cada canal de información puede contener otro tipo de multicanalización, como, por ejemplo, mulicanalización por división de tiempo (TDM por sus siglas en inglés), en donde la información de varios canales es enviada en diferentes intervalos.

Actualmente, las redes DWDM trabajan en su gran mayoría con 40 canales separados entre sí 100 GHz (0.8 nm) en la banda C (de 1530 a 1565 nm), donde la fibra óptica presenta la menor atenuación y la amplificación de las señales se puede efectuar de manera sencilla y “económica” con amplificadores de fibra contaminada con erbio. De esta manera, si cada canal transmite a 40 Gb/s, por una sola fibra óptica se pueden enviar 1.6 Tb/s. Recientemente han empezado a utilizarse sistemas con 80 canales separados entre sí 50 GHz (0.4 nm) y hay demostraciones con 200 canales separados 12.5 GHz (0.1 nm), aunque estos últimos abarcan también la banda L (1565 a 1625 nm) [5].

De todo lo anterior se deduce que no es difícil imaginar que los grandes retos de los sistemas DWDM son:

- Aumentar el número de canales.
- Realizar láseres con anchos de línea cada vez más finos.
- Crear MUX/DMUX capaces de funcionar con canales cada vez más cercanos.
- Desarrollar nuevos protocolos de comunicación más eficientes.
- Implementar nuevas técnicas para compensar la dispersión cromática y la de los modos de polarización.
- Elaborar nuevas fibras con menor no linealidad.
- Realizar amplificadores ópticos, eficientes y de implementación simple para todas las bandas de transmisión.

Donde en particular los nuevos protocolos de comunicación se refieren a la manera de codificar y decodificar la información para que ésta sea enviada de manera más eficiente. Asimismo, las técnicas para compensar la dispersión cromática y la de los modos de polarización se refieren a los procesos que hay que implementar para que todas las componentes espectrales y de polarización de las portadoras electromagnéticas, que contienen a la información, viajen a la misma velocidad de manera que los bits no se deformen.

Por otra parte, es claro que entre más señales se multicanalicen en una sola fibra óptica ésta contendrá mayor potencia óptica. Cuando la potencia óptica comienza a aumentar excesivamente, la fibra entra en un régimen no lineal y puede entonces haber interferencia entre los canales. Por tal motivo, es deseable fabricar nuevas fibras con una menor no linealidad.

Todos estos retos tendrán que ser solventados para garantizar el futuro viable de las redes DWDM. No obstante, no hay que perder de vista que actualmente estas redes se han expandido de manera vertiginosa y esto está causando cuellos de botella en los nodos repartidores donde confluyen diversas fibras ópticas con canales multicanalizados en longitud de onda. Este enorme problema es el responsable de que hoy en día se realicen grandes esfuerzos para desarrollar redes completamente ópticas con procesamiento digital fotónico.

Efectivamente, imaginemos por un instante lo que sucede dentro de un nodo repartidor donde confluyen diversas fibras ópticas con canales multinanalizados en longitud de onda. La primera tarea por realizar dentro del nodo es demulticanalizar todas las señales que viajan por cada una de las fibras arribantes (DMUX). Una vez que cada señal es espacialmente separada de las otras, se fotodetecta y se convierte en una señal eléctrica. Todas las señales convertidas a flujos eléctricos son entonces introducidas dentro de una computadora dedicada que les lee su encabezado y así se entera de dónde provienen, qué tipo de información transportan (video, voz, datos...), qué longitud de onda las transporta, hacia dónde se dirigen, entre otras referencias. Antes de enviarlas hacia el puerto de salida que les corresponda, la computadora analiza sus encabezados y determina si alguna de ellas necesita algún tipo de acondicionamiento. En particular hay tres tipos de regeneraciones (3R) que se efectúan dentro de los nodos: re-amplificación, re-formado y re-sincronización de las señales. Una vez que las señales han sido reacondicionadas son enviadas hacia el puerto de

salida que les corresponde, donde son trasladadas nuevamente al dominio óptico. De hecho, cada señal eléctrica funge como la señal manejadora de un modulador electroóptico, al que le está arribando un haz láser continuo con una longitud de onda igual a la de la señal óptica que dio origen a la señal eléctrica correspondiente. Así, a la salida de cada modulador, un haz láser se encuentra modulado, con el mismo formato que el de la señal eléctrica correspondiente, y listo para ser enviado por la fibra que lo llevará a su destino final u a otro nodo intermedio. No obstante, antes de que estas señales ópticas sean enviadas por la fibra correspondiente, la computadora debe asegurarse de que ninguna de sus longitudes de onda sea igual a la de otra señal, proveniente de otro puerto de entrada, que quiera partir por la misma fibra. Si la computadora llegara a detectar dos señales con la misma longitud de onda, que deban ser enviadas por la misma fibra de salida, remite a una de ellas a un convertidor de longitud de onda (wc por sus siglas en inglés) para que su longitud de onda sea cambiada. Una vez que todas las señales -que saldrán por el mismo puerto de salida- poseen longitudes de onda diferentes, entonces son finalmente multicanalizadas (MUX) y enviadas a su destino final por la fibra correspondiente.

La lectura de los encabezados de las señales, la regeneración de éstas, la conversión de su longitud de onda, así como su enrutamiento hacia el puerto de salida que corresponda, se efectúan dentro de un módulo que se denomina matriz de conmutación. En los sistemas DWDM actuales, esta matriz de conmutación es del tipo “opaca”, ya que las señales ópticas de entrada son convertidas a electricidad y procesadas en el dominio eléctrico. Como puede deducirse, entre más fibras de entrada haya en el nodo, conteniendo cada vez más canales de información y con tasas de bits cada vez mayores, la electrónica comienza a ser insuficiente para procesar todas las señales en un tiempo adecuado, produciéndose demoras que forman cuellos de botella. La solución es entonces hacer el procesamiento digital de las señales en el dominio completamente óptico. Es decir, hacer que los canales de información que arriban al nodo nunca se conviertan a electricidad para su procesamiento, sino que éste se haga completamente en el dominio óptico. Una red de este tipo se le conoce como red completamente óptica con procesamiento digital fotónico. En este caso la matriz de conmutación hace todo en el dominio óptico y es denominada “transparente”.

Procesamiento digital fotónico

Como ya se mencionó, la clave para poder efectuar matrices de conmutación transparentes es el procesamiento digital fotónico, el cual se puede desarrollar aprovechando la forma en la que se manifiestan distintos fenómenos no lineales, tales como:

- Mezcla de cuatro ondas
- Automodulación y modulación cruzada de la fase
- Modulación cruzada de la ganancia
- Modulación cruzada de la polarización
- Absorción de dos fotones, entre otros.

Estos fenómenos y, por tanto, el procesamiento digital fotónico se pueden desarrollar con distintas tecnologías, como, por ejemplo, utilizando:

- Guías de onda de niobato de litio periódicamente polarizado (PPLN)
- Monocapas autoensambladas iónicamente (ISAM films por sus siglas en inglés)
- Amplificadores ópticos de semiconductor
- Cristales fotónicos
- Fibras altamente no lineales
- Plasmones activos
- Micro- y nanofotónica integrada en silicio, por mencionar algunos.

Cabe resaltar que de todas las tecnologías antes mencionadas, la micro- y nanofotónica integradas en silicio han recientemente atraído gran atención, por las razones que en breve se explicarán. Por lo pronto, es pertinente resaltar que existe una enorme cantidad de funciones completamente ópticas, que efectúan algún tipo de procesamiento digital fotónico, que han sido recientemente demostradas, dado que éste es un tema fértil de investigación de mucha actualidad. En primer lugar, se tienen las funciones booleanas básicas AND, XOR, OR y NOT [6], que han permitido efectuar dispositivos más complejos, como: *flip-flops* [7], convertidores de longitud de onda [8], sumadores, restadores [9], convertidores de analógico a digital [10], convertidores de digital a analógico [11], codificadores multinivel [12], conmutadores de paquetes ópticos [13], MUX, DMUX [14], y más. En este punto, es de vital importancia señalar que a diferencia de

la electrónica, las funciones complejas arriba mencionadas no solamente se pueden desarrollar con combinaciones de funciones booleanas básicas, sino también directamente, explotando la manifestación particular de algún fenómeno no lineal.

A partir de todo lo explicado en los párrafos anteriores, se deduce que los principales retos del procesamiento digital fotónico (PDF) son [15]:

- Efectuar la integración monolítica de varios dispositivos fotónicos de PDF
- Realizar la integración de dispositivos fotónicos de PDF con elementos electrónicos
- Implementar dispositivos fotónicos de PDF de bajo consumo de energía
- Desarrollar sistemas de PDF que contengan alta escalabilidad y cascabilidad
- Instrumentar sistemas de PDF que presenten una operación ultra rápida
- Generar dispositivos de PDF de bajo costo.

De todos estos puntos, un aspecto en el que vale la pena abundar es el relacionado con la integración de dispositivos electrónicos con fotónicos que efectúen procesamiento digital. Esta característica extremadamente deseable era hasta el año 2010 un sueño que no se había podido realizar de manera práctica. La principal dificultad radicaba en que los dispositivos electrónicos actuales se desarrollan con semiconductores indirectos, tales como el silicio. Estos semiconductores son extremadamente ineficientes para generar y/o liberar fotones, cuando sus electrones pierden energía, por lo que a temperatura ambiente y a corrientes bajas es imposible efectuar fuentes de luz con silicio puro (LED o láseres). Dado que casi todas las funciones del procesamiento digital fotónico se pueden realizar utilizando el medio activo de los láseres de semiconductor, resultaba imposible efectuarlas con dispositivos de silicio. Sin embargo, investigaciones recientes muestran que es posible generar láseres infrarrojos de silicio contaminando a este material con fosforo de indio o explotando el efecto Raman que se manifiesta naturalmente dentro del silicio. Esta nueva tecnología, llamada nanofotónica integrada en silicio, será, desde el punto de vista de muchos expertos, el motor de una nueva revolución tecnológica, que permitirá desarrollar una gran cantidad de dispositivos ultrarrápidos, sumamente estables [16]; y será el motivo de análisis de la siguiente sección.

La nanofotónica integrada en silicio y la computadora híbrida

La compañía IBM anunció en el año 2010 que logró efectuar, en silicio, con tecnología CMOS (*complementary metal-oxide-semiconductor*), la integración de láseres, moduladores de luz, fotorreceptores, guías de onda, MUX/DMUX e interruptores con transistores de silicio. Como se sabe, la tecnología CMOS, que es usada para realizar microprocesadores y circuitos integrados, tiene dos características muy importantes: presenta una baja sensibilidad al ruido electromagnético y un consumo estático de potencia moderado. IBM desea así efectuar procesadores extremadamente potentes, ultrarrápidos, poco sensibles al ruido y de bajo consumo. La idea central de esta compañía es efectuar chips que ella llama “en tres dimensiones (3D)”. En la parte baja del chip se colocará una capa de procesamiento electrónico con diversos microprocesadores (al menos 16), después habrá una capa superior de memoria y finalmente una capa de red de intercomunicación fotónica. Esta red de interconexión óptica es en sí una matriz de conmutación, compuesta por un enrejado de guías de onda ópticas, teniendo en cada uno de sus cruces un interruptor fotónico que puede permitir el paso de la luz, en función de la orden eléctrica que reciba, en cualquier dirección. Este concepto revolucionario terminará con un cuello de botella que frena a la computación de hoy en día.

En efecto, la electrónica ha logrado efectuar operaciones digitales en tasas del orden de los gigabits, sin embargo, la comunicación a través de pistas de cobre, con otros dispositivos periféricos y/o otros procesadores, es muy lenta para evitar que las señales eléctricas se distorsionen. Este fenómeno se acentúa a medida que las pistas de cobre se hacen más largas. No obstante, con una interconexión fotónica como la propuesta por IBM, este problema queda resuelto y el cómputo paralelo y el traslado de datos entre procesadores se podrá efectuar a velocidades inimaginables. IBM ha llamado a sus procesadores 3D “exaprocesadores”, porque espera que efectúen 10^{18} operaciones por segundo (un trillón de operaciones/segundo), es decir que un solo chip será 1000 veces más rápido, en su procesamiento, que las supercomputadoras de nuestros días [17].

En particular, los procesadores o núcleos de procesamiento liberarán datos en serie con una tasa de bits de 1 Tb/s, los cuales serán convertidos a

paralelo y posteriormente serán amplificados para manejar moduladores de luz. Lo anterior se podrá realizar en el dominio eléctrico porque todo el trayecto que recorrerán las señales eléctricas, desde que salen del núcleo de procesamiento hasta que llegan a los moduladores, se hará en un área de 16 mm². Así, se tendrán N canales eléctricos paralelos que manejan a N moduladores de luz, a los cuales les llegan N diferentes fuentes de luz (láseres de potencia constante), con N longitudes de onda diferentes. Los moduladores transpondrán a la luz de amplitud constante que les llega, el formato de modulación de la señal eléctrica que los maneja. Así, a la salida de los moduladores se tendrán N canales ópticos con diferente longitud de onda e información. Estos canales serán multicanalizados en una sola guía de onda de silicio, utilizando un MUX WDM. Posteriormente, la guía de onda los vehiculará hacia la matriz de interconexión óptica, donde serán enviados a su destino final. Para ello, la matriz de interconexión habilitará los interruptores que el núcleo de procesamiento le ordene, de manera que los canales ópticos multiplexados lleguen justo arriba del procesador o periférico a donde el primer núcleo se quería conectar. Una vez en su destino final, los canales ópticos son fotodetectados, amplificados eléctricamente, serializados e introducidos en el núcleo de procesamiento blanco o destinatario [18].

IBM se encuentra desarrollando esta nueva tecnología para realizar computadoras de alto rendimiento, sin embargo INTEL también ha logrado la integración nanofotónica con dispositivos electrónicos en silicio y su objetivo es desarrollar los núcleos de las computadoras que todos utilizaremos.^[19] En el caso particular de INTEL, el bus de datos no será substituido por guías de onda de silicio sino por fibra óptica. IBM e INTEL no son las únicas compañías que se encuentran desarrollando esta nueva tecnología, también HP se engloba en este contexto, así como algunas *startups*, como Luxtera, Kotura, Lightwire, Genalyte y Caliopa.

Como puede entenderse de lo descrito anteriormente, la nanofotónica integrada en silicio revolucionará la tecnología de los circuitos integrados de hoy en día, permitirá desarrollar dispositivos ultrarrápidos, de bajo consumo y de muy baja sensibilidad al ruido electromagnético. El primer gran paso es la concepción de la computadora híbrida con su interconexión óptica, pero a medida que esto suceda y se requiera aún más velocidad, para desarrollar aplicaciones inimaginables hoy en día, el procesamiento digital fotónico será indispensable. Por el momento, la tecnología dará un

salto cuántico en cuanto a tasas de bits y estabilidad, y se tendrá un nuevo concepto de tiempo real en miles de aplicaciones, cada vez más complejas y demandantes. Evidentemente, esta tecnología no sólo se aplicará a las telecomunicaciones y a la computación y será el preámbulo del procesamiento digital fotónico, sino que será empleada en una cantidad innumerable de sectores, como los de Salud, Educación, Seguridad, Industrial, entre otros. En pocas palabras, la nanofotónica integrada en silicio será una tecnología que revolucionará a nuestras sociedades.

Oportunidades para México

En esta comunicación se ha expuesto cómo las comunicaciones fotónicas han evolucionado y han ganado terreno en la tecnología actual. Hoy en día las tenemos en enlaces submarinos de ultralarga distancia, comunicando ciudades, en redes metropolitanas, en redes de área local, llegando a casas y oficinas, pero también interconectando cuartos de control, *racks*, tarjetas, circuitos integrados y en interconexiones intrachips. Es decir que las comunicaciones fotónicas son una pieza clave de la tecnología por venir que ya se encuentra inundando a los países desarrollados y que, sin duda alguna, llegará masivamente a México. Por tal motivo, en breve se tendrán las oportunidades siguientes:

- Se necesitará diseñar e instalar redes ópticas adecuadas a nuestro país y llegar con fibra óptica a muchos hogares y oficinas.
- Se necesitará una gran cantidad de equipo y dispositivos que se pueden fabricar en México para nuestro país y para el mundo.
- Dado el gran volumen de mercado que representan, las comunicaciones ópticas son una oportunidad viable para generar tecnología propia y para ayudar a transformar a las empresas maquiladoras de componentes fotónicos en empresas desarrolladoras de tecnología.
- Las comunicaciones ópticas representan el medio ideal para desarrollar nuevas aplicaciones, como por ejemplo comunicaciones seguras por criptografía cuántica.
- Dada la complejidad de los temas por abordar, el desarrollo de las comunicaciones ópticas en México es una gran oportunidad de vincular estrechamente a la academia con la industria y de generar empresas *spin off*.

- En cuanto a la nanofotónica integrada y al procesamiento digital fotónico son nichos que transformarán a la tecnología mundial y representan una enorme oportunidad de invertir fuertemente en ellos para transformar a México en una potencia mundial de las nuevas tecnologías del futuro, que se emplearán no solamente en las telecomunicaciones sino en prácticamente todos los campos de nuestra vida.

Las comunicaciones fotónicas y la nanofotónica integrada en silicio representan un nicho de oportunidad enorme para nuestro país. Son tecnologías que invadirán el mundo en todos sus sectores y representan un mercado trillonario. México está hoy en día en la disyuntiva de seguir siendo un espectador del mundo de la tecnología o convertirse en un protagonista de ésta que le genere riqueza y las condiciones para tener una sociedad más justa y equitativa. Corea del Sur, siendo un país más pobre que México, tomó la decisión de volverse una potencia en los sectores automotriz, electrodomésticos y de telecomunicaciones y lo logró. ¿Nosotros tomaremos la decisión de volvernos una potencia de la nanofotónica e inundaremos al mundo con nuestra tecnología y productos? Para lograrlo hay que comenzar desde las universidades, enfocando los programas de estudio hacia estos temas, hay que impulsar la investigación de la nanofotónica integrada en silicio en centros públicos y universidades. Hay que crear nuevos entes de investigación dedicados a esta materia, traer a México especialistas en el campo, generar masas críticas, abrir plazas de investigación y de posdoctorados, eliminar las normativas absurdas que asfixian a la investigación en México, incentivar a empresas para que paguen el salario de investigadores, alentar y establecer como punto final de programas de investigación la creación de empresas *spin-off*, incluir a la nanofotónica integrada en silicio dentro del plan nacional de desarrollo del país, hacer un plan nacional con objetivos precisos y recursos comprometidos para el desarrollo de la nanofotónica integrada en silicio con la formación paralela de la industria nacional que la explotará, entre otras muchas acciones.

En pocas palabras, hay que tener una visión de hacia donde se quiere ir y apostarle con inteligencia y sin escatimar recursos, puesto que el retorno de la inversión no sólo sería en trillones de pesos sino en bienestar para nuestra sociedad.

Conclusiones

Dado que las comunicaciones ópticas se han vuelto la columna vertebral que sostiene la demanda de banda ancha, han entonces cobrado una gran importancia y juegan un papel estratégico en la vida de cualquier país.

Las comunicaciones fotónicas y el procesamiento digital fotónico son elementos claves para las tecnologías del futuro cercano que revolucionarán a los sistemas de comunicaciones ópticas y de cómputo.

La nanofotónica integrada en silicio es una tecnología que cambiará la forma de proceder de las sociedades modernas, y en conjunto con las comunicaciones fotónicas representa una enorme oportunidad de invertir fuertemente en ellas para transformar a México en una potencia mundial de las nuevas tecnologías del futuro.

Las comunicaciones fotónicas, el procesamiento digital fotónico y la nanofotónica integrada en silicio, por su relevancia académica y por la repercusión que pueden tener para nuestra sociedad, son sin duda directrices que indican hacia dónde se debe enfocar la ciencia en México.

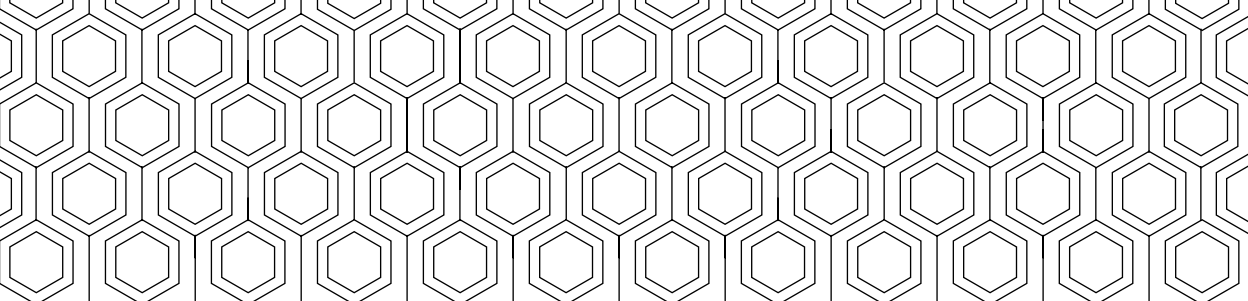
Las comunicaciones fotónicas, aparte de representar un gran nicho de oportunidad para nuestro país, son también un campo imperioso de desarrollo ya que pocos sectores tienen tanto impacto en tantos ámbitos de una sociedad y en la competitividad de un país como la industria de las telecomunicaciones.

Referencias

- [1] D. K. Mynbaev, "Optical communications: status and trends", presented at 7th Advanced International Conference on Telecommunications, St. Maarten, The Netherlands Antilles, 2011.
- [2] L. Milla-León, "Comunicaciones ópticas: conceptos, aplicaciones y tendencias", presentado en el XVI Congreso Internacional de Ingeniería Visión 2011, Lima, Perú, 2011.
- [3] S. Vass, "Optical communications trends for 2011," *Lightwave*, January 2011. [Online.] Available: <http://www.lightwaveonline.com/articles/2011/01/optical-communications-trends-for-2011-113365784.html>.

- [4] C. Yao, "The future of fiber optic communication," Ezine Articles, junio de 2008. [Online.] Available: <http://ezinearticles.com/?The-Future-of-Fiber-Optic-Communication&id=1228139>.
- [5] R. Eisenach, "Evolution to flexible grid wdm," *Lightwave*, pp. 17-20, November-December 2013.
- [6] P. Singh, D. K. Tripathi, S. Jaiswal, and H. K. Dixit, "Design and analysis of all-optical AND, XOR and OR gates based on SOA-MZI configuration," *Optics & Laser Technology*, vol. 66, pp. 35-44, January 2015.
- [7] L. Liu *et al.*, "An ultra-small, low-power, all-optical flip-flop memory on a silicon chip," *Nature Photonics*, vol. 4, pp. 182-187, January 2010.
- [8] A. Pérez-Serrano, J. Javaloyes, and S. Balle, "Multichannel wavelength conversion using four-wave mixing in semiconductor ring lasers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 25, pp. 476-479, March 2013.
- [9] B. Dai, S. Shimizu, X. Wang, and N. Wada, "Simultaneous all-optical half-adder and half-subtractor based on two semiconductor optical amplifiers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 25, pp. 91-93, January 2013.
- [10] M. Scaffardi, E. Lazzeri, F. Fresi, L. Poti, and A. Bogoni, "Analog-to-digital conversion based on modular blocks exploiting cross gain modulation in semiconductor optical amplifiers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 21, pp. 540-542, April 2009.
- [11] Q. Wu, H. Zhang, Y. Peng, X. Fu, and M. Yao, "40Gs/s Optical analog-to-digital conversion system and its improvement," *Optics Express*, vol. 17, pp. 9252-9257, May 2009.
- [12] O. Pérez-Cortés, H. Soto-Ortiz, and J. C. Domínguez-Valdez, "All-optical binary-to-octal encoder based on a semiconductor optical amplifier: Application to eight-level ASK signaling," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 55, pp. 1316-1321, June 2013.
- [13] M. Scaffardi, E. Lazzeri, H. Furukawa, N. Wada, T. Miyazaki, L. Pot, and A. Bogoni, "160Gb/s/port 2x2 OPS node test-bed performing 50Gchip/s all-optical active label processing with contention detection," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, pp. 922-939, March 2010.
- [14] W. Hong, N. Bai, and X. Sun, "Design of flexible and reconfigurable optical add/drop multiplexer," *Optical Fiber Technology*, vol. 17, pp. 247-251, May 2011.
- [15] A. Bogoni and L. Potì, "Trend, Challenges and Applications of Photonic Digital Processing," presented at Photonics Conference, Pyeongchang, Korea, 2009.

- [16] Y. A. Vlasov, "Silicon CMOS-integrated nano-photonics for computer and data communications beyond 100G," *IEEE Communications Magazine*, pp. S67-S71, February 2012.
- [17] S. Assefa, W. M. Green, A. Rylyakov, C. Schow, F. Horst, and Y. A. Vlasov, "CMOS integrated nanophotonics: enabling technology for exascale computing systems," in *Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference*, Paper OMM6, Los Angeles, California, March 2011.
- [18] P. W. Coteus, J. U. Knickerbocker, C. H. Lam, and Y.A. Vlasov, "Technologies for exascale systems," *IBM Journal of Research and Development*, vol. 55, pp. 14:1-14:12, September-October 2011.
- [19] Intel Free Press, "Revolutionizing computing with lasers," October 2012. [Online.] Available: <http://www.intelfreepress.com/news/revolutionizing-computing-with-lasers/57>.



Unificación de los métodos de regularización y análisis variacional para procesamiento reconstructivo de señales e imágenes mediante aproximación basada en computación neuronal adaptiva robusta

STEWART RENÉ SANTOS ARCE

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA,

CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍAS,

UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

Desde la invención de equipos de percepción remota (RS, *remote sensing*), existe la necesidad de obtener imágenes definidas a partir de los datos de RS, que han sido degradadas por la función de transferencia del canal y afectadas por diferentes tipos de ruido. Con el fin de eliminar o reducir esta degradación, se han propuesto diferentes técnicas de reconstrucción y mejoramiento (determinísticos y estocásticos).

Basados en la eficiencia del procesamiento de datos multipropósito, llevados a cabo por el cerebro, las redes neuronales artificiales (ANN, *ar-*

tifital neural networks) desarrollaron la teoría en la que se emula el comportamiento de las redes neuronales biológicas. Esta teoría y su desarrollo algorítmico se han utilizado para aprender estrategias de solución basadas en ejemplos de comportamiento típico de patrones. Los sistemas ANN no requieren que la tarea por ejecutar se programe, sólo que se generalice el aprendizaje basado en la experiencia.

En este trabajo se desarrolla un nuevo método de detección y clasificación multipropósito mediante la fusión de dos paradigmas de ANN: la red Modified Hopfield Neural Network y la red Pulse Coupled Neural Network. Este estudio presenta resultados cuantitativos y cualitativos proporcionados por las técnicas existentes en la literatura y el algoritmo propuesto en el desarrollo de esta tesis, con la finalidad de medir el desempeño de los mismos, y verifica que la red neuronal (NN, *neural network*) unificada supera los métodos competitivos más prominentes en el mejoramiento operacional de rendimiento y la reducción de complejidad computacional. El impacto práctico de este proyecto consiste en reducir al mínimo la degradación persistente en imágenes RS de alta resolución y aplicar el paradigma de detección de cambios aplicado en el *software* desarrollado, a problemas prácticos de mejora de detección de varias firmas espectrales de RS a través de los nuevos sistemas NN computacionales eficientes.

Antecedentes

Las fotografías aéreas fueron, durante muchos años, uno de los productos de la RS más utilizados, funcionaban como insumo principal para la elaboración de toda la cartografía base de nuestro país y en todo el mundo [1].

Debido a que los sensores electrónicos que captan la imagen RS presentan ligeras dificultades (en ocasiones por causas externas, como interferencias naturales), la reconstrucción es esencial para obtener una imagen definida; sin embargo, es necesario conocer el planteamiento del problema para poder realizar el procesamiento computacional bajo la estructura robusta y eficiente para solucionar el problema. La figura 1 presenta un esquema del planteamiento del problema en la captura de imágenes RS [2].

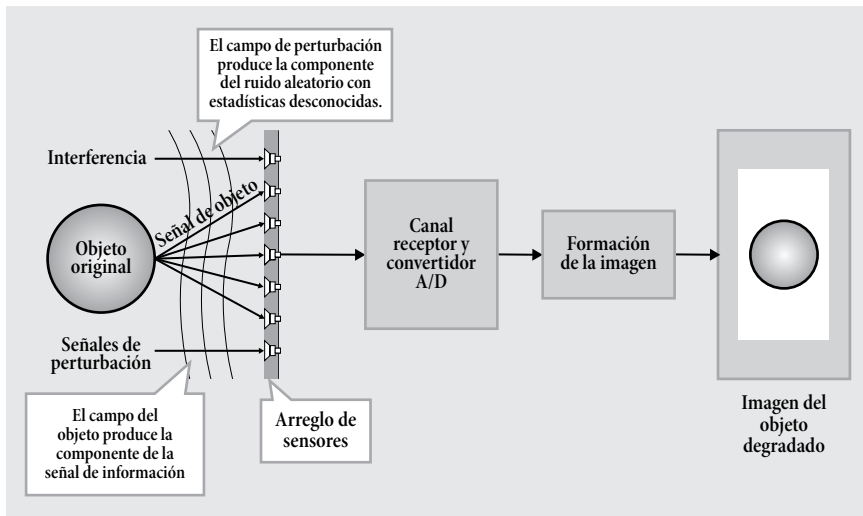


Figura 1. Sistema de formación de imagen incoherente [2].

Los sistemas artificiales de RS reciben en primera instancia una serie de operaciones denominada preprocesamiento, con la finalidad de prepararlos para el tratamiento posterior de extracción de información; pueden utilizar la fusión de datos, la cual se realiza mediante una colección de sensores (o arreglo de sensores) o dispositivos de captación, con la intención de potenciar la extracción de información de la imagen sensada [3]. Sin embargo, los datos producidos por el preprocesamiento no ofrecen en su totalidad la información deseada sobre el entorno captado; en ocasiones, proporcionan una serie de distorsiones, por las que se ve afectada la señal de nuestro objetivo; por ello hay que llevar a cabo un procesamiento de dichos datos [3].

El postprocesamiento computacional de imágenes RS puede definirse por sus dos etapas: la reconstrucción y el realce de características. En la etapa de reconstrucción, se efectúa la recuperación de la imagen formada por el sistema formador de la imagen, y es llevada a cabo por los métodos basados en un modelo, los cuales dependen de la información *a priori* del sistema de formación de imagen y de la información estadística y/o probabilística que se pueda obtener de la imagen observada. Los métodos se dividen en dos grupos: los determinísticos y los estocásticos [4, 5].

En los últimos 20 años han sido varias las arquitecturas de redes neuronales utilizadas para el procesamiento de imágenes. Existen varios trabajos

relacionados con el procesamiento de imágenes, los cuales se resumen en la tabla 1. Estos algoritmos de ANN normalmente requieren imágenes de alta definición para realizar la correcta extracción de características, segmentación y clasificación; o en su caso, contar con una memoria muy extensa para reconocer cada uno de los escenarios en el planeta, lo que significa demasiada carga de procesamiento [6].

Tabla 1. Variantes de las ANN encontradas en la literatura actual [6]									
ART	ART MMAP			MARTMAP			SFAM		
CNN	DCNN	SON		TCNN		POCNN		CTCNN	
ONN	LEGION								
PCNN	ICM			PCNN Multicanal			Encadenamiento Unitario		
RNN	Elman Jordan	Lotka Volterra RNN		DCRNN	RNNBP		IO RNN	LSTM RNN	Hopfield
PRNN	PNN		WPNN			GMM		RNA Aleatoria	
RBF NN	Autoadaptiva		FCM			RBFNN		Neuro RBFNN	
SOM	SOFM	PSOM		FCNN	SOTFN	SASOM	SOBS	SOTM	
Otras	Caóticas	Neurodifusas		TCAN	TDNN	FNN		Membrana excitable	
MLP, BP	MLP GMP				MLP pesos				

Fundamentos básicos de la percepción remota

La RS es la actividad de adquirir y analizar información acerca de una superficie u objeto sin estar en contacto físico con ella, captadas a través de la emisión y reflexión de la energía electromagnética originada principalmente por el sol. Esto es posible mediante el monitoreo de equipos electrónicos de adquisición de datos ubicados en diferentes puntos estratégicos alrededor del planeta [1, 7].

Los sistemas RS constan de tres elementos básicos: una fuente de iluminación (radiación solar), un sensor remoto receptor y el objeto observado [1, 7, 8].

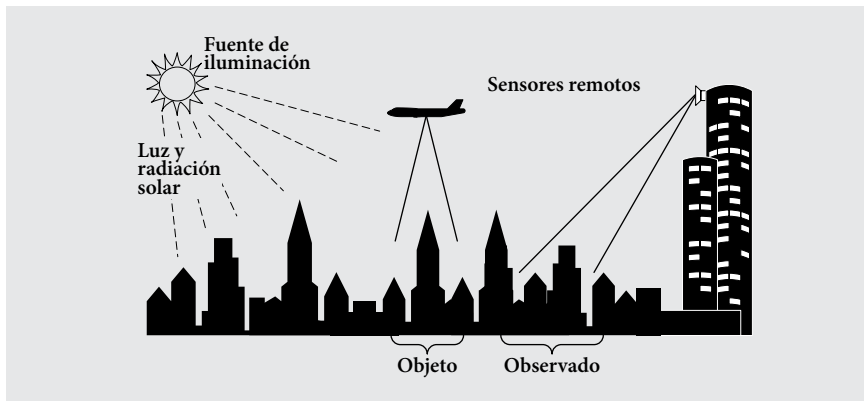


Figura 2. Elementos básicos de la percepción remota [1, 7].

Además, existen otros elementos no necesariamente directos en el esquema operativo RS, pero sí de importancia para desarrollar eficientemente el estudio de los sistemas RS: la plataforma y el sistema de procesamiento [8].

Existen los tipos de sistemas RS:

- Sistemas RS pasivos. Limitados a la medición de la radiación electromagnética procedente de las fuentes externas de energía (reflejada de la radiación solar o emitida por la superficie de la tierra). Han sido extensamente utilizados en la RS. Incluyen cámaras fotográficas, escáneres óptico-electrónicos y radiómetro de microondas [7, 9, 10].
- Sistemas RS activos. Cuentan con la capacidad de generar pulsos de energía (señal electromagnética) y recolectarlos después de que la superficie terrestre los refleje de vuelta restituyendo una imagen RS de la escena sensada remotamente a partir de las características de la señal reflejada [9, 10]. Pueden obtener mediciones en cualquier momento, independientemente de la hora del día o la temporada. Los sensores activos se pueden utilizar para examinar las longitudes de onda que no están suficientemente provistas por el sol, como el microondas [7, 9, 10].

Proceso de formación de imágenes RS

En los sistemas RS, las imágenes RS obtenidas se ven afectadas tanto por las distorsiones provocadas por el medio inhomogéneo a través del cual se

realiza el proceso de captura como por el ruido presente en el sistema (según sea el caso). Un medio inhomogéneo es todo aquello que se interpone entre los sensores y la imagen RS por obtener (nubes, corrientes de aire, lluvia, contaminación, partículas suspendidas en el ambiente, la óptica de los lentes de los sensores, luz, etc.). Esta distorsión es generalmente conocida como *blurring* y en algunos casos es posible modelarla mediante una función de transferencia [7, 8, 10].

El ruido es una distorsión generalmente asociada a todo el sistema de captura de imagen RS o a alguna parte de éste, dando como resultado una variación aleatoria en los valores de los píxeles en la imagen RS. En muchos casos el ruido relacionado con el sistema se debe en mayor medida al ruido térmico asociado con la electrónica de los sensores. Este tipo de ruido puede ser modelado mediante ruido aditivo gaussiano de media cero [10, 11].

El modelo de la observación de un sistema activo RS del campo de ondas u mediante la especificación de la ecuación estocástica de observación (EO, *equation of observation*) de un operador forma [10, 12 - 14]

$$u = \Sigma e + n \quad (1)$$

donde $e = e(r)$ representa la función de dispersión compleja sobre la superficie de prueba $R \ni r$, es el ruido aditivo, $u = u(p)$ representa la señal de observación, $p = (t, \mathbf{p})$ define los puntos de tiempo (t)-espacio ($\mathbf{p}$) en el dominio de observación espacial-temporal, Σ define un mapeo del espacio de señal fuente (R) en el espacio de señal de observación (P) [10].

En el caso de los escenarios operacionales inciertos, el operador formador de señal (SFO, *signal formation operator*) Σ es aleatoriamente perturbado, es decir,

$$\tilde{\Sigma} = \Sigma + \Delta \Sigma \quad (2)$$

donde $\Delta \Sigma$ representa las perturbaciones aleatorias incontroladas, usualmente con estadísticas *desconocidas*.

El radar RS SAR orientado al sistema dimensional finito (es decir, en forma discreta) puede ser aproximado mediante la siguiente EO [1, 10, 12 - 14]

$$\mathbf{u} = \tilde{\Sigma} \mathbf{e} + \mathbf{n} = \Sigma \mathbf{e} + \Delta_{\Sigma} \mathbf{e} + \mathbf{n} \quad (3)$$

en la que la matriz del SFO perturbado $\tilde{\mathbf{S}} = \mathbf{S} + \Delta_S$ es la aproximación discreta —forma del SFO integral (2) para el escenario operacional con incertidumbres—, y $\mathbf{e}$, $\mathbf{n}$, $\mathbf{u}$ representan vectores de media cero compuestos de los coeficientes $\{e_k, n_m, u_m; k = 1, \dots, K, m = 1, \dots, M\}$, respectivamente [10]. Estos vectores son caracterizados por las matrices de correlación [10, 12 - 14],

$$\mathbf{R}_e = \mathbf{D} = \mathbf{D}(\mathbf{b}) = \text{diag}(\mathbf{b}) \quad (4)$$

(una matriz diagonal con el vector $\mathbf{b}$ en su diagonal principal) [10, 12 - 14],

$$\mathbf{R}_u = \left\langle \tilde{\mathbf{S}} \mathbf{R}_e \tilde{\mathbf{S}}^+ \right\rangle_{p(\Delta_S)} + \mathbf{R}_n \quad (5)$$

respectivamente, donde $\langle \cdot \rangle_{p(\Delta_S)}$ define el cálculo del promedio realizado sobre la aleatoriedad de Δ_S caracterizado por la función de densidad de probabilidad (pdf, *probability density function*) $p(\Delta_S)$, y el superíndice “+” destaca la operación Hermitiano conjugado. El vector $\mathbf{b}$ compuesto de los elementos [10, 12 - 14],

$$b_k = \mathbf{B} \{e_k\} = \left\langle e_k e_k^* \right\rangle = \left\langle |e_k|^2 \right\rangle; k = 1, \dots, K \quad (6)$$

es referido como una aproximación en forma vectorial K -D del patrón de espectro espacial de potencia del campo disperso (ssp, *spatial spectrum pattern*), donde $\mathbf{B}$ representa el operador promedio estadístico de segundo orden. La ssp vector $\mathbf{b}$ es asociado con los pixeles de la imagen en orden lexicográfico. La correspondiente imagen rectangular convencional de $K_x \times K_y$ [10, 12 - 14]

$$\mathbf{B} = \{b(x, y), x = 1, \dots, K_x; y = 1, \dots, K_y\} \quad (7)$$

se relaciona con su representación en forma vectorial bordenado lexicográficamente [10, 12 - 14].

Detección de cambios basada en la Red Neuronal de Pulso Acoplado

La Red Neuronal de Pulso Acoplado (PCNN, Pulse Coupled Neural Network) es un modelo basado en el modelo Eckhorn, a excepción de unas pocas modificaciones menores requeridas por la digitalización. Los primeros experimentos demostraron que PCNN podía procesar imágenes invariantes en la salida, representativo de imágenes que se han desplazado, rotado, escalado y sesgado [15, 16].

Una neurona PCNN, mostrada en la figura 3, contiene dos compartimientos principales [15, 16]: el compartimiento *Feeding* y el compartimiento *Linking*.

Cada uno de ellos se comunica con las neuronas vecinas a través de los campos de pesos sinápticos **Q** y **R**, respectivamente, los cuales siguen tradicionalmente un patrón muy simétrico y gaussiano; sin embargo, no es un requisito estricto. Cada uno retiene a su estado anterior, pero con un factor de decaimiento. Sólo el compartimiento *Feeding* recibe el estímulo de entrada *G*. Los valores de estos dos compartimientos están determinadas por [15, 16]

$$F_{ij} = e^{\alpha_F \delta_n} F'_{ij} + G_{ij} + \omega_F \sum_{k,l=1}^{M,N} Q_{ijkl} V'_{kl} \quad (8)$$

$$L_{ij} = e^{\alpha_L \delta_n} L'_{ij} + \omega_L \sum_{k,l=1}^{M,N} R_{ijkl} V'_{kl} \quad (9)$$

donde F_{ij} y F'_{ij} son los compartimientos *Feeding* de la neurona (i,j) de la matriz en 2D en el estado actual n y el estado anterior $n - 1$ respectivamente, L_{ij} y L'_{ij} son los compartimientos *Linking* de la neurona (i,j) de la matriz en 2D en el estado actual n y el estado anterior $n - 1$ respectivamente. V'_{ij} es la salida de la neurona en una iteración anterior $n - 1$ [15, 16]. Ambos compartimientos tienen una memoria del estado anterior, que se descompone en el tiempo por el término exponente. Las constantes de ω_F y ω_L son constantes de normalización y los parámetros α_F , α_L y δ_n corresponden a constantes de decaimiento. Si los campos receptivos **Q** y **R** cambian, entonces estas constantes se utilizan para escalar la correlación resultante para evitar la saturación [15, 16].

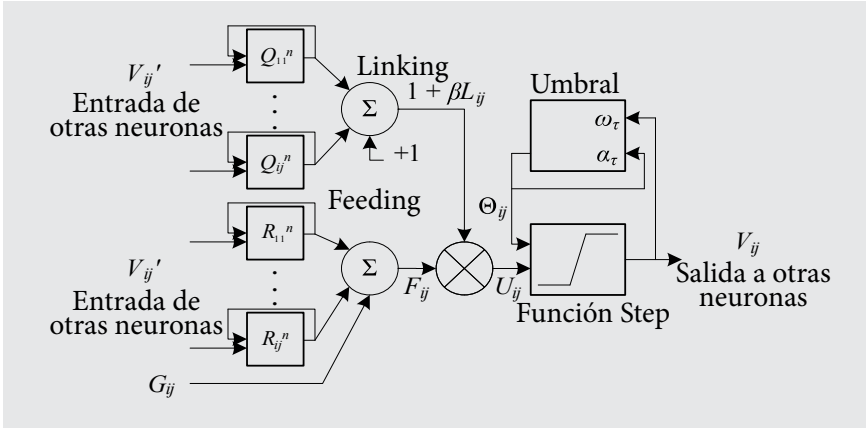


Figura 3. Diagrama esquemático de la estrategia Pulse Coupled Neural Network [16].

Los estados de estos dos compartimientos son combinados en un segundo orden para crear el estado interno de la neurona, U_{ij} . La combinación es controlada por la fuerza *Linking*, β . La actividad interna se calcula mediante la siguiente expresión [15, 16]

$$U_{ij} = F_{ij} (1 + \beta L_{ij}) \quad (10)$$

El estado interno de la neurona es comparada con un umbral dinámico Θ_{ij} , para producir la salida V_{ij} dada por [15, 16]

$$V_{ij} = \begin{cases} 1 & U_{ij} > \Theta_{ij} \\ 0 & \text{otra manera} \end{cases} \quad (11)$$

El umbral es dinámico, la neurona sobrepasa el umbral ($V_{ij} > \Theta_{ij}$), aumenta significativamente su valor. Este valor decae hasta que la neurona se sobrepasa de nuevo. Este proceso se describe por [15, 16]

$$\Theta_{ij} = e^{\alpha_{\Theta} \delta_n} \Theta'_{ij} + \omega_{\Theta} V'_{ij} \quad (12)$$

donde ω_{Θ} es la constante de normalización, que debe tomar valores mayores que el valor medio de la matriz $\mathbf{U}$, con la finalidad de lograr detecciones en el umbral.

La figura 4 muestra, a través de resultados cualitativos, las desventajas de incorporar la estrategia PCNN en teorías aplicadas a escenarios espaciales de gran tamaño.

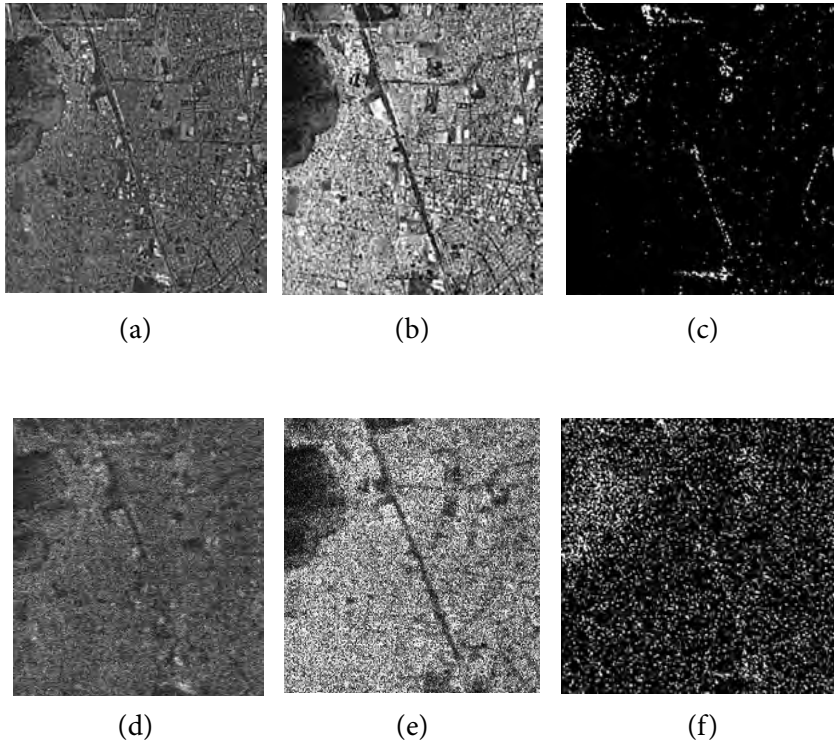


Figura 4. Resultado cualitativo de la aplicación PCNN en imágenes RS: (a) primer escenario original capturado en 2006, (b) segundo escenario original capturado en 2009, (c) detección de cambios de la aplicación PCNN con objetivos deseables (d) degradación del primer escenario (a) a 5 dB, (e) degradación del segundo escenario (b) a 5 dB, (f) detección de cambios de la aplicación PCNN con alarmas falsas incorporadas.

Red neuronal Hopfield modificada

La aproximación basada en NN está diseñada para minimizar el problema de programación cuadrática, y la red generalizada Hopfield puede ser apli-

cada para este caso [6]. La forma general de un problema de programación cuadrática puede definirse de la siguiente manera [6, 16, 17]:

Minimizar la función de energía asociada con la red neuronal dada por

$$E = -\frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{W} \mathbf{x} - \boldsymbol{\theta} \mathbf{x} \quad (13)$$

donde $\mathbf{W}$ es una matriz de $K \times K$ correspondiente a los pesos de interconexión (pesos sinápticos W_{ki}) de cada neurona (píxeles) en la NN, $\mathbf{x}$ es el vector de entrada en orden lexicográfico $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_K)^T$ de la NN, y $\boldsymbol{\theta}$ es el vector de entrada bias $K \times 1$ correspondiente de cada neurona [6, 17].

Comparando la ecuación (13) con la medida del error de mínimos cuadrados restringidos (CLS, *constrained least square*) [6, 17], podemos observar cierta similitud entre las funciones, teniendo la siguiente expresión [6, 17]:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \left(q_k - \sum_{i=1}^K \Phi_{ki} \hat{b}_i \right)^2 + \frac{1}{2} \lambda \sum_{k=1}^K \left(\sum_{i=1}^K C_{ki} \hat{b}_i \right)^2 \quad (14)$$

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K q_k^2 - \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^K q_k \Phi_{ki} \hat{b}_i + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K \Phi_{ki} \hat{b}_i \Phi_{kj} \hat{b}_j + \frac{1}{2} \lambda \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K C_{ki} \hat{b}_i C_{kj} \hat{b}_j \quad (15)$$

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K \left(\sum_{k=1}^K \Phi_{ki} \Phi_{kj} + \lambda \sum_{k=1}^K C_{ki} C_{kj} \right) \hat{b}_i \hat{b}_j - \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^K q_k \Phi_{ki} \hat{b}_i + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K q_k^2 \quad (16)$$

Expandiendo (13) tenemos [6, 17]

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^K W_{ki} x_k x_i - \sum_{i=1}^K \theta_k x_k \quad (17)$$

Al igualar los términos en las ecuaciones (16) y (17), se encuentra que el modelo de la NN puede ser igualado a la función de costo CLS [6, 17], donde

$$\mathbf{W} = -\boldsymbol{\Phi}^T \boldsymbol{\Phi} - \lambda \mathbf{C}^T \mathbf{C}; \quad \boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\Phi}^T \mathbf{q} \quad (18)$$

$$y \quad const = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K q_k^2 \quad (19)$$

donde la variable *const* es un término constante e independiente de *b* que puede ser despreciado, por lo cual no afecta el problema de optimización (16), W_{ij} es el peso de interconexión entre los pixeles de *i* y *j*, θ_i es la entrada bias de la neurona (pixel) *i* [6, 17].

Utilizando el concepto de la Red Neuronal Hopfield Modificada (MHNN, *Modified Hopfield Neural Network*) es posible trasladar el problema de reconstrucción de imagen basado en ME en un problema relevante de minimización de la función de energía (13) a través de la especificación correspondiente de sus parámetros **W** y **θ** [6, 17].

Limitaciones del modelo de Hopfield

Existen varios problemas asociados con la aplicación de la red dinámica del tipo Hopfield que han sido descritos por varios autores [5]. Donde los problemas más importantes son [6, 17]:

- La cantidad limitada de datos que se pueden almacenar en la memoria.
- La necesidad de que los datos aprendidos sean ortogonales entre sí.
- El número de informaciones que pueden ser procesadas se encuentra severamente limitado.

En una MHNN, el número de informaciones que pueden ser procesadas se encuentra severamente limitado. Si se almacena una gran cantidad de información durante su funcionamiento, la red puede converger en valores de salida completamente diferentes de los capturados durante la etapa de entrenamiento, debido a que la asociación entre la información presentada en la entrada de la red y la información almacenada por la misma se realiza en forma incorrecta, pues se está asociando dicha información de entrada con otra información completamente desconocida [17].

Consideraciones computacionales de la red MHNN

La estructura computacional de la red MHNN puede representarse mediante la figura 15, que representa el uso de cada uno de los $K_x \times K_y$ pixeles de la imagen RS para calcular únicamente el k -ésimo pixel de la imagen resultante restaurada con la misma dimensión $K_x \times K_y$ [6, 11].

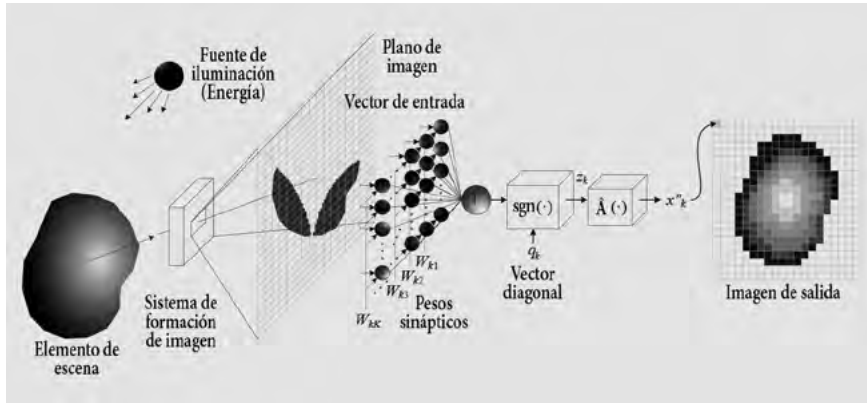


Figura 5. Estructura computacional MHNN para la reconstrucción por pixel.

Este proceso de reconstrucción nos determina el uso de $K_x \times K_y$ iteraciones para formar la imagen RS completa de $K_x \times K_y$ en el primer proceso de reconstrucción, sin realizar una retroalimentación [6, 11].

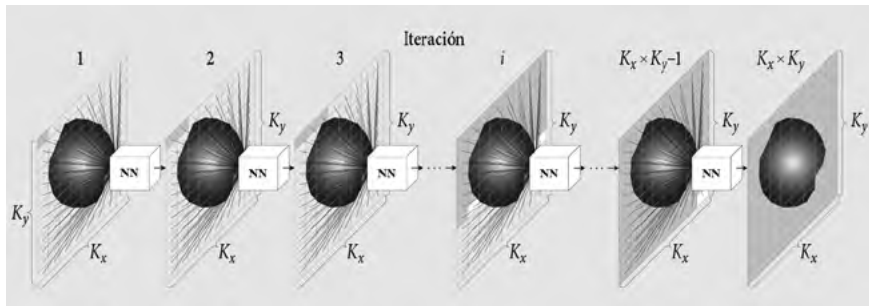


Figura 6. $K_x \times K_y$ etapas de reconstrucción por pixel de la imagen RS.

Una de las grandes limitantes en el uso de NN (presentes en esta estructura) es el excesivo uso de memoria y el largo tiempo de ejecución para la

realización de un proceso específico. Esta problemática nos limita a continuar las investigaciones en métodos de reconstrucción de imágenes RS dedicados, puesto que la estrategia desarrollada dedicada a la reconstrucción de imágenes RS presenta mejores resultados en estos dos aspectos, dejando a un lado las investigaciones de las NN [6, 11].

Las ventajas de utilizar esta estructura computacional planteada previamente, reside en la dimensión de la matriz de pesos W y en la reconstrucción efectiva por píxeles, la cual consiste en obtener un resultado de reconstrucción óptimo por píxel tanto cualitativo como cuantitativo en una sola iteración [6, 11].

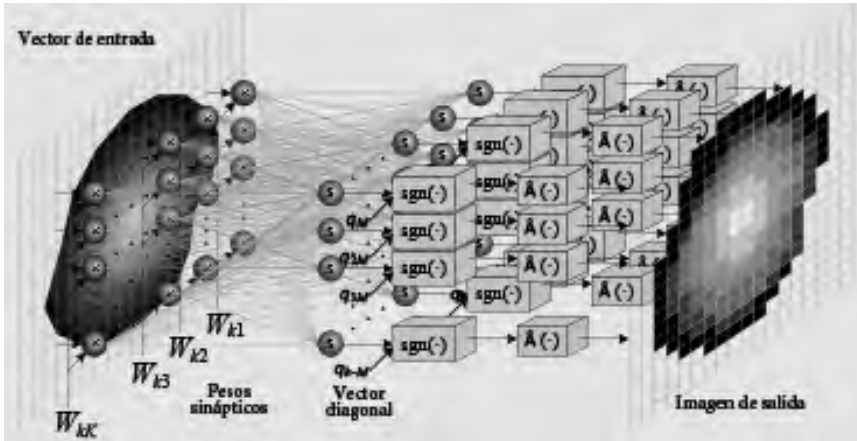


Figura 7. Estructura computacional de la red MHNN para la reconstrucción de imágenes RS a través del conjunto de píxeles.

Por otro lado, existe otra metodología de reconstrucción con la misma estructura computacional, la cual consiste en realizar el proceso de reconstrucción aplicado a imágenes RS en un solo proceso de ejecución de mayor dimensión [6, 11].

Esta metodología permite realizar el proceso de reconstrucción a través de la aplicación del conjunto de píxeles en la entrada de la red, mediante la construcción de la matriz de peso W a través del producto Kronecker en un solo proceso, para formar la imagen completa sin retroalimentación [6, 11].

La operación descrita previamente puede ser representada mediante la formación de una matriz de entrada X (compuesta de elementos x) de

dimensión $K_x^2 \times K_y^2$, multiplicado elemento por elemento (multiplicación *Schur Hadamard*) con la matriz W de la misma dimensión $K_x^2 \times K_y^2$.

Resultados y simulaciones realizadas

Las imágenes RS utilizadas fueron capturadas a través de la división GEO-Information de Astrium Services, la cual cuenta con acceso exclusivo a los datos de los satélites activos Pléiades 1A, SPOT y TerraSAR-X [18]. Se escogieron imágenes con resoluciones de 2048^2 píxeles para explotar al máximo las dimensiones de los métodos desarrollados en la utilización de las NN.

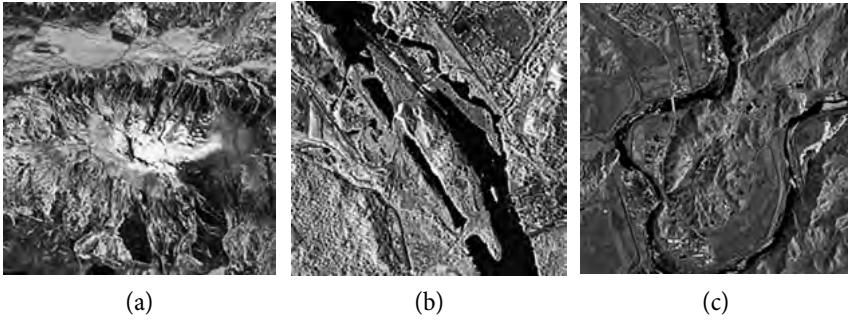


Figura 8. Imágenes RS obtenidas mediante Astrium Services, 20482 píxeles [18]: (a) volcán Eyjafjallajökull, Islandia, (b) Canal de Panamá, Panamá, (c) Jeolla del Norte, Corea del Norte.

Para poder conocer el desempeño de los algoritmos empleados se recurre a la utilización de la medida de evaluación cuantitativa basada en el promedio del error absoluto sobre cada pixel, MAE (*mean absolute error*) [12 - 14]:

$$MAE = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{K} \right) \sum_{k=1}^K |\hat{b}_k - b_k| \quad (20)$$

donde b_k es el valor del k -ésimo pixel de la imagen original b , $\hat{b}_k$ representa el valor del k -ésimo pixel de la imagen restaurada $\hat{b}$, cada una de dimensión $K = K_x \times K_y$. Cabe señalar que los valores numéricos fueron obtenidos a través de introducir diferentes parámetros aleatorios para cada escenario RS, considerando diferentes casos de contaminación mediante ruido gibbsiano de tipo

aditivo, *speckle* y ruido compuesto (aditivo y *speckle*), obtenidos a través del Laboratorio Virtual VRSL, creado mediante la interfaz de GUIDE en la plataforma de MATLAB®. Los resultados cualitativos de simulación se muestran en la figura 9.

Cabe señalar que es necesario realizar un análisis de la dimensión de memoria utilizada de las diferentes estructuras computacionales previamente analizadas [19].

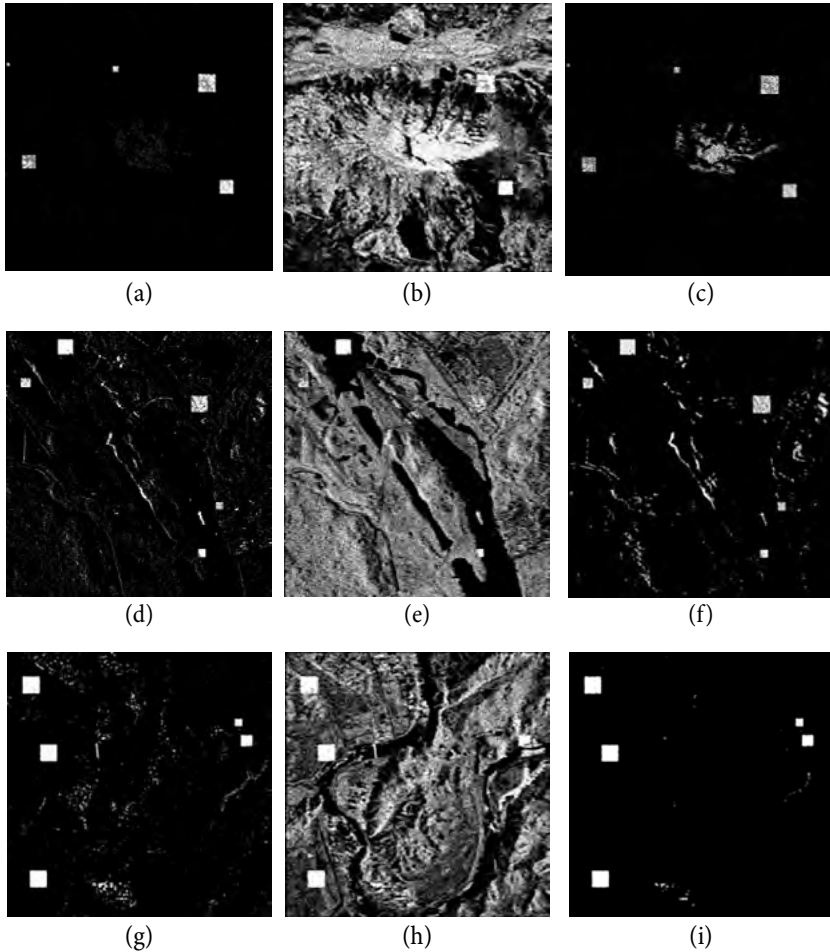


Figura 9. (a), (d), (g) Detección de cambios aplicando la estrategia PCNN a figura 8 (a), (b) y (c), respectivamente; (b), (e), (h) detección de cambios aplicando la estrategia PCNN a las degradaciones de figura 8 (a), (b) y (c) en 5 dB, respectivamente; (c), (f), (i) detección de cambios aplicando la estrategia PCNN y la estrategia MHNN a las degradaciones de las figuras 8 (a), (b) y (c) en 5 dB, respectivamente.

Tabla 3. Resultados comparativos de la métrica de desempeño MAE relacionado a diferentes métodos de reconstrucción y detección.**Se definieron los parámetros de PSF:****KT = 10 píxeles, KG = 30 píxeles, SNR = 5, 10 y 15 dB**

Escenario	Método	5 dB	10 dB	15 dB
Parque Nacional Turuépano, Venezuela. 20482 píxeles	Blurred MSF	15.0232	14.1111	13.4128
	BMR	14.5721	13.2127	12.0969
	DEDR	14.0420	11.9853	10.1118
	MHPC-NN	12.4471	11.1171	10.4026
Muzaffarabad, Pakistán. 20482 píxeles	Blurred MSF	16.4376	15.4330	14.5807
	BMR	15.9848	14.4642	12.9373
	DEDR	15.4615	13.1930	12.4395
	MHPC-NN	14.3982	13.1246	12.4051
El volcán Eyjafjallajökull, Islandia. 20482 píxeles	Blurred MSF	15.3577	13.6673	11.4820
	BMR	15.0270	12.7734	9.3734
	DEDR	14.6622	11.6356	8.4747
	MHPC-NN	13.1887	10.6786	8.4718
Puerto de Baltimore, Estados Unidos. 20482 píxeles	Blurred MSF	14.6764	13.5672	12.7102
	BMR	14.1971	12.5150	11.0164
	DEDR	13.6421	11.0919	9.3822
	MHPC-NN	12.0600	10.5648	9.6995
Canal de Panamá, Panamá. 20482 píxeles	Blurred MSF	15.9019	14.7976	13.4336
	BMR	15.5858	14.0534	11.8875
	DEDR	15.2385	13.1334	10.6335
	MHPC-NN	13.8145	11.8534	10.4350
Jeolla del Norte, Corea del Norte. 20482 píxeles	Blurred MSF	13.9080	11.9445	10.4143
	BMR	13.3973	10.5934	8.0453
	DEDR	12.8047	9.7173	7.4294
	MHPC-NN	11.2026	8.9405	7.4069

Tabla 4. Los correspondientes resultados cuantitativos de la complejidad operativa para diferentes estructuras operacionales MHNN. Para $K = K_x \times K_y$ [19]			
Estructura computacional	Iteración MHNN	Dimensión matricial	FLOPS
Actualización después de un proceso de iteración (reconstrucción por pixel)	$K_x^2 \times K_y^2$	$K_x \times K_y$	$K^2(2K - K_x + K_y)$
Actualización después de un proceso de ejecución (reconstrucción por conjunto de pixeles)	$K_x \times K_y$	$K_x^2 \times K_y^2$	$K^3(K_x^2 + K_y^2 - 1)$
Actualización aplicando el nuevo proceso de estructura computacional (reconstrucción por conjunto de pixeles)	$K_x \times K_y$	$K_x \times K_y$	$K(2K - K_x + K_y)$

En la figura 10 se muestran las tendencias de resultados que se tienen al incorporar las dimensiones de las matrices de entrada $K = K_x \times K_y$.

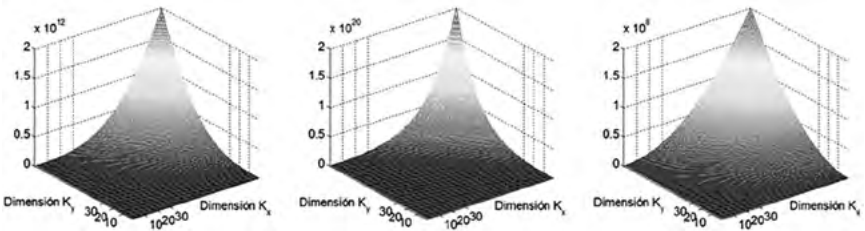


Figura 10. Resultados analíticos de las tendencias de resultados que se tienen al incorporar las dimensiones de las matrices de entrada $K = K_x \times K_y$ [19].

Los resultados de simulaciones numéricas de todos los métodos y algoritmos desarrollados que son objetivo de este trabajo, se comparan con resultados de algoritmos existentes competitivos para verificar la eficiencia en forma cualitativa y su realización práctica. Sin embargo es necesario destacar que los resultados obtenidos en la reconstrucción, dependen en gran parte de la imagen seleccionada, así como del escenario creado en dicha imagen.

Conclusiones

Después de analizar los diferentes métodos de reconstrucción de imágenes RS, se dedujo que los diferentes algoritmos en ocasiones no están lo suficientemente preparados para atacar los problemas del ruido multiplicativo presente en las imágenes RS. Se pueden destacar los siguientes puntos:

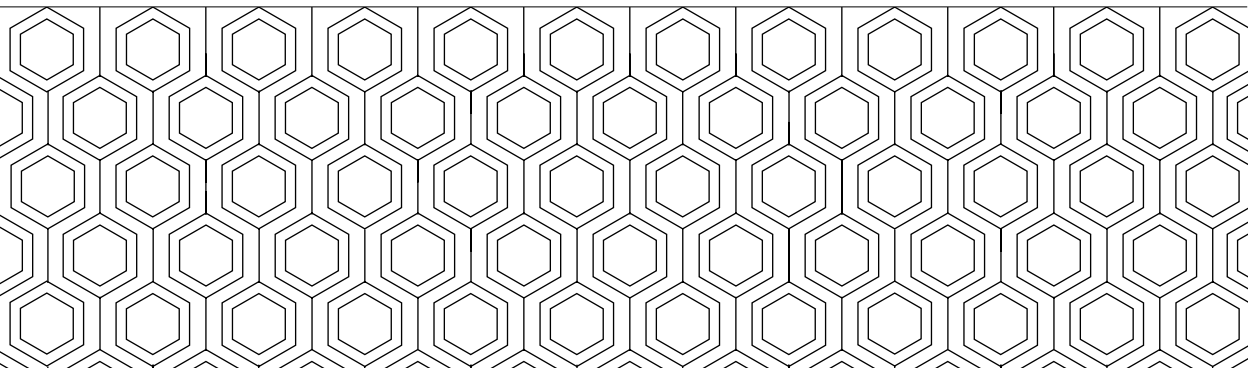
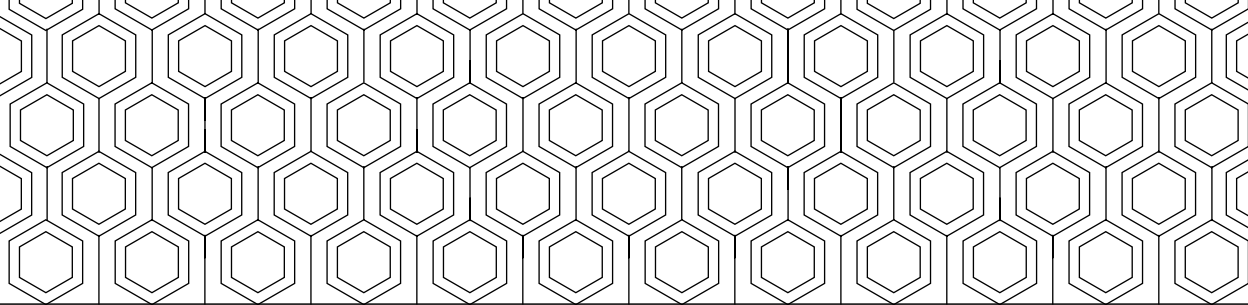
- Se desarrolló el método orientado a la detección de cambios (Change Detection, ChD) aplicado a imágenes RS, que minimice el error de detección de alarmas falsas (*false alarm*) en imágenes RS degradadas y/o reconstruidas a través de las estrategias PCNN.
- Se desarrolló y analizó el método MHPC-NN fusionado con ChD con arquitecturas NN adaptadas a los diferentes sistemas de RS.
- Se logró eficientar exitosamente el tiempo de procesamiento de los cálculos en los algoritmos bajo su implementación en la plataforma de MATLAB®, evaluado a través del análisis algorítmico de complejidad FLOP.
- Los resultados obtenidos (cuantitativos y cualitativos) demuestran que la aplicación de distintos parámetros de regularización en función de las estadísticas locales como lo es la varianza, supera a los métodos de restauración existentes más avanzados de RSF, CLS, AD, etc., mejorando la clasificación y la detección de cambios en imágenes RS degradadas.

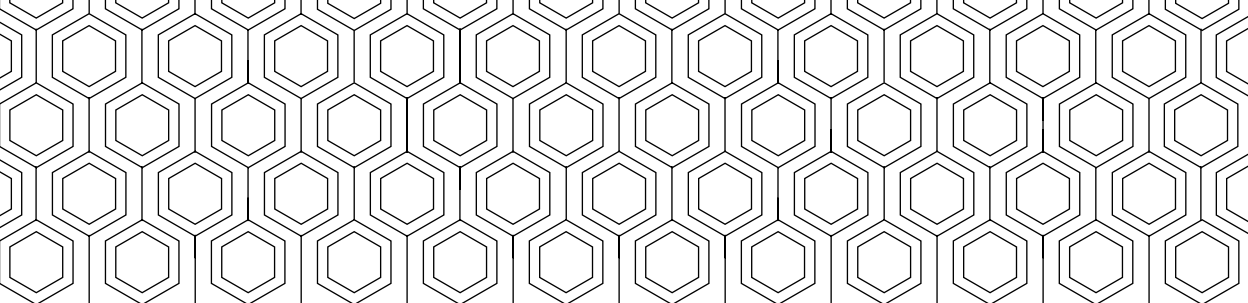
Referencias

- [1] F. M. Henderson and A. V. Lewis, *Principles and Applications of Imaging Radar*, 3rd. ed. New York: Wiley, 1998.
- [2] Y. V. Shkvarko, H. Perez-Meana H., and A. Castillo-Atoche, "Enhanced radar imaging in uncertain environment: A descriptive experiment design regularization approach", *International Journal of Navigation and Observation*, vol. 2008, pp. 1-11, 2008.
- [3] Goddard Space Flight Center, "The Remote Sensing Tutorial", 2006. [Online.] Available: <http://rst.gsfc.nasa.gov>.
- [4] L. J. Morales-Mendoza, R.F Vazquez-Bautista and Y. V. Shkvarko, "Unifying the maximum entropy and variational analysis regularization methods for reconstruction of the remote sensing imagery", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 3, no. 4, pp. 36-49, 2005, October 2005.

- [5] Y. V. Shkvarko, “Unifying regularization and bayesian estimation methods for enhanced imaging with remotely sensed data—part ii: implementation and performance issues”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 42, no. 5, May 2004.
- [6] S. W. Perry, H. S. Wong y L. Guan, *Adaptive Image Processing, A Computational Intelligence Perspective*, Florida: CRC Press, 2002.
- [7] H. Aanæs, J. R. Sveinsson and A. A. Nielsen, “Model-Based satellite image fusion”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 46, issue 5, pp. 1336-1346, 2008.
- [8] B. Waske and S. V. D. Linden, “Classifying multilevel imagery from sar and optical sensors by decision fusion”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 46, issue 5, pp. 1457-1466, 2007.
- [9] Proyecto satelital colombiano de observación de la Tierra/Comisión Colombiana del Espacio –CCE, “Sistemas RS, cómputo, control, diseño y simulación de la órbita; de satélites de observación de la Tierra”, 2012. [Online.] Available: www.cce.gov.co.
- [10] E. Chuvieco and A. Huete, *Fundamentals of Satellite Remote Sensing*, Ohio: CRC Press, December 2009.
- [11] J. R. Jensen, *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*, 3ra. ed., Prentice Hall, 2005.
- [12] Y. Shkvarko, J. Tuxpan, and S. Santos, “Dynamic experiment design regularization approach to adaptive imaging with array radar/SAR sensor systems”, *Open Access Sensors*, vol. 11, no. 5, September 2010.
- [13] Y. Shkvarko, S. Santos, and J. Tuxpan, “Resolution-enhanced radar/SAR imaging: an experiment design framework combined with neural network-adapted variational analysis regularization”, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2011, no. 1, pp. 1-11, 2011.
- [14] Y. Shkvarko, J. Tuxpan, and S. Santos, “Structured descriptive experiment design regularization based enhancement of fractional sar imagery”, *Signal Processing*, vol. 93, issue 12, pp. 3553-3566, December 2013.
- [15] “A pulse-coupled neural network as a simplified bottom-up visual attention model”, class notes for Department of Computer Science, Institute of Mathematics and Computer Science, 2006.
- [16] T. Lindblad and J. M. Kinser, *Image Processing Using Pulse-Coupled Neural Networks*, 2nd. ed. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1998, 2005.

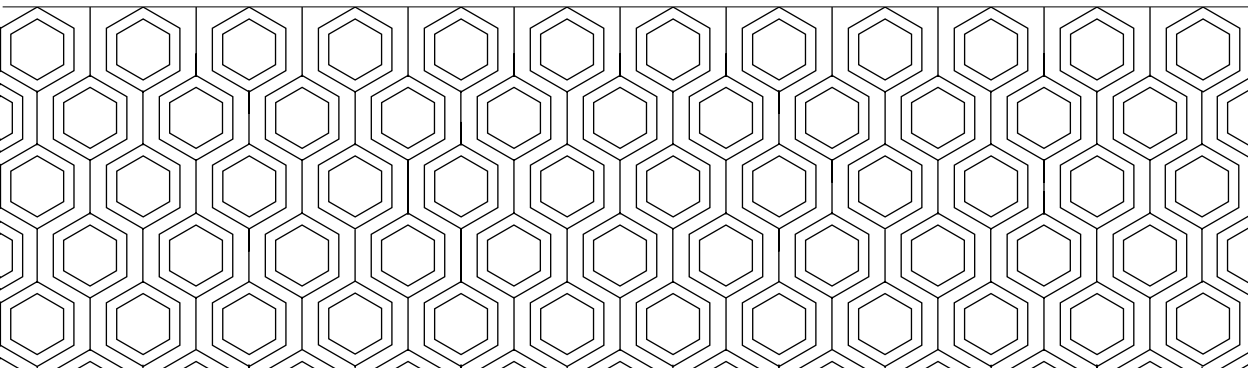
- [17] J. K. Paik, and A. K. Katsaggelos, “Image restoration using a modified hopfield network”, *IEEE Transactions on Image Processing*. vol. 1, no. 1, January 1992.
- [18] GEO-Information de Astrium Services, EADS Company. [Online.] Available: www.astrium.eads.net.
- [19] Gene H. Golub and Charles F. van Van Loan, *Matrix Computations*. Johns Hopkins studies in mathematical sciences, 1996.

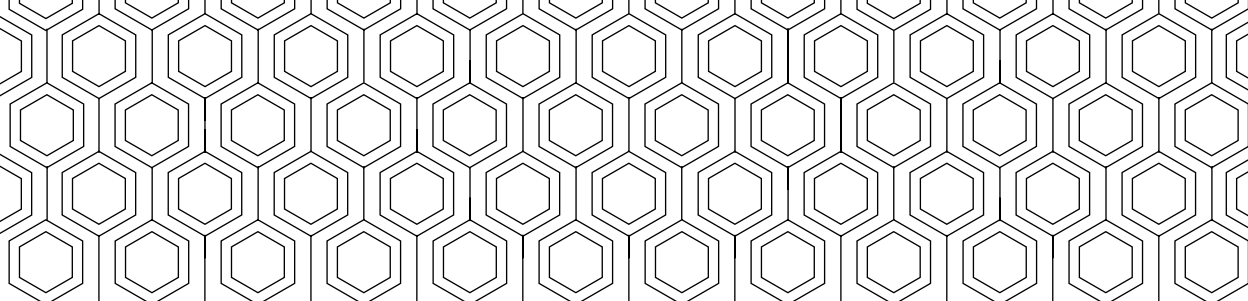




Capítulo II.

Matemáticas





Los últimos veinte años en la teoría de grupos finitos

ALONSO CASTILLO RAMÍREZ

PROFESOR VISITANTE EN LA UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

Actualmente es común usar el nombre *matemáticas puras* para referirse al área de las matemáticas que estudia conceptos abstractos, dejando de lado sus aplicaciones y conexiones con el mundo natural. Estos conceptos abstractos pueden estar inspirados en objetos o fenómenos reales, pero, en cada teoría, quedan establecidos mediante una definición rigurosa. Por ejemplo, en la teoría axiomática de conjuntos, el número 0 es, por definición, igual al conjunto vacío $0 := \emptyset$,¹ mientras que los números 1 y 2 están definidos como $1 := \{\emptyset\}$ y $2 := \{\{\emptyset\}, \emptyset\}$. Estas definiciones podrían parecer arbitrarias, pero brindan un enfoque sistemático para la construcción de todos los números naturales usando la teoría de conjuntos. A partir de estas definiciones es posible desarrollar una teoría consistente que describe muchas propiedades esenciales de los números.

En matemáticas puras, una teoría consiste en una lista de definiciones y axiomas (también llamados postulados), los cuales establecen algunas de las propiedades que satisfacen los objetos de estudio. El trabajo de un matemático puro consiste en usar estos dos elementos, las definiciones y los axiomas, para demostrar teoremas, los cuales describen propiedades no evidentes de los objetos de estudio. El ejemplo clásico de una teoría axio-

¹ El símbolo “:=” significa que dos objetos matemáticos son iguales por definición.

mática es la geometría euclidiana, desarrollada por el matemático griego Euclides en el siglo III antes de Cristo. Euclides comenzó su teoría con 23 definiciones (de conceptos como punto, línea y superficie) y 10 axiomas (algunos de los cuales llamó “nociones comunes”). Su famoso quinto postulado, el postulado de las paralelas, fue reemplazado por matemáticos del siglo XIX para dar pie a otras teorías que describen el comportamiento de la geometría en otros contextos. Uno de los ejemplos más notables de estas teorías es la geometría elíptica, en la cual todas las líneas se interceptan y por lo tanto no existen líneas paralelas. La geometría elíptica describe el comportamiento de líneas y superficies sobre una esfera (en lugar de sobre un plano, como en la geometría euclidiana), y tuvo gran relevancia en el desarrollo de la teoría de la relatividad general de Einstein.

Algunas de las áreas principales de las matemáticas puras son las siguientes: el *álgebra*, que estudia estructuras como los grupos, anillos, campos y espacios vectoriales; el análisis, que estudia los números reales y complejos y las funciones analíticas; la *geometría*, que estudia espacios y formas; y la *teoría de números*, que estudia los números enteros. La investigación de los últimos años en matemáticas puras se ha enfocado en la comprensión de las propiedades de objetos abstractos, así como en su generalización, simplificación y clasificación. También se han obtenido algunos resultados sorprendentes mediante la conexión de ideas que surgen en distintas áreas de las matemáticas puras.

La *teoría de grupos* es una rama del álgebra. Sin preocuparnos por ahora por las definiciones técnicas, podemos afirmar que la teoría de grupos es el estudio sistemático de la simetría. Intuitivamente, definimos una simetría de un objeto como una transformación del mismo que no altera su forma ni su estructura. Esto concuerda con las ideas más intuitivas: objetos como las flores y las alas de las mariposas son simétricos porque admiten simetrías (como rotaciones y reflexiones). El grupo de simetrías de un objeto es simplemente el conjunto de todas sus simetrías. Así pues, el grupo de simetrías de un cuadrado en dos dimensiones tiene ocho elementos: rotaciones de 0, 90, 180 y 270 grados, y reflexiones a través del eje vertical, horizontal y las dos diagonales. Por otro lado, el grupo de simetrías de un círculo en dos dimensiones tiene un número infinito de elementos, ya que cualquier rotación es una simetría. La teoría de grupos tiene importantes aplicaciones en el estudio de la simetría molecular, la física teórica y la criptografía.

La *definición formal de grupo* es: sea G un conjunto no vacío equipado con una operación binaria; la cual asigna a cualquier par de elementos a y b de G , un elemento $a \cdot b$ en G . Decimos que G es un *grupo* si se cumplen los siguientes axiomas:

1. Para cualesquiera a, b y c en G , se tiene que $a \cdot (b \cdot c) = (a \cdot b) \cdot c$.
2. Existe un elemento e en G tal que $e \cdot a = a$ para cualquier a en G .
3. Para cualquier a en G existe un elemento b en G tal que $a \cdot b = e$.

El primer axioma de la definición anterior se conoce como la propiedad asociativa. Al elemento e del segundo axioma se le llama la identidad del grupo, y al elemento b del tercer axioma se le llama el inverso de a . Uno de los ejemplos más sencillos de un grupo es el conjunto de los números enteros equipado con la suma, donde la identidad del grupo es 0 y el inverso de un número m es $-m$. A simple vista, podría parecer que la definición anterior de grupo se encuentra lejana del concepto de simetrías; sin embargo, ambos conceptos son equivalentes: es posible demostrar que los conjuntos de simetrías de objetos matemáticos son grupos, y que cualquier grupo es el conjunto de simetrías de por lo menos un objeto matemático.²

Por ejemplo, podemos convencernos de que el conjunto de las ocho simetrías de un cuadrado en dos dimensiones equipado con la composición de transformaciones es un grupo cuya identidad es la rotación de 0 grados. En este caso, la rotación de 90 grados es el inverso de la rotación de 270 grados, y viceversa, mientras que los inversos de las rotaciones de 0 y 180 grados, y de las cuatro reflexiones, son ellos mismos.

El primer gran triunfo de la teoría de grupos se debe al matemático francés Évariste Galois, quien, en 1832, a la corta edad de 20 años, escribió uno de los documentos más brillantes de la historia de la humanidad. La idea de Galois consistió en examinar los grupos de simetrías de las soluciones de ecuaciones polinómicas (es decir, ecuaciones del tipo $a_n x^n + \dots + a_1 x + a_0 = 0$). De esta manera, las dos soluciones de una ecuación polinómica de grado 2 tienen máximo dos simetrías: la simetría trivial, que no altera las soluciones, y la simetría que las intercambia. El gran teorema de Galois establece que es posible resolver una ecuación polinómica -usando sumas,

² Aquí, por objetos matemáticos entendemos figuras geométricas, gráficas, espacios vectoriales, ecuaciones, etcétera.

restas, multiplicaciones, divisiones y raíces- si y sólo si su grupo de simetrías es soluble. Más allá del significado de la palabra *soluble* en este contexto, el cual estableceremos más adelante, el teorema de Galois es sorprendente porque ilustra los alcances del estudio sistemático de las simetrías de un objeto matemático. En particular, este teorema explica de forma definitiva una pregunta centenaria: ¿por qué siempre es posible resolver ecuaciones polinómicas de grados 1, 2, 3 y 4, pero no siempre es posible resolver ecuaciones polinómicas de grado mayor o igual que 5? La respuesta es porque el grupo de simetrías de un polinomio de grado 1, 2, 3 o 4 siempre es soluble, mientras que, cuando el grado es mayor, existen ejemplos de polinomios cuyos grupos de simetrías no son solubles.³

Una de las tareas favoritas de los matemáticos es clasificar los objetos que estudian. Así pues, el objetivo más ambicioso de la teoría de grupos es la clasificación de los grupos de simetrías de todos los objetos matemáticos en cualquier dimensión. El primer paso importante en esta dirección fue el descubrimiento de que cualquier grupo puede descomponerse en un conjunto de *factores de composición*, los cuales son grupos simples en el sentido de que no pueden descomponerse más. Este procedimiento es, en cierta forma, análogo a la factorización de los números naturales en factores primos. Sin embargo, la situación no es tan satisfactoria para los grupos ya que sus factores de composición no lo determinan completamente; es decir, pueden existir dos grupos distintos con los mismos factores de composición, cosa que no ocurre en el caso de la factorización de los números naturales. De cualquier manera, los grupos simples han sido llamados por algunos matemáticos, como Mark Ronan [2], los “átomos de la simetría”, ya que representan los bloques indivisibles que componen a todos los demás grupos. En particular, decimos que un grupo G es soluble si sus factores de composición $\{C_i\}$ son grupos *abelianos*; es decir, si para cualesquiera c y d en C_i , tenemos que $c \cdot d = d \cdot c$.

Por la discusión del párrafo anterior, la clasificación de los grupos de simetrías de todos los objetos matemáticos se reduce, en cierta forma, a la clasificación de los grupos simples. Definimos el orden de un grupo como su número de elementos. La clasificación completa de los grupos simples cuyo orden es infinito parece aún estar muy lejos. Sin embargo, uno de los más

³ Para saber más sobre esto, el libro *Galois Theory* [1] es una excelente introducción a la teoría de Galois.

grandes logros de las matemáticas de finales del siglo xx fue la clasificación completa de los grupos simples de orden finito. La demostración de este resultado fue anunciada por Daniel Gorenstein en 1983 [3] como el esfuerzo combinado de más de cien matemáticos cuyo trabajo había sido publicado en más de 500 artículos de investigación. Sin embargo, poco después, la comunidad matemática se dio cuenta que algunos resultados técnicos aún hacían falta. La demostración completa fue anunciada por Michael Aschbacher en 2004 [4] después de haber publicado, junto con Stephen Smith, un artículo de 1,221 páginas que completaba los últimos detalles.

El *teorema de clasificación de los grupos finitos simples* es: cualquier grupo finito simple tiene la misma estructura que alguno de los siguientes grupos:

1. Un grupo de orden primo.
2. Un grupo alternante de grado mayor o igual que 5.
3. Un grupo finito de tipo Lie.
4. Uno de los 26 grupos esporádicos.

El primer caso es el más elemental. El teorema de Lagrange⁴ sobre grupos finitos establece que el orden de un subgrupo siempre divide al orden del grupo en donde está contenido. Por ejemplo, el subconjunto de rotaciones es un subgrupo del grupo de simetrías del cuadrado; en este caso, el orden del subgrupo es 4 y el orden del grupo es 8, lo cual evidentemente cumple que 4 divide a 8. Como los únicos divisores de un número primo son 1 y él mismo, usando el teorema de Lagrange podemos demostrar que un grupo de orden primo no puede ser descompuesto de forma no trivial en factores de composición.

Los grupos del segundo caso ya habían aparecido en los estudios de Galois y tienen una conexión directa con los grupos de simetrías de polinomios que no son solubles. Podemos ver a los grupos alternantes como conjuntos de funciones biyectivas sobre conjuntos finitos.

Los grupos del tercer caso hacen referencia al matemático noruego Sophus Lie y son más complicados que los grupos de orden primo y los alternantes. A grande rasgos, un grupo finito de tipo Lie es un grupo de matrices con entradas en algún campo finito. Recordemos que un campo es un conjunto equipado con dos operaciones binarias, una suma y una multiplicación, que

⁴ Nombrado así en honor al matemático francés Joseph-Louis Lagrange.

satisfacen las leyes básicas de la aritmética. Los ejemplos más sencillos de campos finitos son conjuntos de números enteros equipados con la suma y multiplicación módulo p , donde p es un número primo. Por ejemplo, el conjunto $\{0, 1\}$, donde $1 + 1 = 0 \pmod{2}$, es un campo finito con dos elementos. A pesar de que hay un número infinito de grupos finitos de tipo Lie, es posible clasificarlos en dos familias: los grupos clásicos y los excepcionales.

Finalmente, el cuarto caso recopila los grupos finitos simples “extraños”, que no pertenecen a ninguno de los casos anteriores. Sorprendentemente, existen exactamente 26 grupos esporádicos; ni uno más ni uno menos. La Tabla 1 muestra la lista de los grupos esporádicos, donde el orden de cada grupo está truncado para expresarlo en notación científica.

En 1985, dos años después del anuncio del teorema de clasificación, John Conway, Robert Curtis, Simon Norton, Richard Parker y Robert Wilson publicaron el libro *Atlas of finite groups*, el cual presentaba de forma sistemática gran cantidad de información sobre 93 grupos finitos simples, incluyendo todos los grupos esporádicos. Desde entonces, este libro se ha convertido en una referencia esencial para los investigadores en teoría de grupos.⁵

La clasificación de los grupos finitos simples implicó grandes avances en teoría de grupos. Típicamente, para demostrar teoremas que involucran propiedades de los grupos finitos, se ha adoptado la estrategia general de usar el teorema de clasificación para analizar cada uno de los casos. Además, algunas de las técnicas usadas en la demostración del teorema han dado pie a nuevas teorías axiomáticas, bajo las cuales han surgido interesantes objetos matemáticos, como los sistemas de fusión.

Tabla 1. Grupos esporádicos				
Núm.	Nombre	Símbolo	Orden	Comentarios
1	Mathieu 11	M_{11}	7920	Descubiertos por Émile Mathieu en 1861-1873
2	Mathieu 12	M_{12}	95040	
3	Mathieu 22	M_{22}	4×10^5	
4	Mathieu 23	M_{23}	1×10^7	
5	Mathieu 24	M_{24}	2×10^8	

⁵ Para conocer más detalles sobre los grupos finitos simples, el libro de Robert Wilson [5], uno de los autores del Atlas, es una excelente introducción.

Tabla 1. Grupos esporádicos				
Núm.	Nombre	Símbolo	Orden	Comentarios
6	Conway 1	Co_1	4×10^{18}	Descubiertos por John Conway en 1968
7	Conway 2	Co_2	4×10^{13}	
8	Conway 3	Co_3	4×10^{11}	
9	Fischer 22	Fi_{22}	6×10^{13}	Descubiertos por Bernd Fischer en 1971-1976
10	Fischer 23	Fi_{23}	4×10^{18}	
11	Fischer 24	Fi_{24}	1×10^{24}	
12	Janko 1	J_1	1×10^5	Construido por Zvonimir Janko en 1965
13	Janko 2	J_2	6×10^5	Construido por M. Hall y D. Wales en 1968
14	Janko 3	J_3	5×10^7	Construido por G. Higman y J. McKay en 1969
15	Janko 4	J_4	8×10^{19}	Construido por Simon Norton en 1980
16	Highman-Sims	HS	4×10^7	Descubierto por D. Higman y C. Sims en 1968
17	McLaughlin	McL	8×10^8	Descubierto por Jack McLaughlin en 1969
18	Held	He	4×10^9	Descubierto por Dieter Held en 1969
19	Rudvalis	Ru	1×10^{11}	Descubierto por Arunas Rudvalis en 1973

Tabla 1. Grupos esporádicos				
Núm.	Nombre	Símbolo	Orden	Comentarios
20	Suzuki	Suz	4×10^{11}	Descubierto por Michio Suzuki en 1969
21	O'Nan	O'N	4×10^{11}	Descubierto por Michael O'Nan en 1976
22	Harada-Norton	HN	3×10^{14}	Descubierto por K. Harada y S. Norton en 1975-1976
23	Lyons	Ly	5×10^{16}	Descubierto por Richard Lyons en 1972
24	Thompson	Th	9×10^{16}	Descubierto por John Thompson en 1976
25	Baby Monster	B	4×10^{33}	Construido por J. Leon y C. Sims en 1977
26	Monstruo	M	8×10^{53}	Construido por Robert Griess en 1982

Uno de los grupos esporádicos más extraordinarios es el llamado grupo *Monstruo*. Con más de 8×10^{53} elementos, número que es más grande que los átomos que hay en el sol, el Monstruo es el mayor de los grupos esporádicos. Su existencia fue conjeturada por primera vez en 1973 por los matemáticos Bernd Fischer y Robert Griess, pero éste último fue el primero en demostrar su existencia en 1982 [6, 7]. La demostración de Griess consistió en construir un objeto matemático, un álgebra conmutativa no asociativa de dimensión 196,884 llamada el álgebra de Griess, cuyo grupo de simetrías es el Monstruo. A grandes rasgos, un álgebra es un espacio vectorial equipado con una operación binaria; pensemos, por ejemplo, en el espacio vectorial R^3 equipado con el producto cruz de vectores. Una de las razones por las que el esfuerzo monumental de Griess no deja de sorprender es porque todos los cálculos fueron hechos a mano, sin ayuda de una computadora. Dos

años más tarde, John Conway [8] y Jaques Tits [9] presentaron simplificaciones independientes de la construcción del álgebra de Griess.

Una de las propiedades que hace aún más sorprendente al grupo Monstruo se relaciona con la famosa *conjetura Moonshine*. Antes de enunciar esta conjetura, presentaremos algunas definiciones necesarias. Decimos que un grupo G puede ser *representado linealmente* en dimensión k si existe un espacio vectorial V de dimensión k cuyo grupo de simetrías (transformaciones lineales invertibles de V en V) contiene a G . Decimos que la representación lineal es irreducible si G no está contenido en el grupo de simetrías de ningún subespacio (propio no trivial) de V .

En 1978, John McKay observó que los primeros coeficientes en la expansión de Fourier de la función modular j podían escribirse como combinaciones lineales de las dimensiones donde el Monstruo puede ser representado linealmente de manera irreducible. (La tabla 2 presenta algunas de estas combinaciones lineales.)

La observación de McKay era misteriosa y sorprendente porque conectaba dos áreas de las matemáticas aparentemente lejanas. John Conway y Simon Norton estudiaron en detalle esta observación [10] y acuñaron el término “conjetura Moonshine”, ya que en inglés la palabra *moonshine* suele usarse coloquialmente como sinónimo de ‘absurdo’. Así pues, el nombre “conjetura absurda” transmite en cierta forma los sentimientos de Conway y Norton hacia las observaciones de McKay.

Tabla 2. Conjetura Moonshine	
Dimensiones de las representaciones irreducibles del Monstruo	Coeficientes de Fourier de la función modular j
1	$1 = 1$
196,883	$196,884 = 196,883 + 1$
21,296,876	$21,493,760 = 21,296,876 + 196,883 + 1$
842,609,326	$864,299,970 = 2 \cdot 196,884 + 21,296,876 + 842,609,326$

La conjetura Moonshine mostró cierta evidencia sobre la existencia de un espacio de dimensión infinita cuyo grupo de simetrías es el Monstruo.

Los matemáticos Igor Frenkel, James Lepowsky y Arne Meurman fueron los primeros en lograr la construcción de tal espacio [11, 12]. Este nuevo objeto matemático, al cual llamaron *módulo Moonshine*, contiene el álgebra de Griess y satisface muchas propiedades excepcionales. Su descubrimiento inspiró la definición de una familia de objetos matemáticos completamente nueva, llamados álgebras de operadores vértice, los cuales presentan estrechas conexiones con la teoría conforme de campos en física cuántica. A grandes rasgos, un álgebra de operadores vértice es un espacio vectorial de dimensión infinita equipado con un número infinito de operaciones entre los vectores, las cuales deben satisfacer ciertos axiomas.

Los esfuerzos de Frenkel, Lepowsky y Meurman esclarecieron muchos misterios, pero no solucionaron por completo la conjetura Moonshine. Fue finalmente en 1992 cuando el matemático británico Richard Borcherds demostró la conjetura, usando técnicas provenientes de la teoría de cuerdas de física teórica y las álgebras generalizadas de Kac-Moody [13]. En 1998, la Unión Matemática Internacional reconoció el trabajo de Borcherds otorgándole la medalla Fields, el premio más prestigioso en matemáticas.

Aún hay muchos misterios sin resolver relacionados con el grupo Monstruo, el álgebra de Griess y el módulo Moonshine. La comunidad matemática aún no ha logrado comprender las razones de fondo sobre la existencia del Monstruo y sus inesperadas conexiones con la física teórica. Una de las nuevas direcciones que han tomado estas investigaciones sobre el Monstruo en años recientes es la *teoría de Majorana*, propuesta por Alexander Ivanov [14]. El objetivo de esta teoría es identificar algunas propiedades esenciales del Monstruo y el álgebra de Griess para estudiarlas en un contexto independiente.

Un álgebra de Majorana es un álgebra conmutativa no asociativa generada por un conjunto finito de *idempotentes* (es decir, vectores a tales que $a \cdot a = a$), llamados *ejes Majorana*, los cuales satisfacen seis axiomas. La motivación principal para esta definición es que sólo existen ocho álgebras de Majorana que son generadas por exactamente dos ejes Majorana; a estas álgebras se les conoce como las álgebras de Norton-Sakuma⁶. Los ocho tipos de álgebras de Norton-Sakuma se presentan dados en la tabla 3.

⁶ Nombradas así en honor a Simon Norton y Shinya Sakuma.

Tabla 3. Álgebras de Norton-Sakuma			
Tipo	Dimensión	Tipo	Dimensión
2A	3	4A	5
2B	2	4B	5
3A	4	5A	6
3C	3	6A	8

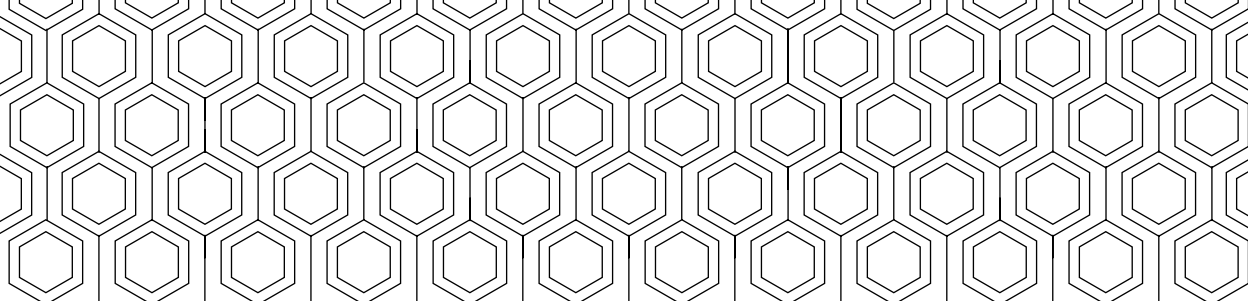
Las álgebras de Norton-Sakuma son importantes en la teoría de Majorana porque son bloques constructores de otras álgebras de Majorana. En este contexto, han sido estudiadas en detalle y a partir de esos estudios se establecieron los grupos de simetrías de cada álgebra [15].

Hasta ahora, usando la teoría de Majorana, se han logrado descubrir varias subálgebras importantes del álgebra de Griess; un ejemplo son las cuatro subálgebras, de dimensiones 6, 9, 13 y 13, obtenidas en el artículo “Majorana representations of the symmetric group of degree 4” [16]. Sin embargo, la intrincada estructura del álgebra de Griess hace que la comunidad matemática aún se encuentre lejos de comprenderla en su totalidad.

Referencias

- [1] I. N. Stewart, *Galois Theory*, 3a. ed. New York: Chapman and Hall/CRC, 2003.
- [2] M. Ronan. *Symmetry and the Monster: One of the Greatest Quests of Mathematics*. Oxford University Press, 2007.
- [3] D. Gorenstein. *The Classification of Finite Simple Groups*, Vol. 1. *Groups of Noncharacteristic 2 Type*. Plenum Press, The University Series in Mathematics, 1983.
- [4] M. Aschbacher. “The status of the classification of the finite simple groups,” *Notices of the American Mathematical Society*, vol. 51, no. 7, pp. 736-740, 2004.
- [5] R. A. Wilson. *The Finite Simple Groups*. London: Springer-Verlag, 2009.
- [6] R. L. Griess. “A construction of F_1 as automorphisms of a 196,883-dimensional algebra,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 78, no. 2, pp. 689-691, 1981.
- [7] R. L. Griess. “The friendly giant,” *Inventiones Mathematicae*, vol. 69, pp. 1-102, 1982.

- [8] J. H. Conway. "A simple construction for the Fischer-Griess Monster group," *Inventiones Mathematicae*, vol. 79, pp. 513-540, 1984.
- [9] J. Tits. "On R. Griess' Friendly giant," *Inventiones Mathematicae*, vol. 78, no. 3, pp. 491-499, 1984.
- [10] J. H. Conway, and S. P. Norton. "Monstrous Moonshine," *Bulletin of the London Mathematical Society*, vol. 11, pp. 308-339, 1979.
- [11] I. Frenkel, J. Lepowsky, and A. Meurman, "A natural representation of the Fischer-Griess Monster with the modular function J as character," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 81, pp. 3256-3260, 1984.
- [12] I. Frenkel, J. Lepowsky, and A. Meurman, "Vertex operator algebras and the Monster," *Pure and Applied Mathematics*, vol. 134. Boston: Academic Press, 1988.
- [13] R. E. Borcherds, "Monstrous moonshine and monstrous Lie superalgebras," *Inventiones Mathematicae*, vol. 109, pp. 405-444, 1992.
- [14] A. Ivanov, "The Monster Group and Majorana involutions," *Cambridge Tracts in Mathematics*, vol. 176. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [15] A. Castillo-Ramirez, "Idempotents of the Norton-Sakuma algebras," *Journal of Group Theory*, vol. 16, núm. 3, pp. 419-444, 2013.
- [16] A. A. Ivanov, D. V. Pasechnik, Á. Seress, and S. Shpectorov, "Majorana representations of the symmetric group of degree 4," *Journal of Algebra*, vol. 324, pp. 2432-2463, 2010.



Aplicaciones de grafos

AURORA ESPINOZA VALDEZ

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS COMPUTACIONALES,
CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍAS,
UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

Introducción

Existen muchos sistemas naturales cotidianos cuya conducta y estructura compleja han desafiado hasta ahora incluso el análisis cualitativo. En algunos casos esta conducta puede simularse numéricamente con sólo una variable; pero en la mayoría de los casos la simulación comprende demasiados factores y hace falta un mayor acercamiento al problema. Para describir y analizar la base matemática de la complejidad, se deben identificar herramientas matemáticas que capturen el ser del proceso. La teoría de grafos es un posible candidato, ya que éstos pueden emplearse en una gran variedad de campos, por ejemplo en física, matemáticas, biología y sistemas de cómputo, por mencionar algunos.

La teoría de grafos es una herramienta de matemáticas cuyo desarrollo ha estado siempre motivado por sus aplicaciones. El origen de la teoría de grafos se remonta al siglo XVIII con el problema de los puentes de Königsberg (1736, véase la figura 1): ¿es posible dar un paseo comenzando desde cualquiera de estas regiones, pasando por todos los puentes, recorriendo sólo una vez cada uno y regresando al mismo punto de partida? Leonhard Euler (1707-1787) escribió el primer artículo conocido para dar solución al

célebre problema, donde demostró que no era posible [1]. A partir de tal fecha muchos matemáticos importantes han realizado contribuciones [2].

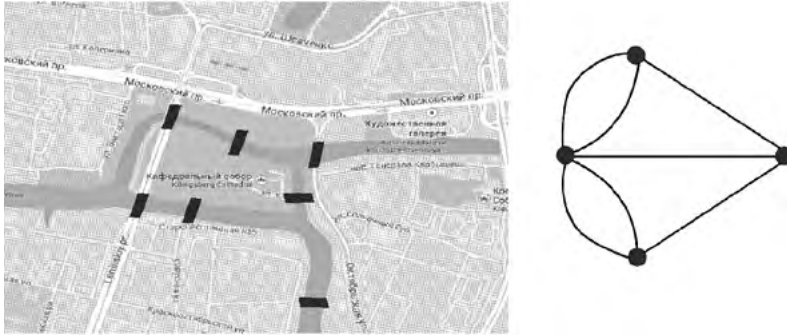


Figura 1. Puentes de Königsberg y representación en grafos (ciudad actual Kaliningradro, Rusia; imagen tomada de Google Maps, modificada).

Una ventaja de estudiar grafos es que son representaciones gráficas y algebraicas, lo que permite demostrar y entender mejor lo que sucede.

Pero, ¿Qué es un grafo? Un grafo G es una terna ordenada $(V(G), E(G), \Psi_G)$ que consiste en un conjunto no vacío $V(G)$ de vértices, de un conjunto $E(G)$ de aristas y de una función de incidencia $\Psi_G: E(G) \rightarrow V(G)$ que para cada arista se cumple la siguiente condición: Ψ_G asocia la arista e a un par de elementos de $V(G)$, $\Psi_G(e) = \{u, v\}$ [2].

En otras palabras, un grafo consiste de un conjunto de puntos en el espacio, que están conectados por un conjunto de líneas.

Los grafos pueden resolver diversos problemas; pueden modelar trayectos de líneas de autos o autobús a través de las calles de una ciudad, o bien, líneas aéreas, con los que se obtienen caminos óptimos aplicando diversos algoritmos (Dijkstra, Floyd, entre otros) [3]. Por otro lado, sirven para las ciencias sociales, en especial para las redes sociales en internet (Facebook, Twiter, Google+, por mencionar algunas). Mathematica 9 desarrolló un conjunto de funciones de análisis de redes sociales, haciendo más fácil el cálculo y la visualización de una red [4]. Aquí, los vértices son las personas y se puede hacer todo un análisis de la red para determinar la posición, centralidad e importancia de cada persona dentro de la red. Otra aplicación importante debido al interés de la comunidad científica es en la biología, donde existen aplicaciones para las redes de neuronas o redes genéticas for-

mando diferentes topologías que usan la metodología de redes complejas [5]. Dentro del área de ciencias de la salud, también existen aplicaciones relevantes, de las cuales detallaremos algunas a continuación.

Ciencias de la salud

En los últimos años, el entendimiento de cómo funciona el cuerpo humano ha pasado a ser un objetivo primordial y desafiante en la actividad científica, ya que las terapias podrían basarse en el control localizado.

Se discutirá el potencial que tiene la teoría de grafos en el desarrollo del árbol vascular arterial del riñón, la dinámica del desarrollo de úlceras en el pie diabético y el análisis antes, durante y después de una crisis epiléptica.

Desarrollo del árbol vascular arterial del riñón

Dentro del cuerpo humano abundan las estructuras complejas, como es el caso de las arborescentes. Los riñones son órganos complicados en términos de estructura y fisiología debido en parte a que están sumamente vascularizados [6]. Además, constituyen el principal medio de que dispone el organismo para purificar y mantener el equilibrio químico en la sangre. De acuerdo a datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS), una de cada diez personas en el mundo tienen algún desorden en el riñón, lo que provoca que cada año mueran prematuramente de ataque al corazón asociado a la insuficiencia renal crónica.

El grafo representa el árbol vascular arterial del riñón, donde cada arista es un vaso sanguíneo. Todas sus aristas están orientadas y etiquetadas, de tal forma que la orientación simboliza la dirección de la circulación del flujo sanguíneo en las aristas. Cada arista contiene la información fisiológica del vaso sanguíneo [7] para, y donde se efectúa, el proceso utilizado en el desarrollo de la bifurcación arterial: angiogénesis por brote o por partición; es la concentración del Factor de Crecimiento Endotelial en el vaso sanguíneo; es la longitud del vaso sanguíneo; es el diámetro del vaso sanguíneo y el ángulo de bifurcación arterial (figura 2).

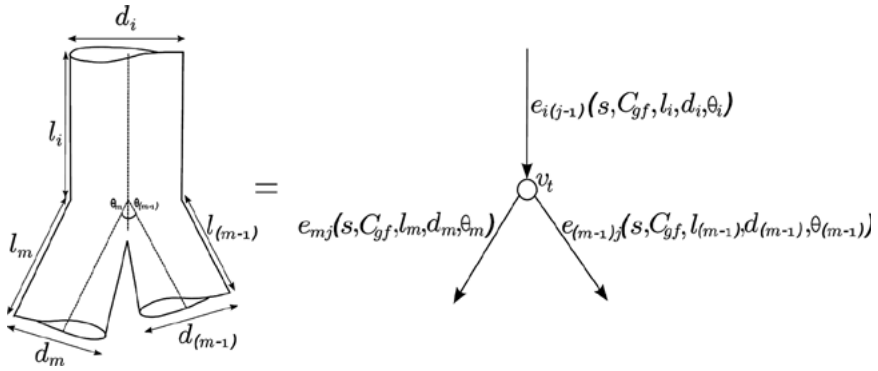


Figura 2. Representación de una bifurcación arterial renal en un grafo con aristas etiquetadas y orientadas del árbol vascular arterial renal [7].

En conclusión, la teoría de grafos permite modelar el desarrollo vascular, por ejemplo, genera la ramificación de estructuras arborescentes incorporando las leyes fisiológicas de la ramificación arterial mediante el proceso de angiogénesis. Esto es, el grafo prescribe la topología de la vasculatura arterial renal e incluye la regla del fenómeno de vascularización (figura 3) [8].

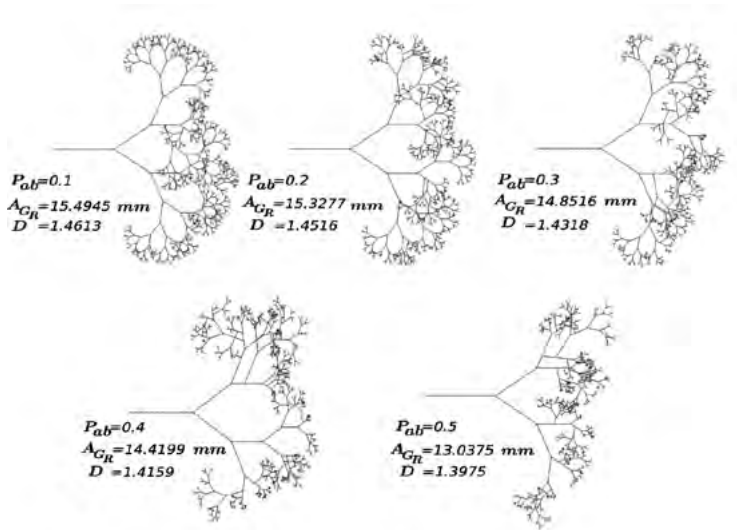


Figura 3. Árboles para diferentes probabilidades, anchos y dimensiones fractales en el desarrollo del árbol vascular arterial renal [8].

La diabetes mellitus es considerada como un problema mundial de salud pública por su alta frecuencia y sus enormes costos (OMS). Una complicación frecuente en los pacientes es el pie diabético, esto debido a las alteraciones vasculares observadas (causadas por la hiperglucemia). El pie diabético se define como infección, ulceración y destrucción de los tejidos profundos, asociadas con anormalidades neurológicas de diversa gravedad en las extremidades inferiores (OMS). Existe un sistema de clasificación desarrollado por Warner para la estadificación de las úlceras de pie diabético [9]: no existe úlcera (u_0), úlcera sin complicaciones (u_1), úlcera profunda (u_2), úlcera e isquemia (u_3), úlcera con gangrena (u_4), úlcera con gangrena extensa (u_5).



Figura 4. Puntos más susceptibles a la formación de úlceras en el pie diabético [10].

Un grafo puede representar la dinámica del desarrollo de úlceras en el pie diabético. Esto es, en los vértices se incluye la información fisiológica de los parámetros que determinan el estado de la úlcera.

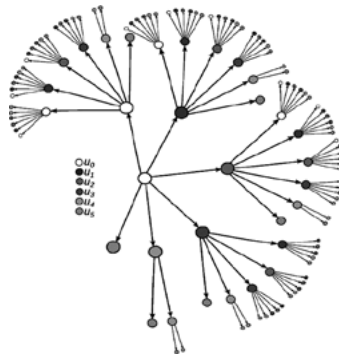


Figura 5. Posibles combinaciones o escenarios que puede tener un paciente [10].

La epilepsia es un trastorno neurológico crónico que afecta a personas de todas las edades y se caracteriza por convulsiones recurrentes, que eventualmente pueden producir consecuencias cognitivas y neurobiológicas principalmente (OMS). Las convulsiones son episodios que se deben a descargas eléctricas excesivas de grupos de células cerebrales. Dentro de las técnicas utilizadas para la exploración de la actividad cerebral la más empleada es la electroencefalografía (EEG). Esta técnica da cuenta de la actividad eléctrica del cerebro de una forma no invasiva a través de electrodos colocados en el cuero cabelludo, que registran las señales eléctricas; éstas son enviadas a equipos donde son desplegadas en forma de ondas conocidas como electroencefalograma (EEG). La identificación de la potencia y la dirección del flujo de información, así como la estimación de relaciones causales (conectividad), son esenciales para la comprensión de los diferentes procesos cerebrales. Este análisis se realiza mediante métodos derivados del modelo autorregresivo (AR), como la Partial Directed Coherence (PDC por sus siglas en inglés) [11, 12].

Se estudia la dinámica de relaciones causales en EEG críticos (conteniendo una crisis epiléptica identificada por un experto) hechas por la PDC. Los resultados muestran que es posible analizar las crisis epilépticas utilizando la herramienta matemática de teoría de grafos. Esto es, el grafo se determina a partir de mediciones de EEG que aplican umbrales definidos por espectros de potencia, de tal manera que en cada segundo se tiene una matriz que define la conexión entre los electrodos de superficie (figura 6). Además, muestran que es posible identificar en cada tiempo cómo es la estructura del grafo, esto es, cómo varía el grado de conectividad y desconexión antes-durante-después de una crisis epiléptica [13].

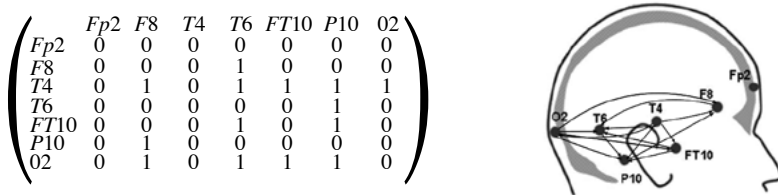


Figura 6. Representación matricial y gráfica del EEG en un instante de tiempo determinado.

Utilizando la teoría de grafos se puede realizar un análisis de la dinámica de los electrodos antes-durante-después de la crisis epiléptica. Respecto a los grados, podemos observar que se aprecia una desconexión significativa antes de

la crisis epiléptica (figura 7). La centralidad por cercanía también proporciona información relevante en este estudio [13].

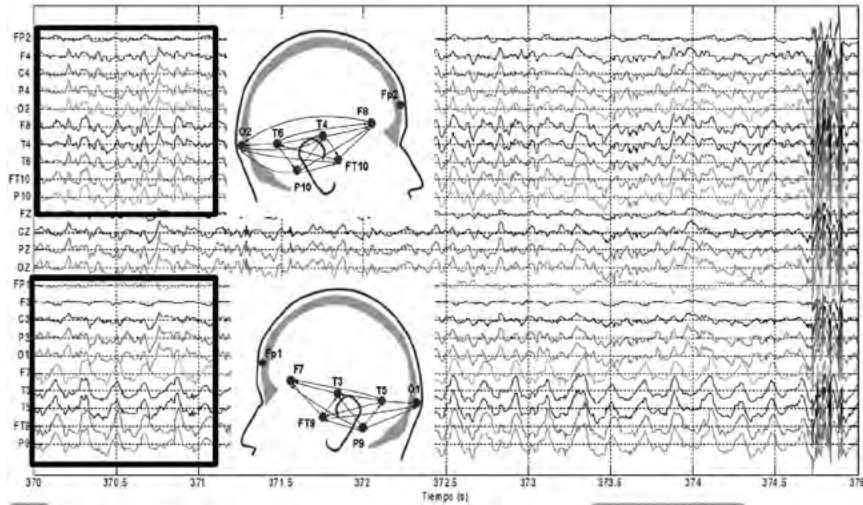


Figura 7. Grafos del lado izquierdo y del lado derecho representando la dinámica de conexión.

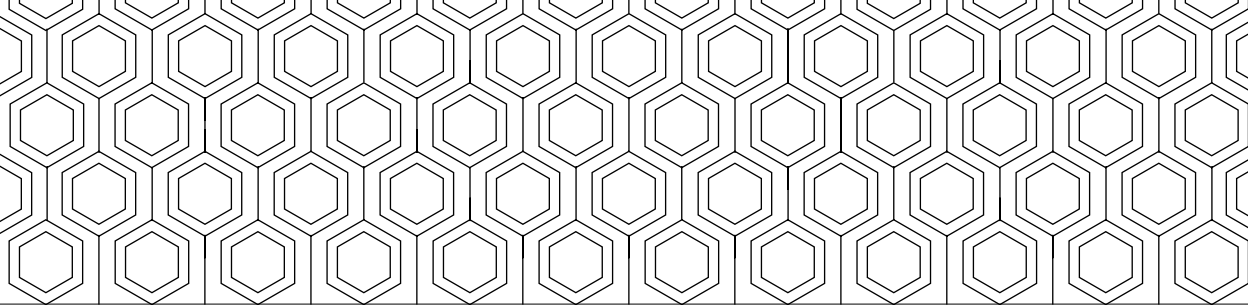
Conclusión

La teoría de grafos es una herramienta matemática que permite modelar problemas complejos de la vida real, ya que además de que prescribe la topología, puede incluir las reglas que describen los fenómenos en cuestión.

Referencias

- [1] L. Euler, "Solutio problematis ad geometriam situs pertinentis," *Novi Commentarii Academiae Scientiarum Imperialis Petropolitanae*, vol. 8, 128-140, 1736. Reeditado en *Opera Omnia Series Prima*, vol. 7, pp. 1-10, 1766.
- [2] R. Diestel. *Graph Theory*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.
- [3] A. Levitin. *Introduction to the Design & Analysis of Algorithms*, 3th. ed. Pearson, 2012.

- [4] S. Wolfram. "Social network analysis." [Online.] Available: <http://reference.wolfram.com/language/guide/SocialNetworks.html>.
- [5] E. Galán-Vásquez, B. Luna, and A. Marínez-Antonio. "The regulatory network of *pseudomonas aeruginosa*," *Microbial Informatics and Experimentation*, vol. 1, no. 3, pp. 1-12, 2011.
- [6] A. C. Guyton y J. E. Hall. *Tratado de fisiología médica*, 10ª ed. México: McGraw-Hill, 2000.
- [7] A. Espinoza-Valdez, R. Femat, and F. C. Ordaz-Salazar. "A model for renal arterial branching based on graph theory," *Mathematical Biosciences*, vol. 225, no. 1, pp. 36-43, 2010.
- [8] A. Espinoza-Valdez, F. C. Ordaz-Salazar, E. Ugalde, and R. Femat. "Analysis of a model for the morphological structure of renal arterial tree: fractal structure," *Journal of Applied Mathematics*, vol. 2013, p. 6, 2013. DOI:10.1155/2013/396486.
- [9] F. W. Wagner, Jr. "A classification and treatment program for diabetic, neuro-pathic, and dysvascular foot problems," *Instruccional Course Lecturs cv Mosby*. St. Louis: American Academy of Orthopaedic Surgeons, 1979pp 143-165.
- [10] A. Espinoza Valdez, B. Luna Olivera y G. Solís Perales. "Desarrollo de las úlceras en el pie diabético," *Recibe*, año 3, núm. 2, mayo de 2014.
- [11] H. Vélez-Pérez *et al.* "Connectivity estimation of three parametric methods on simulated electroencephalo-gram signals," *EMBS'08. 30th Annual International Conference of the IEEE*, 2606-2609, 2008.
- [12] R. Romo-Vázquez *et al.* "Blind source separation, wavelet denoising and discriminant analysis for EEG artefacts and noise cancelling," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 7, 4, pp. 389-400, 2012.
- [13] R. Romo Vázquez, H. Vélez Pérez, B. Luna Olivera y A. Espinoza-Valdez *Análisis de la dinámica de crisis epilépticas*. XI encuentro Participación de la Mujer en la Ciencia, pp. 1-5, 2014.



El estudio del caos en los últimos veinte años

GUILLERMO OBREGÓN PULIDO

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA,
CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍAS,
UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

Introducción

El hecho de que en 1963 E. N. Lorenz encontró el primer atractor caótico en un sistema autónomo tridimensional cuando estudiaba la convección atmosférica [1], marcó un paradigma en el estudio del caos. Más tarde, Rossler construyó un sistema caótico tridimensional simple, el cual más tarde se nombraría sistema caótico de Rossler [2]. Notablemente en las últimas dos décadas, el caos en la ingeniería de sistemas tales como los circuitos no lineales ha cambiado de ser una simple curiosidad científica a un prometedor tema con aplicaciones y gran significado práctico. La encriptación de mensajes en sistemas de comunicación segura es un típico ejemplo de la aplicación del caos, en el que una señal de un sistema caótico simple es usada para enmascarar el mensaje transmitido. Entonces se ha notado que crear caos puede ser la llave para muchas aplicaciones tecnológicas. En este contexto, Chen [3] construye un sistema caótico autónomo tridimensional siguiendo la metodología de la retroalimentación como se estudia en el

control automático. Con el mismo propósito, Lu [4] construye su sistema caótico tridimensional topológicamente diferente al de Lorenz y al de Chen. En este camino de encontrar sistemas caóticos cada vez más complejos para incrementar la seguridad del mensaje enviado existen varios trabajos, los cuales toman en cuenta las siguientes consideraciones para generar un sistema caótico:

1. El sistema es disipativo, esto es, la energía del sistema es decreciente.
2. El sistema tiene puntos de equilibrio inestables, esto es, el jacobiano evaluado en el punto de equilibrio tiene valores propios inestables.
3. El sistema tiene al menos un término de producto cruzado, esto es, la dinámica de las diferentes variables deben influenciarse entre sí.
4. Las órbitas del sistema son acotadas, esto es, la reducción y el incremento de la energía en el sistema tiene un balance dinámico.

Pero, ¿qué es el caos? Daremos algunas respuestas a esta pregunta, aune no son definiciones:

- La evolución irregular e impredecible de muchos sistemas no lineales ha sido nombrada como “caos”.
- El “caos determinístico” es el comportamiento de un sistema determinístico (descrito por ecuaciones diferenciales bien determinadas) que desde el punto de vista estadístico se vería como un comportamiento aleatorio.
- *Caos*: Palabra utilizada para indicar la ausencia de alguna clase de orden.
- Un proceso *caótico* es aquel en el que las variaciones no son aleatorias pero parecen serlo.

Estas respuestas son un poco ambiguas, sin embargo dan una idea de lo que es o significa el caos.

Los tres sistemas caóticos relacionados

El célebre sistema de Lorenz, descubierto hace 51 años [1], el cual es extensivamente estudiado en el campo de la teoría del caos y la dinámica de sistemas, se describe mediante las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
\dot{x} &= a(y-x) \\
\dot{y} &= cx - xz - y \\
\dot{z} &= xy - bz
\end{aligned} \tag{1}$$

donde a , b y c son parámetros positivos y reales. Con $a = 10$, $b = 8/3$ y $c = 28$, el sistema de Lorenz es caótico.

En 1999 Chen encontró un nuevo sistema [3], el cual fue después referenciado como el *sistema de Chen*. Este sistema se describe mediante las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
\dot{x} &= a(y-x) \\
\dot{y} &= (c - a)x - xz + cy \\
\dot{z} &= xy - bz
\end{aligned} \tag{2}$$

donde a , b y c son parámetros reales positivos. Con $a = 35$, $b = 3$ y $c = 28$, el sistema de Chen es caótico.

Si la parte lineal y la parte cuadrática son separadas en la forma

$$\dot{x} = Ax + Q(x) \tag{3}$$

donde $A = [a_{ij}]_{3 \times 3}$ es una matriz, entonces el sistema de Lorenz satisface $a_{12}a_{21} > 0$, mientras que el sistema de Chen satisface $a_{12}a_{21} < 0$. En este sentido el sistema de Chen es el dual del sistema de Lorenz [5].

En el año 2002, Lu y Chen descubren un nuevo sistema, el cual cumple con $a_{12}a_{21} = 0$ y lo describen las ecuaciones:

$$\begin{aligned}
\dot{x} &= a(y-x) \\
\dot{y} &= -xz + cy \\
\dot{z} &= xy - bz
\end{aligned} \tag{4}$$

donde a , b y c son parámetros reales. Con $a = 36$, $b = 3$ y $c = 20$ el sistema de Lu es caótico.

El llamado *sistema unificado* [6] fue descrito para unir los sistemas de Lorenz y Chen en uno solo, está descrito por las ecuaciones:

$$\begin{aligned}
\dot{x} &= (25a + 10)(y - x) \\
\dot{y} &= (28 - 35a)x - xz + (29a - 1)y \\
\dot{z} &= xy - (a + 8)z/3
\end{aligned} \tag{5}$$

y para $a \in [0,1]$ el sistema es caótico. Este sistema unificado es la combinación convexa entre el sistema de Lorenz y el sistema de Chen, y representa toda la familia de sistemas caóticos entre estos dos sistemas.

El comportamiento de los sistemas de Lorenz, Chen y Lu se presenta en la figura 1, donde se observa la gran diferencia entre el comportamiento de cada sistema.

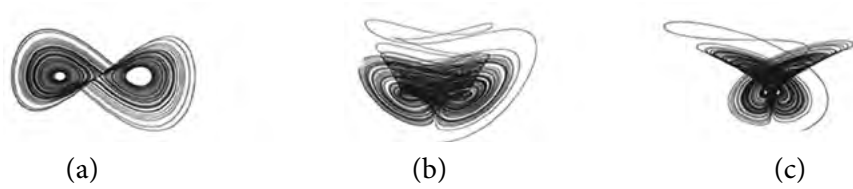


Figura 1. Comportamiento de los sistemas de (a) Lorenz, (b) Chen y (c) Lu.

Los tres sistemas pueden plantearse en el llamado *sistema generalizado de Lorenz* (GLS por sus siglas en inglés) [7], el cual toma la siguiente forma:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} x + x_1 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} x, \quad A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \tag{6}$$

donde $x = [x_1, x_2, x_3]^T$, $\lambda_3 \in \mathbb{R}$, y A tienen valores propios $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R}$, con $\lambda_1 > 0$, $\lambda_2 < 0$ y $\lambda_3 < 0$. Donde el sistema de Lorenz satisface $a_{12}a_{21} = 0$, el sistema de Chen satisface $a_{12}a_{21} < 0$ y el sistema de Lu satisface $a_{12}a_{21} = 0$.

El sistema GLS se dice no trivial si tiene una solución que no tiende a 0 o a un ciclo límite y no tiende a infinito.

En el artículo “On the generalized Lorenz canonical form” [7] se propone la forma canónica generalizada de Lorenz (GLCF por sus siglas en inglés), la cual toma la forma:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 1 & \lambda_3 \end{bmatrix} x + cx \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 \\ 1 & \tau & 0 \end{bmatrix} x, \quad \lambda_{2,3} < 0, \lambda_1 > 0, \quad (7)$$

donde $x = [x_1, x_2, x_3]^T$, $c = [1, -1, 0]$ con $\tau \in \mathbb{R}$.

Considerando (6) y (7), en dicho artículo^[6] se proporciona el siguiente teorema: *Para el sistema no trivial generalizado de Lorenz (6) existe una transformación lineal no singular de un solo parámetro que transforma (6) en (7) con $\tau > -1$.*

Con el teorema anterior el sistema de Lorenz satisface $0 < \tau < +\infty$, el sistema de Lu satisface $\tau = 0$ y el sistema de Chen satisface $-1 < \tau < +\infty$.

Para el caso $\tau \leq -1$ existe otra familia de sistemas dinámicos, los llamados *sistemas generalizados de Lorenz de tipo hiperbólico* (HGLS por sus siglas en inglés).^[7]

Para el lector interesado, el sistema caótico de Rossler toma la siguiente forma [2, 11]:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -(x + y) \\ \dot{y} &= x + ay \\ \dot{z} &= zy - cz + b \end{aligned} \quad (8)$$

donde $a = b = 0.2$ y $c \in \mathbb{R}$.

Se observa que sólo la tercera ecuación tiene un término cruzado, por lo cual no es comparable con la familia de sistemas de Lorenz vista anteriormente.

Los sistemas caóticos de Qi

Recientemente Guoyuan Qi *et al.* [8, 9, 10] han propuesto nuevos sistemas caóticos que aumentan la complejidad de las ecuaciones diferenciales, lo que complican el comportamiento de tales sistemas.

En una de sus publicaciones [8] añaden un producto cruzado a la primera ecuación diferencial del sistema de Lorenz, el cual queda la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= a(y - x) + yz \\ \dot{y} &= cx - y - xz \\ \dot{z} &= -bz + xy\end{aligned}\tag{9}$$

Siendo entonces diferente de los sistemas de Lorenz, Chen y Lu, y aun distinto de la familia de sistemas de Lorenz vista anteriormente.

Este sistema tiene las siguientes propiedades básicas:

1. Es simétrico con respecto al eje z , es decir, es invariante bajo la transformación $(x, y, z) \rightarrow (-x, -y, z)$.
2. Es disipativo ya que

$$\frac{\partial \dot{x}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{y}}{\partial y} + \frac{\partial \dot{z}}{\partial z} = -(a + b + 1)$$

Y si $(a + b + 1) > 0$ entonces el sistema pierde energía.

3. El sistema es estable alrededor del origen con la condición:

$$c < \frac{a}{a + 1}$$

4. El sistema tiene cinco puntos de equilibrio, tres de los cuales son reales.
5. El sistema tiene un punto de equilibrio inestable del tipo silla.

El comportamiento caótico del sistema anterior se puede apreciar en la figura 2.

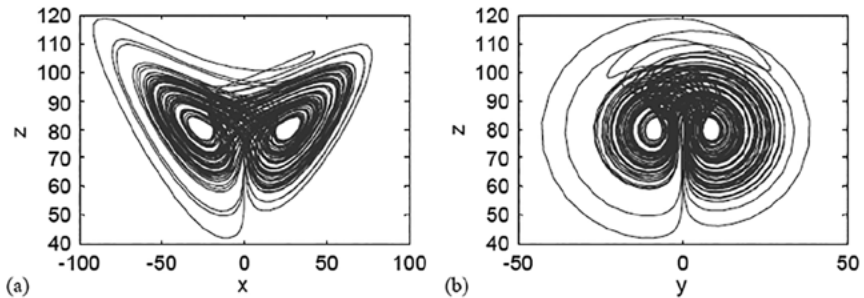


Figura 2. Comportamiento caótico del sistema de Qi, (a) plano x - z , (b) plano y - z .

En el mismo año (2005) Qi *et al.* proponen un sistema caótico de cuatro dimensiones [9], el cual toma la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= a(x_2 - x_1) + x_2 x_3 x_4 \\ \dot{x}_2 &= b(x_2 + x_1) - x_1 x_3 x_4 \\ \dot{x}_3 &= -cx_3 + x_1 x_2 x_4 \\ \dot{x}_4 &= -dx_4 + x_1 x_2 x_3\end{aligned}\quad (10)$$

Las características de este sistema son las siguientes:

- Es disipativo para $b - (a + c + d) < 0$.
- El sistema tiene 65 puntos de equilibrio.
- El punto de equilibrio cero es inestable.
- Las órbitas están acotadas.

El comportamiento caótico del sistema se puede ver en la figura 3, donde se presenta la proyección en dos planos distintos.

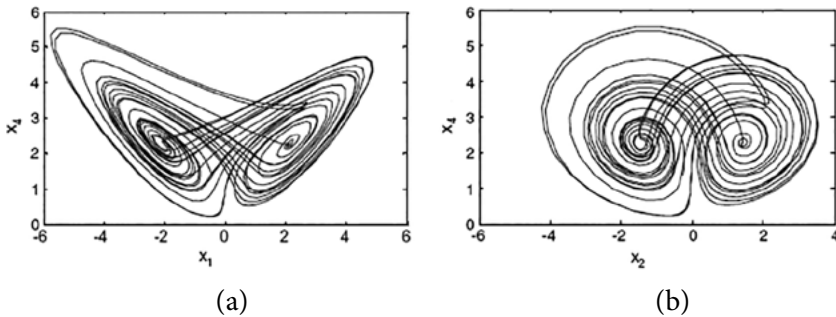


Figura 3. Comportamiento caótico del sistema (10), $a = 35$, $b = 10$, $c = 1$ y $d = 10$.

Finalmente en 2008 Qi *et al.* proponen un sistema caótico de dimensión 4 el cual no tiene simetría, es decir, es asimétrico ante cualquier eje [10].

El sistema tiene la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= a(x_2 - x_1) + x_2 x_3 \\ \dot{x}_2 &= b(x_2 + x_1) - x_1 x_3 \\ \dot{x}_3 &= -cx_3 - ex_4 + x_1 x_2 \\ \dot{x}_4 &= -dx_4 + fx_3 + x_1 x_3\end{aligned}\quad (11)$$

donde las constantes a, b, c, d, e, f , son todas positivas. Las características de este sistema son las siguientes:

1. El sistema es disipativo para $b - (a + c + d) < 0$.
2. El sistema tiene cinco puntos de equilibrio reales incluyendo el cero.
3. El punto de equilibrio cero es inestable del tipo silla.
4. Las trayectorias están acotadas, es decir, no tienden a infinito.

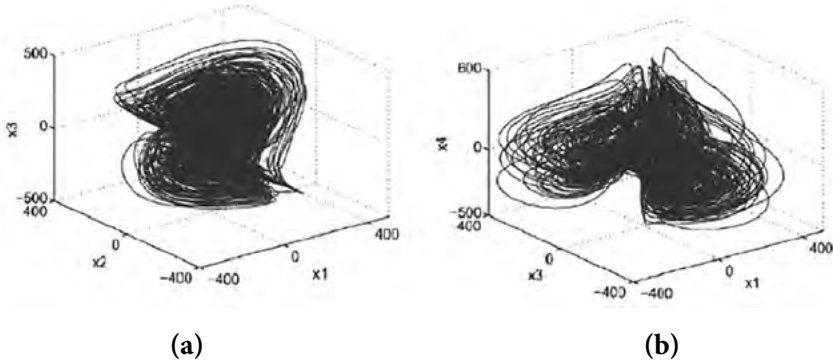


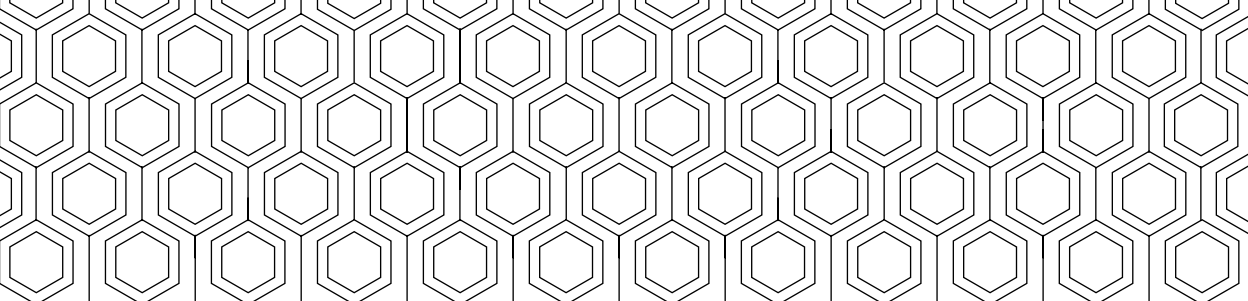
Figura 4. Comportamiento caótico del sistema asimétrico de Qi.

Conclusión

En el presente capítulo se presenta una reseña del estudio del caos y en qué dirección se ha seguido investigando este comportamiento tan fascinante que presentan los sistemas caóticos. El incrementar la complejidad en los sistemas de esta naturaleza conlleva una mayor seguridad en la transmisión de mensajes si es que estos sistemas son utilizados para tal fin. En realidad no es fácil determinar si un sistema es caótico o no, pero ya se vio que en general deben cumplir cuatro requisitos: disipatividad, puntos de equilibrio inestables, términos de producto cruzado, y órbitas acotadas.

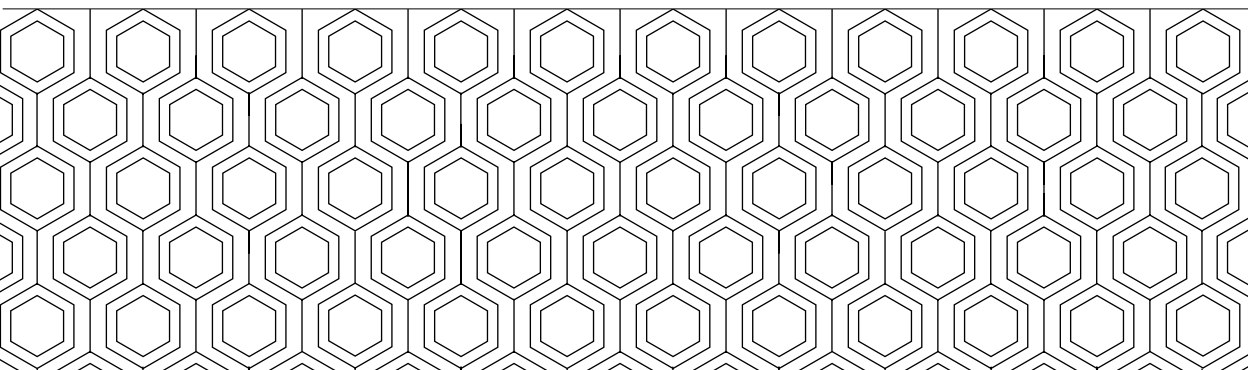
Referencias

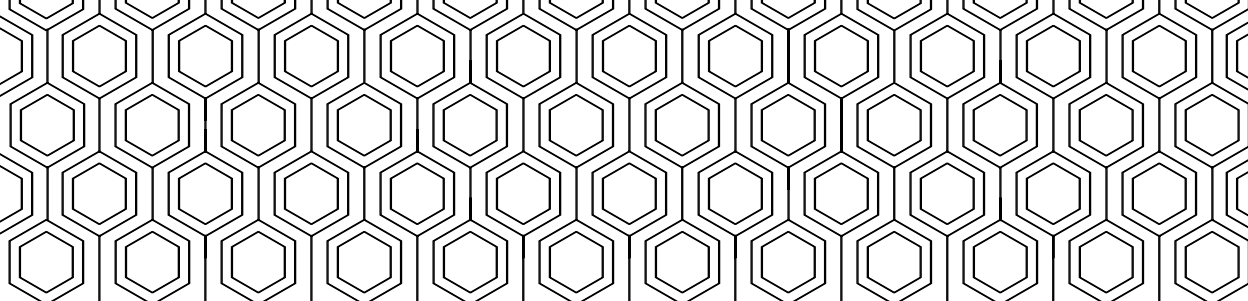
- [1] E. N. Lorenz. "Deterministic nonperiodic flow," *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 20, pp. 130-141, 1963.
- [2] O. E. Rossler. "An equation for continuous chaos," *Physics Letters A*, vol. 57, no. 5, pp. 397-398, 1976.
- [3] G. Chen and T. Ueta. "Yet another chaotic attractor," *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 9, no. 7, pp. 1465-1466, 1999.
- [4] J. H. Lu and G. Chen. "A new chaotic attractor coined," *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 12, no. 3, pp. 659-661, 2002.
- [5] S. Celikovsky and A. Vanecek. "Bilinear systems and chaos," *Kybernetika*, vol. 30, pp. 403-424, 1994.
- [6] J. Lu, G. Chen, D. Cheng, and S. Celikovsky. "Bridge the gap between Lorenz System and the Chen System," *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 12, pp. 2917-2926, 2002.
- [7] S. Celikovsky and G. Chen. "On the generalized Lorenz canonical form," *Chaos Solitons and Fractals*, vol. 29, pp. 1271-1276, 2005.
- [8] G. Qi, G. Chen, S. Du, Z. Chen, and Z. Yuan. "Analysis of a new chaotic system," *Physica A*, vol. 352, pp. 295-308, 2005.
- [9] G. Qi, S. Du, G. Chen, Z. Chen, and Z. Yuan. "On a four-dimensional chaotic system," *Chaos Solitons and Fractals*, vol. 23, pp. 1671-1682, 2005.
- [10] G. Qi, G. Chen, and Y. Zhang, "On a new asymmetric chaotic system", *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 37, pp. 409-423, 2008.



Capítulo III.

Ciencias de la computación





Veinte años de redes neuronales artificiales en control inteligente

ALMA YOLANDA ALANÍS GARCÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS COMPUTACIONALES,
CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍAS,
UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

EDGAR NELSON SÁNCHEZ CAMPEROS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL,
UNIDAD GUADALAJARA

Introducción

El concepto “control inteligente” ha sido utilizado de formas muy distintas, en ocasiones responsablemente pero en otros casos sólo por publicidad. Básicamente el control inteligente es la intersección de dos disciplinas bien fundamentadas. Por una parte está la bien conocida teoría de control, la cual posee una larga y fascinante historia [1], que siempre se ha caracterizado por un estricto tratamiento matemático. Y por otra parte se encuentra la inteligencia artificial, que si bien es considerada como una disciplina joven, ha demostrado ser una excelente herramienta para tratar problemas reales de manera no convencional imitando las características de la inteligencia biológica. De tal forma que al unir estas dos excelentes disciplinas se pro-

duce el llamado control inteligente, el cual puede definirse como: un enfoque de control que imita a un humano que tiene experiencia para generar una acción de control adecuado para un sistema en particular [2]. Esto a diferencia de un enfoque de control convencional que utiliza una base de conocimientos de control, y un mecanismo de inferencia que coincide con información observada/medida con la base de conocimientos para generar la acción de control (salida del controlador o controlar la entrada al sistema).

De tal manera que esta intersección puede ilustrarse por medio del esquema de la figura 1, dando origen al control inteligente, que puede ser tan vasto como las propias características que definen a la inteligencia de los sistemas biológicos.

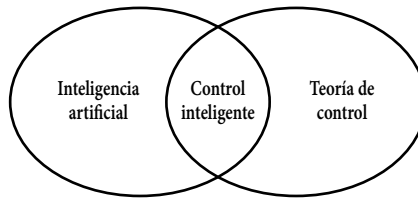


Figura 1. Origen del control inteligente.

Por otra parte, podemos señalar que el objetivo final de la ingeniería de control es implementar un sistema automático que opere sin intervención humana, en un ambiente no estructurado e incierto (sistema autónomo e inteligente). A un sistema tal le bastaría con presentarle la meta final, la cual alcanzaría por interacción continua con el medio ambiente; ésta se lograría por la adaptación en presencia de condiciones de operación variable e impredecible, a fin de realizar con eficiencia creciente las tareas necesarias. A un sistema tal se le denomina inteligente. Este objetivo se alcanzaría por adaptación en presencia de condiciones de operación variables e impredecibles, para realizar con eficiencia creciente las tareas necesarias [3].

Inteligencia artificial

El concepto *inteligencia artificial* data de los años cincuenta del siglo xx y se debe a un grupo de científicos que estudiaron el cerebro humano como modelo natural, integrando el análisis de la información y control tanto en

humanos como en máquinas (McCarthy, Minisky, Newell, Simon, etc.). En palabras de Marvin Minisky, la inteligencia artificial (IA) es el estudio de cómo programar computadoras que posean la facultad de hacer aquello que la mente humana puede realizar, o en sentido amplio: la IA es una ciencia orientada al diseño y construcción de máquinas que implementen tareas propias de humanos dotados con inteligencia [3].

Desde el trabajo de Santiago Ramón y Cajal en 1911, las neuronas se han definido como el componente básico del sistema nervioso incluyendo al cerebro, los cuales están constituidos por un enorme número de ellas, de tal forma que pueden establecerse grupos de neuronas activas especializadas en tareas como: cálculos matemáticos, posicionamiento, lenguaje, memoria, entre otras

Tareas que evidentemente son fáciles de realizar por sistemas biológicos, pero que en el momento en que se requiere dotar a una máquina de estas capacidades mediante métodos tradicionales, resulta sumamente complejo y laborioso, por lo cual es interesante analizar la forma en que los sistemas biológicos realizan estas y muchas otras tareas especializadas, con el objetivo de facilitar su implementación artificial.

Por ello la representación de sistemas biológicos a través de modelos formales resulta de sumo interés para diversas disciplinas, en ellas: neurociencias, matemáticas, estadística, física, ciencias de la computación, ingeniería, medicina, comercio, ciencias sociales.

De este interés surgen las técnicas de inteligencia artificial como modelos simplificados del cerebro, mismas que tratan de extraer sus excelentes capacidades para resolver algunos problemas de las ciencias más complejas de las disciplinas antes mencionadas, como: visión, reconocimiento de patrones, control motosensorial, procesamiento de señales, por mencionar algunos.

Todo esto en virtud de aprender a partir de los datos de entrada a través de los diversos paradigmas de aprendizaje. En la figura 2 se muestra un esquema de cinco de los principales paradigmas de la IA y algunas posibles hibridaciones, los que también se describen enseguida.

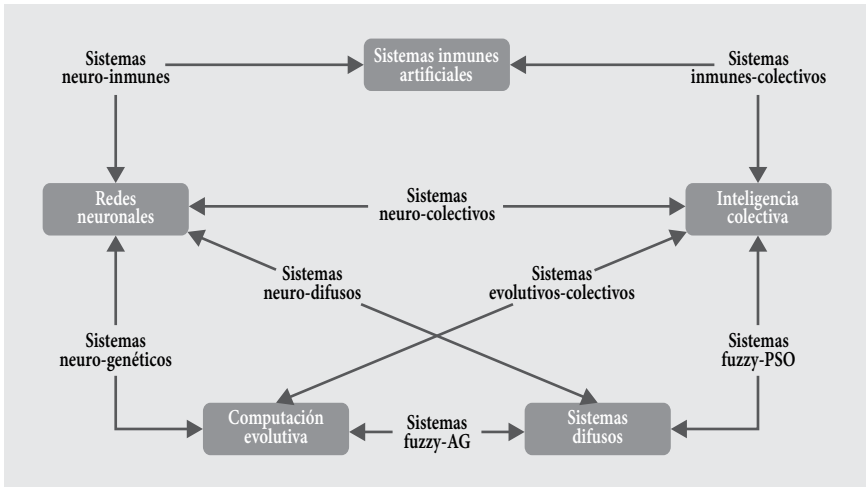


Figura 2. Cinco de los principales paradigmas de la inteligencia artificial y algunas hibridaciones comunes.

- *Redes neuronales artificiales:* Una red neuronal se puede definir como un procesador masivamente paralelo distribuido compuesto por unidades simples de procesamiento, que tiene la propensión natural para almacenar conocimiento experimental y ponerla a disposición para su uso [3].
- *Sistemas difusos:* Sistemas basados en una lógica generalizada en lugar de la lógica binaria clásica. En lugar de los dos estados en la lógica binaria, varios estados son posibles, con un grado de superposición entre los mismos [2].
- *Sistemas inmunes artificiales:* Los algoritmos basados en sistemas inmunes artificiales típicamente explotan las características del sistema inmune biológico de aprendizaje y memoria para resolver un problema de optimización.
- *Computación evolutiva:* Una técnica de optimización no-analítica que imita la evolución biológica. En base a una función de optimización (función de aptitud), las soluciones son seleccionadas por “apareamiento” de buenas soluciones para crear otras mejores, y descartando soluciones pobres [2].
- *Inteligencia colectiva:* La inteligencia colectiva o de enjambre, se originó a partir del estudio de las colonias (hormigas, abejas, termitas) o enjambres de organismos sociales (enjambres, parvadas, cardúmenes).

nes, etc) Los estudios sobre el comportamiento social de organismos (individuos) en enjambres impulsaron el diseño de algoritmos de optimización y agrupación muy eficientes. La inteligencia colectiva es un paradigma innovador de inteligencia distribuida para resolver problemas de optimización.

Cada uno de estos paradigmas se centra en un aspecto o función inteligente de los seres vivos. Hoy en día, la mayoría de estos métodos de la IA están bien delimitados y gran parte de ellos han sido aplicados con éxito en diversos ámbitos. No obstante, conviene aclarar que las técnicas asociadas a la IA tienen un desarrollo y una fundamentación independiente. Cada una de ellas contribuye con una metodología distintiva para tratar problemas en su dominio de aplicación. Sin embargo, de una forma complementaria –en lugar de competitiva–, se combinan algunas de ellas formando los denominados “sistemas inteligentes híbridos”, que combinan dos o más de estas técnicas para su aplicación en sistemas específicos que por su complejidad requieren un acercamiento desde distintos enfoques. Así se habla de los sistemas neurodifusos, neurogenéticos, neurodifusos-genéticos, neuroinmunes, inmunes-colectivos, neurocolectivos, difusos con optimización por enjambres de partículas, difusos-genéticos, evolutivos colectivos, y demás.

La IA sigue siendo un campo abierto a la investigación y, junto con mejoras continuas y modificaciones que está experimentando, todavía están por desarrollarse nuevas implementaciones computacionales de facetas de la IA.

Además los sistemas biológicos ofrecen la posibilidad de diseñar sistemas artificiales que intentan explicar y reproducir el fenómeno denominado inteligencia. Estos sistemas tienen las siguientes características:

- Procesan información de forma no convencional.
- No requieren modelos de referencia.
- Se desempeñan exitosamente en presencia de incertidumbre.
- Aprenden a realizar nuevas tareas.
- Se adaptan con facilidad a medios ambientes cambiantes.

En resumen se dice que un sistema es inteligente si tiene la capacidad de aprender, si adquiere y procesa información acerca de su desempeño y del ambiente que lo rodea, para mejorar dicho desempeño [3].

Control inteligente

Siguiendo este orden de ideas, resulta importante responder la pregunta ¿por qué son importantes los sistemas de control automático? Existen muchas y muy diversas respuestas a esta pregunta, sin embargo, en este capítulo nos enfocaremos al hecho de que los inminentes avances en ciencia y tecnología implican aplicaciones más complejas y sofisticadas: procesos químicos, robótica, procesos industriales, procesos biomédicos, entre muchas otras.

Asimismo, el uso de sistemas de control permite la mejora de la productividad, elevar la precisión, realizar tareas más complejas, mejorando el desempeño de los sistemas, relevar al ser humano de tareas repetitivas y peligrosas, entre muchas otras tareas.

Entonces, ¿por qué son importantes las técnicas de IA en la teoría de control? Típicamente el proceso que se sigue para el diseño de controladores automáticos es el mostrado en la figura 3. En primer lugar es necesario determinar el sistema o planta por controlar; después, obtener un modelo matemático, el cual deberá ser adecuado y confiable, ya que en base a dicho modelo se realizará el análisis del proceso, con el objetivo de controlar el sistema; este análisis se realiza haciendo uso tanto de métodos matemáticos como de métodos computacionales.

A continuación, como resultado del análisis anterior, se realiza el diseño del controlador y después su aplicación o implementación en la planta o sistema que se estudia.

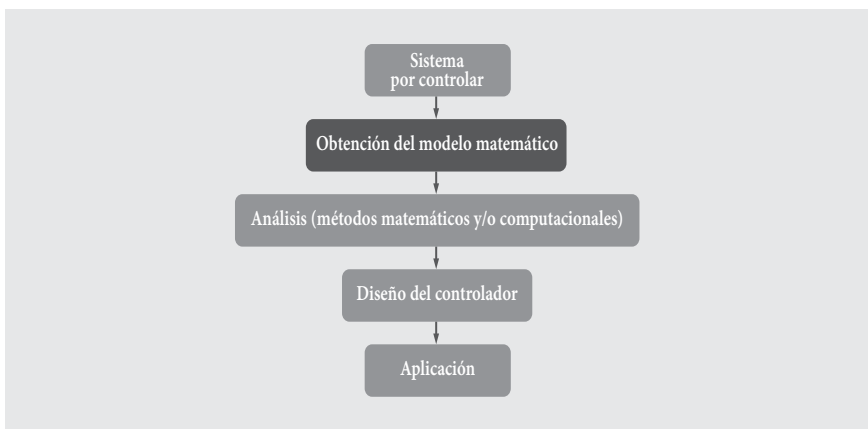


Figura 3. Proceso que se sigue para el diseño de controladores automáticos.

Por lo antes expuesto resulta evidente que el proceso del diseño y la implementación de controladores automáticos mediante enfoques tradicionales se basa en el modelo matemático del sistema, de tal forma que si por algún motivo llegara a fallar ese modelo matemático entonces todo el proceso también fallaría. Ahora bien, ¿por qué pudiera fallar ese modelo matemático? Podemos considerar tres escenarios posibles:

1. Se tiene un sistema simple cuyo modelo es conocido y en el que se pueden presentar las siguientes situaciones:
 - a) Incertidumbres paramétricas
 - b) Dinámicas no modeladas
 - c) Perturbaciones desconocidas
 - d) Sensores poco confiables o inexistencia de sensores en tiempo real
 - e) Sistemas ruidosos
 - f) Saturación en los actuadores
 - g) Retardos, etc.
2. Sistemas con modelos no conocidos y en los que se pueden presentar las situaciones del punto 1.
3. Sistemas altamente complejos y en los se pueden presentar las situaciones del punto 1.

Por tanto, la solución consiste en desarrollar sistemas de control robustos, adaptables y de uso general, lo cual puede lograrse si se utilizan los diversos paradigmas de la IA para la obtención de modelos matemáticos adecuados y confiables en todo momento, con relativamente poco esfuerzo, de tal manera que al conjugar las técnicas de teoría de control y de inteligencia artificial surge el control inteligente como el diseño de sistemas de control de uso general, que aprenden a través del tiempo cómo lograr objetivos en ambientes complejos, ruidosos, no lineales, cuya dinámica se puede aprender en tiempo real.

Entonces el control inteligente puede ser visto como una parte importante del área de investigación de la IA, y el control de sistemas, en algún sentido, puede considerarse en la parte más alta de la jerarquía del control automático en el camino hacia las máquinas autónomas. La figura 4 ilustra el proceso de desarrollo del control automático en este sentido, incrementándose la sofisticación en el camino hacia el control inteligente, para tratar con la toma de decisiones avanzada y conectar muy cercanamente a la IA.

Los sistemas de control inteligentes pueden resolver problemas, identificar patrones, o planear una estrategia (entre otros), para el funcionamiento de un sistema, por complejo que este sea. En la figura 5 se presenta una breve revisión del desarrollo histórico del control inteligente.

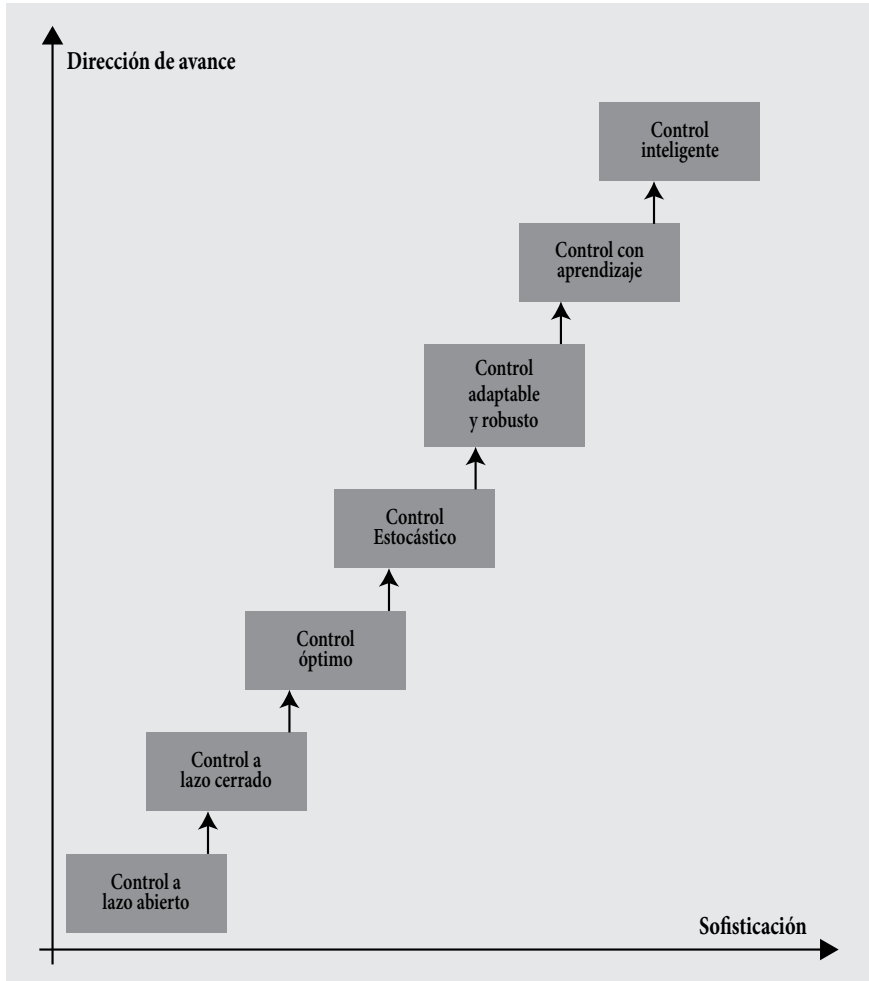


Figura 4. Desarrollo del control automático.

Desarrollo histórico del control inteligente

1965 Lofti Zadeh publicó su famoso artículo «Fuzzy sets»

L. A. Zadeh, "Fuzzy sets", *Information and control*, 8 (1965) 338

1967 C. T. Leondes acuña el término «Control inteligente»

C. T. Leondes, *Advances in CONTROL SYSTEMS: Theory and applications*, academic press, Inc.; First edition (1967)

1971 K. S. Fu publica «Learning control system and intelligent control system: an intersection of artificial intelligence and automatic control»

K. S. Fu, "Learning control systems and intelligent control systems: an intersection of artificial intelligence and automatic control", *IEEE Trans Ac-16* (1971) 70-72

1979 G. N. Saridis establece que la IA puede proporcionar el nivel más alto en una estructura de control

G. N. Saridis, "Toward the realization of intelligent controls", *Proc. IEEE*, 67 (1979)

1986 K. J. Astrom publica «Expert control»

K. J. Astrom, J. J. Anton and K. E. Arzen, "Expert control", *automatica*, 22 (1986) 227

1989 C. W. de Silva propone el control basado en conocimiento

C. W. de Silva, A. G. J. MacFarlane, *Knowledge-Based control with application to robots* (Springer-Verlag, Berlin 1989)

1993 P. J. Antsaklis y K. M. Passino publican «An introduction to intelligent and autonomous control»

P. J. Antsaklis and K. M. Passino, Eds. *An introduction to intelligent and autonomous control*, (Boston, MA: Kluwer, 1993)

Figura 5. Breve revisión del desarrollo histórico del control inteligente.

Los últimos veinte años del control inteligente

De acuerdo con el reporte del grupo de trabajo sobre el control inteligente de la Sociedad de Sistemas de Control del Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE), publicado en el 1994 *International Symposium on Intelligent Control*, hace 20 años el control inteligente tenía, entre otros, los siguientes retos [4]:

1. El modelado y análisis matemático de los sistemas de control inteligente; tanto en entornos de eventos discretos como híbridos. Identificación de modelos, métodos adaptables para derivación de modelos más abstractos y de mayor nivel.
2. Detección e identificación de fallas, control reconfigurable, alarmas y monitoreo en sistemas biomédicos.
3. Sistemas de control con planeación y aprendizaje.
4. Entornos computacionalmente eficientes y algoritmos para tratar con complejidad.
5. Énfasis en aplicaciones y en la integración de sistemas de control inteligente; por ejemplo, aplicaciones automotrices, de manufactura y aeroespaciales.

Entonces, ¿cómo se han abordado estos retos durante los últimos 20 años?

En 1994 se publica el artículo “High-order neural network structure for identification of dynamical systems” [5], en el cual se presenta por primera vez el uso de redes neuronales recurrentes de alto orden para la identificación de sistemas dinámicos no lineales, acompañado de la deducción del correspondiente algoritmo de entrenamiento basada en la teoría de Lyapunov, para asegurar la convergencia del identificador. En este mismo sentido, en 1996, se presenta un análisis detallado de controlabilidad, observabilidad e identificabilidad para sistemas dinámicos no lineales usando controladores neuronales [6]. Por otra parte, en 1999 se expone por primera vez el análisis de estabilidad entrada estado para redes neuronales dinámicas [7], lo cual en su momento fue un avance sumamente relevante para la justificación matemática del uso de redes neuronales recurrentes para la obtención de modelos matemáticos de sistemas dinámicos no lineales. Desde hace 20 años el desarrollo del control neuronal ha sido sumamente relevante y está repleto de una gran cantidad de éxitos en aplicaciones muy diversas; actualmente está teniendo una gran relevancia sobre todo en el desarrollo de controladores para aplicaciones biomédicas, tal es el caso de los resultados publicados [8, 9], que son sólo una muestra del gran impacto que provoca el uso del control inteligente en aplicaciones complejas.

Otro tipo de controlador inteligente que ha tenido un gran desarrollo en los últimos 20 años es el de los controladores difusos, lo cual queda ejemplificado por la inmensa cantidad de aplicaciones y desarrollos en este sentido, de los cuales resulta predominantemente interesante la transición de los controladores difusos clásicos o tipo 1 [10], a los controladores difusos tipo 2, que nos permiten acercarnos al tratamiento del lenguaje natural de una forma más amigable [11].

En cuanto al desarrollo tecnológico, éste ha sido de suma importancia para hacer realidad la implementación de los controladores inteligentes [12, 13], un caso especial es el del Memristor, que si bien se plantea desde 1971, como el elemento faltante en la teoría de circuitos [14], no es sino hasta 2008 cuando se vuelve una realidad [15], y para muchos investigadores es considerado como una pieza fundamental para el futuro de la inteligencia artificial [16].

Desde hace 20 años ha habido una gran cantidad de avances en lo que a paradigmas de inteligencia artificial se refiere, lo cual evidentemente tiene una repercusión inminente en el perfeccionamiento del control inteligente, tal es el caso del desarrollo de sistemas bioinspirados, lo cual ha provocado nuevas tendencias y direcciones en la teoría de control. Este tema ha sido analizado por importantes estudiosos de la teoría de control [17, 18].

Resultaría una tarea prácticamente imposible el tratar de enumerar todos los desarrollos y aplicaciones del control inteligente en los últimos veinte años, sin embargo la pequeña muestra aquí mencionada da una buena idea de la importancia del uso de la inteligencia artificial para el desarrollo de la teoría de control y su impacto en muy diversas aplicaciones. Además de que nos proveen de un panorama general que nos permite evaluar que los retos que se plantearon en 1994 [4], se han cumplido prácticamente en su totalidad.

Retos actuales para el control inteligente

Los retos actuales para el control inteligente son:

1. Actualmente se ha tenido un gran avance en la mayoría de los retos formulados hace 20 años, sin embargo, conforme se va avanzando también se generan nuevas metas más lejanas.
2. Se espera que los sistemas inteligentes se conviertan en una parte integral de nuestra vida cotidiana.
3. Se requiere que se desarrollen sistemas de *software* modulares que puedan aprender y adaptarse a un entorno cambiante y desconocido; es el desafío que enfrentan muchos problemas del mundo real.
4. Hibridación de diferentes técnicas de inteligencia artificial, aplicadas al control de sistemas
5. Utilización del control inteligente para el desarrollo sustentable de la humanidad y el uso eficiente de la energía, así como para aplicaciones biomédicas y otros sistemas de la vida diaria que debido a su complejidad, variabilidad, alta presencia de incertidumbre y otras características representan un gran reto para la teoría de control.

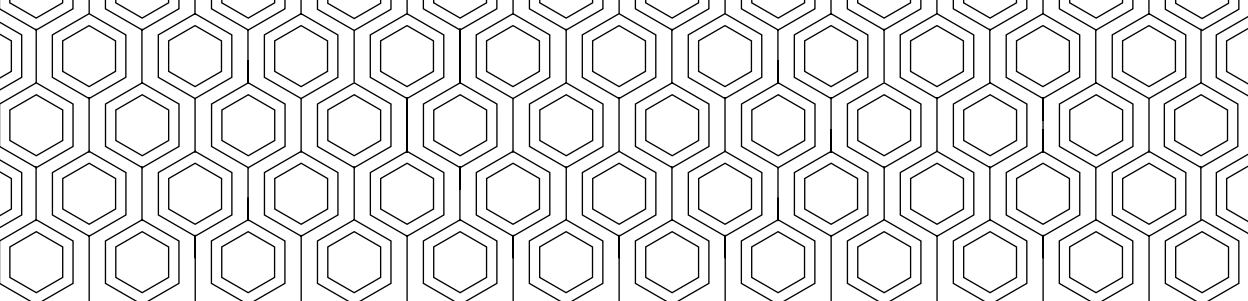
Comentario final

La definición de los sistemas inteligentes es función de las expectativas y del estado actual del conocimiento: muy probablemente los sistemas inteligentes de hoy serán los sistemas clásicos del mañana

Referencias

- [1] R. C. Dorf y R. H. Bishop, *Sistemas de control moderno*, 10ª ed. Pearson Educación, 2005
- [2] C. W. de Silva, *Intelligent Control: Fuzzy Logic Applications*. Boca Raton, FL: CRC Press 1995.
- [3] E. N. Sánchez y A. Y. Alanis. *Redes neuronales: conceptos fundamentales y aplicaciones a control automático*. Pearson Educación, 2006.
- [4] P. Antsaklis. *Defining Intelligent Control*, report of the Task Force on Intelligent Control, 1994.
- [5] E. B. Kosmatopoulos, M. M. Polycarpou, M. A. Christodoulou, and P. A. Ioannou, "High-order neural network structures for identification of dynamical systems," *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 6, no. 2, 1995.
- [6] A. U. Levin and K. S. Narendra, "Control of nonlinear dynamical systems using neural networks. II. Observability, identification, and control," *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol.7, no. 1, 1996.
- [7] E. N. Sanchez and J. P. Perez , "Input to state stability analysis for dynamic neural networks", *IEEE Transactions on Circuits and Systems - I*, vol. 48, pp. 1395-1398, November 1999.
- [8] A. Y. Alanis, B. S. Leon, E. N. Sanchez, and E. Ruiz-Velazquez, "Blood glucose level neural model for type 1 diabetes mellitus patients", *International Journal of Neural Systems*, vol. 21, no. 6, pp. 491-504, Diciembre 2011.
- [9] B. S. Leon, A. Y. Alanis, E. N. Sanchez, F. Ornelas Tellez, and E. Ruiz Velazquez, "Neural inverse optimal control via passivity for subcutaneous blood glucose regulation in type 1 diabetes mellitus patients", *Intelligent Automation & Soft Computing*, 2014.
- [10] J. M. Mendel and R. I. Bob John, "Type-2 fuzzy sets made simple", *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 10, no. 2, April 2002.

- [11] P. A. S. Birkin and J. M. Garibaldi, "A comparison of Type-1 and Type-2 fuzzy controllers in a micro-robot context", *Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, 2009.
- [12] A. Y. Alanis, M. Lopez-Franco, N. Arana-Daniel, and C. Lopez-Franco, "Discrete-time neural control for electrically driven nonholonomic mobile robots", *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, vol. 26, no. 7, pp. 630-644, June 2012.
- [13] C. Lopez-Franco, N. Arana-Daniel, and A. Y. Alanis, "Visual servoing on the sphere using conformal geometric algebra", *Advances in Applied Clifford Algebras*, vol. 22, no. 2, 2013.
- [14] L. O. Chua, "Memristor-the missing circuit element", *IEEE Transactions on Circuit Theory*, vol. 18, no. 5, September 1971.
- [15] J. M. Tour and T. He, "The fourth element", *Nature*, vol. 453, May 2008.
- [16] R. Kozma, R. E. Pino, and G. E. Pazienza, "Are memristors the future of AI?: a review of recent progress and future perspectives in advances", in *Neuromorphic Memristor Science and Applications*, no. 9, Springer Series in Cognitive and Neural Systems, 2012.
- [17] E. D. Sontag, "Some new directions in control theory inspired by systems biology", *Syst Biol (Stevenage)*, vol. 1, no. 1, June 2004.
- [18] K. M. Passino, "Biomimicry of bacterial foraging, f distributed optimization and Control", *IEEE Control Systems Magazine*, 2002.



Los últimos veinte años en el reconocimiento de patrones visuales con redes neuronales

NANCY ARANA DANIEL

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS COMPUTACIONALES,
CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍAS,
UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

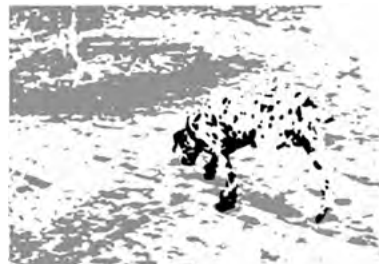
El reconocimiento de patrones es el estudio concerniente a cómo las máquinas pueden observar el ambiente, aprender a distinguir datos de interés (patrones) del fondo y realizar decisiones razonables acerca de las categorías a las que pertenecen dichos datos.

Herbert Simon, premio Nobel de Economía 1978, en su trabajo de racionalización del proceso de toma de decisiones (considerado una de sus más importantes contribuciones) afirmaba que mientras el ser humano cuente con patrones más relevantes a su disposición, mejor será la decisión que tome en cualquier proceso. La importancia de reconocer patrones queda asentada en sus trabajos, sin embargo el área de reconocimiento tiene alrededor de 54 años de estudio y aún no entendemos del todo cómo es que los humanos reconocemos todo tipo de patrones.

En la figura 1 se muestran patrones visuales difíciles de reconocer a simple vista, pero que con un poco más de concentración pueden ser encontrados por el ojo humano, aunque siguen siendo retos de alta complejidad para sistemas autónomos.



(a)



(b)

Figura 1. a) Insecto camuflado como el fondo floral en el cual está parado (fotografía de Philipp Psurek, 2008). b) Perro dálmata, se pierde con el fondo fácilmente al convertir a blanco y negro la imagen.

Las aplicaciones del reconocimiento de patrones van desde reconocimiento de lenguaje natural, caligrafía a mano alzada, hasta detección de fallas en sistemas de maquinaria compleja o incluso como aplicaciones auxiliares en el diagnóstico médico.

Redes neuronales artificiales, antecedentes históricos

Una de las más importantes metodologías para abordar el problema de reconocimiento de patrones son las redes neuronales artificiales (RNA), las cuales pueden ser vistas como modelos matemáticos de las redes neuronales biológicas, junto con los algoritmos de entrenamiento con los cuales las RNA aprenden.

El desarrollo de estas comienza en 1943, junto con el primero modelo de neurona (sin algoritmo de entrenamiento) visto como una compuerta lineal con umbral incluido, realizado por Warren Sturgis McCulloch y Walter Pitts [1]. El modelo pondera con pesos (w) una serie de entradas (x), evalúa si la sumatoria ponderada de dichas entradas rebasa o no un umbral, lo que hace que la compuerta “dispare” una salida binaria $\{1, 0\}$ o una bipolar $\{1, -1\}$ (figura 2).

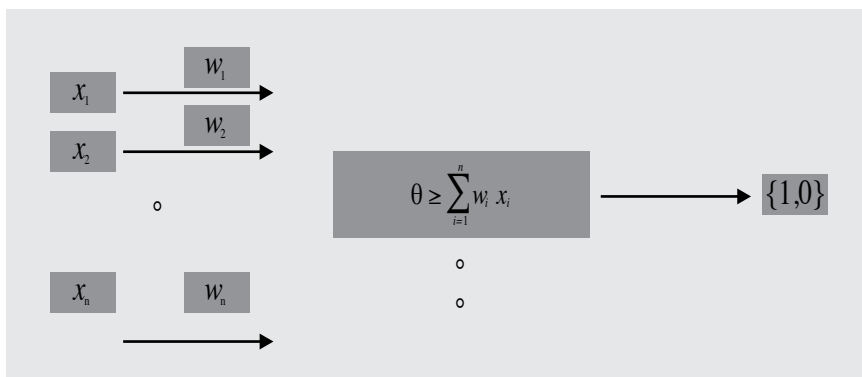


Figura 2. Compuerta lineal con umbral de McCulloch-Pitts.

El principio de aprendizaje en el cual basan su funcionamiento la mayoría de RNA fue propuesto en 1949 por el psicólogo canadiense Donald Hebb [2]. La Regla de Hebb afirma que “cuando un axón de una célula A está lo suficientemente cerca de una célula B, como para excitarla, y participa repetida o persistentemente en su disparo, ocurre algún proceso de crecimiento o cambio metabólico, en una o en ambas células, de modo tal que la eficacia de A, como una de las células que hacen disparar a B, aumenta”.

Basado en el principio hebbiano, en 1957 Frank Rosenblatt propone el primer modelo neuronal con algoritmo de entrenamiento y lo nombra perceptrón [3]. En 1960 el profesor de la Universidad de Stanford Bernard Widrow y su alumno Ted Hoff desarrollan y presentan el “Elemento Lineal Adaptativo”, ADALINE, en el cual la adaptación de los pesos se realiza a través de gradiente descendente calculado sobre la función de error de clasificación [4].

Tanto el perceptrón como el ADALINE realizan clasificaciones binarias de los datos de entrada adaptando una variedad lineal para separar el espacio de características en las dos clases mencionadas. El vector de ponderadores, llamado vector de pesos (w), define la dirección de la variedad lineal, mientras que el umbral (θ) la distancia de separación de la variedad con respecto al origen.

Por ejemplo, si se quisiera reconocer patrones bidimensionales que representaran perros y/o leones y dichos datos mantuvieran relaciones lineales entre las clases, el algoritmo de adaptación de los pesos del perceptrón y ADALINE trataría de ajustar la línea que divide el espacio R^2 en dos partes, en una de ellas yacerían los patrones de entrenamiento descritos como leones

y en la otra los patrones correspondientes a los perros (figura 3). De esta manera, con unos pocos patrones de entrenamiento ambas unidades de procesamiento neuronal pueden obtener una regla (función lineal) tal que, al evaluarla con otro patrón de entrada (x), indique en qué parte del espacio se encuentra, si en la que pertenece a los leones o a los perros.

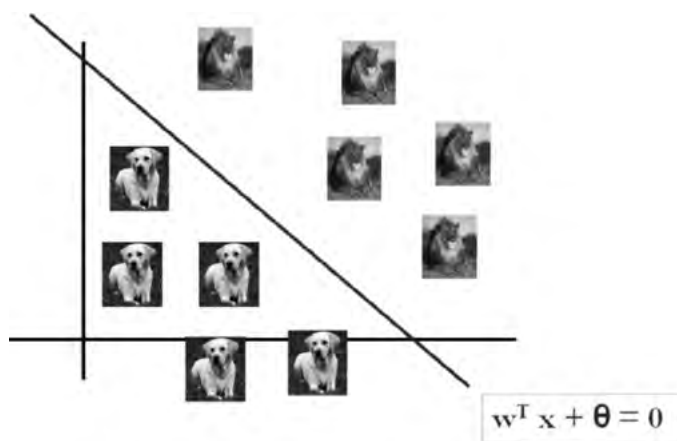


Figura 3. Interpretación geométrica del proceso de reconocimiento de patrones bidimensionales realizada por un perceptrón o un ADALINE. El vector de pesos define la dirección de la línea; el escalar θ define la separación de la línea con respecto al origen.

No obstante los avances que había tenido el desarrollo de algoritmos de aprendizaje artificial, en 1969 dos reconocidos investigadores del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), Marvin Minsky y Seymour Papert, publican un artículo haciendo referencia a la ineficacia del perceptrón y de ADALINE para la resolución de problemas no lineales y concluyen que “La mayoría de o escrito acerca de los perceptrones... carece de valor científico” [5], eso básicamente provoca lo que se conoce como el invierno de las redes neuronales, en el que por una década se frena el trabajo público en esta línea de investigación.

El trabajo desarrollado en 1974 por Paul Werbos, quien fuera un estudiante de doctorado de la Universidad de Harvard, propone una solución a problemas no lineales usando redes de neuronas artificiales entrenadas con su algoritmo de propagación hacia atrás del error [6]. Este algoritmo es de suma importancia, ya que es el primero de su clase que pudo ser usado para entrenar redes de neuronas artificiales y de alguna manera es el “reactivador” de la investigación pública en esta línea de investigación.

En la figura 4 se puede apreciar un problema de clasificación no lineal en R_2 que ha sido resuelto usando una red multicapa entrenada con propagación hacia atrás. Se aprecian dos clases (círculo rojo y círculo blanco) separadas por seis líneas (definidas por las neuronas en la capa oculta de la red). El espacio descrito por las seis líneas corresponde a los patrones de la clase círculo blanco mientras que los demás patrones (clase roja) yacen en la otra parte del espacio de características separado por dichas líneas. Observe que hay otras tres líneas que corresponden a otras tantas unidades de procesamiento que no ayudan a la clasificación, pero sí auxilian a que el error de entrenamiento decaiga más rápidamente.

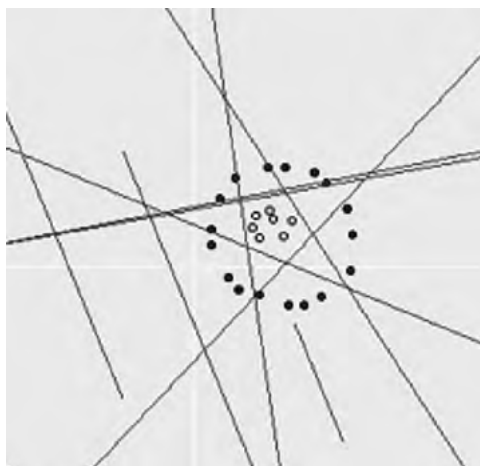


Figura 4. Clasificación binaria no lineal realizada por una red neuronal multicapa entrenada con el algoritmo de propagación hacia atrás del error. Observe que los patrones descritos con círculos blancos quedan contenidos en un área limitada por líneas que los separan de aquellos datos representados como círculos rojos.

Posteriormente, hacia 1982, David Rumelhart, un psicólogo dedicado al estudio de la cognición humana, comienza con el uso del algoritmo de Paul Werbos, y en 1986 con sus artículos publicados en dos volúmenes intitulados *Parallel Distributed Processing* populariza dicho algoritmo, de esa manera dio fin al invierno de las RNA. En el mismo año el físico John Hopfield, de Princeton, propuso un modelo conexionista de red, la red Hopfield, por lo que la investigación en RNA comienza a ser muy fuerte entre la comunidad científica hasta nuestros días.

Evolución de los descriptores visuales usados con RNA para reconocimiento de patrones

La información de los patrones por reconocer mediante una RNA debe ser codificada como vectores de características n -dimensionales para que dicho algoritmo aprenda a distinguirlos y evaluarlos. El proceso que traduce una imagen a un vector de características se conoce, en reconocimiento de patrones, como pre-procesamiento de la información y es igualmente importante que el desarrollo del algoritmo de reconocimiento.

En los siguientes párrafos se pretende brindar un recorrido histórico de los descriptores de imágenes usados conjuntamente con los algoritmos más recientes de clasificación de patrones neuronales para llevar a cabo el reconocimiento.

En la década de los ochenta [7], las pirámides y espacios de escala proporcionaban diferentes características según el nivel (figura 5). Las ondoletas [9], los modelos físicos conocidos como *snakes* [10], los campos aleatorios de Markov (MRF) [11] y los filtros de Kalman corresponden a esta clase de descriptores.

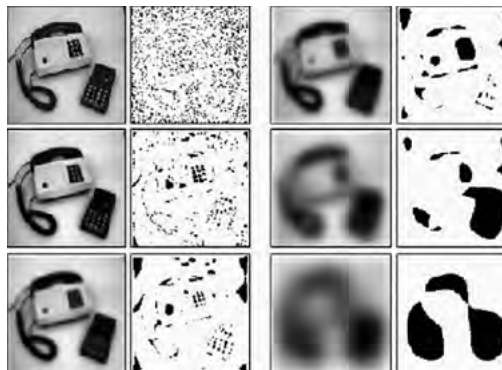


Figura 5. Descomposición piramidal de una imagen. Se observan diferentes características según la escala. Se puede notar que el teclado del teléfono es apreciable en la segunda fila de la columna uno, mientras que el teclado de la calculadora se distingue hasta la imagen de la tercera fila y primera columna. Las imágenes de la segunda columna proporcionan información sobre conectividad de los objetos en las imágenes [8].

La década de los noventa destaca por la aparición de la teoría estadística del aprendizaje aplicada al desarrollo de las máquinas de vector soporte (svm por sus siglas en inglés), que son los algoritmos de aprendizaje óptimos más usados en nuestros días por su alta precisión en el reconocimiento de patrones [12]. En 1993, Vladimir Vapnik y Corinna Cortes desarrollaron la svm en el

laboratorio de AT&T y en 1995 se publica en la revista *Machine Learning*. Los problemas resueltos por las SVM suelen ser altamente no lineales y multiclase, como el mostrado en la figura. 6. Actualmente muchos algoritmos de extensión de SVM han sido desarrollados por la comunidad de investigación como la Clifford Support Vector Machine (CSVM) que trabaja con números reales, complejos e hipercomplejos como información de entrada [13].



Figura 6. Clasificación de cuatro categorías usando una SVM con kernel gaussiano.

Los vectores de soporte de cada clase aparecen como círculos de radio mayor con respecto a los demás datos. Cada color de fondo corresponde a una clase diferente.

En el año 2000 los modelos híbridos de visión computacional y sistemas inteligentes para clasificación de patrones visuales se popularizan ampliamente. Los reconocedores de objetos por medio de descriptores locales [14] como los mostrados en las figuras 7, 8 (obtenidas de las fuentes [14], [15]) permiten que tareas como el reconocimiento de caras se torne en una actividad relativamente eficiente.

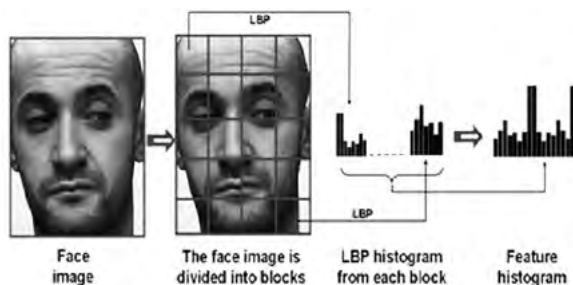


Figura 7. Obtención de descriptores locales para caras humanas. La cara se discretiza en bloques de píxeles, a los cuales se les calcula un histograma de patrones locales binarios para construir el histograma de características final [14].

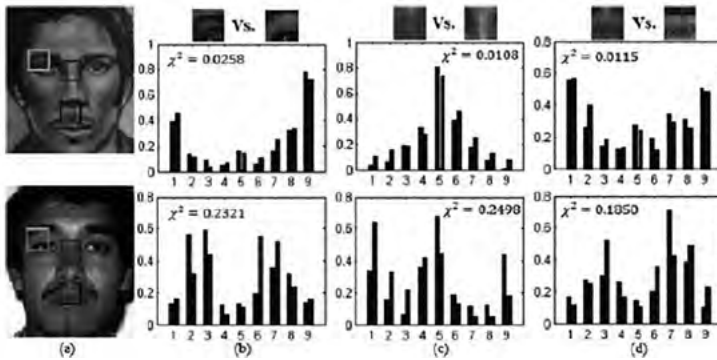


Figura 8. Obtención de descriptores locales de características sobresalientes de rostros humanos (cejas, ojos, nariz, boca). Las características obtenidas se codifican como descriptores locales y se comparan para obtener un porcentaje de parecido y reconocimiento [15].

La combinación de descriptores de siluetas 2D y 3D con máquinas de vectores de soporte ha producido sistemas robustos de reconocimiento de objetos, en particular. En [16] se presenta un enfoque para reconocer cuerpos humanos en poses no pedestres (figura 9).

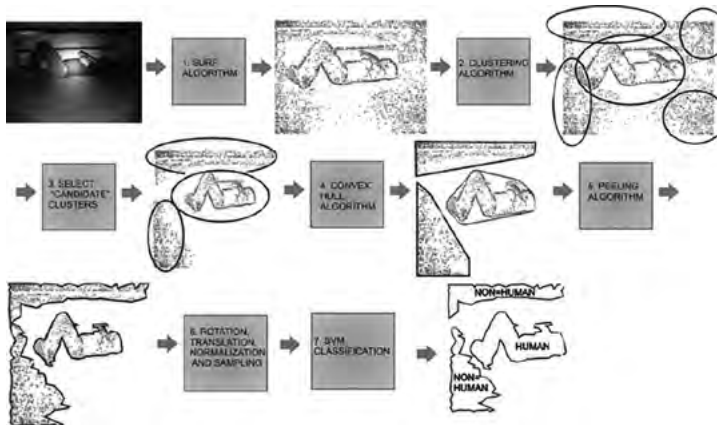


Figura 9. Sistema de reconocimiento de humanos en poses no pedestres. Se aplica un algoritmo de reconocimiento de características visuales a las imágenes como primer paso. Posteriormente un algoritmo de agrupamiento define nubes de puntos. Se eliminan nubes de puntos que no cumplan con un número mínimo de características y a las restantes se les aplica un algoritmo de envolvente convexa. Se detalla la envolvente obtenida para lograr siluetas precisas que se normalizan rotándolas, trasladándolas al origen del sistema coordenado, para posteriormente muestrearlas y armar un descriptor disperso de características con el que se entrena una máquina de vector soporte para que reconozca y distinga entre siluetas humanas y objetos.

Los reconocedores de patrones se aplican en nuestros días en tareas tan diversas como el reconocimiento de características en terrenos escabrosos con el objeto de describir áreas de terreno para producir mapas que permitan la navegación robótica autónoma [17]. Cada área debe ser reconocida y relacionada con un costo que indique qué tan caro es atravesarla. Esta información será usada por un sistema robótico para planear trayectorias de costo mínimo. En la figura 10 se observa un área de terreno exterior no estructurado (derecha) y su correspondiente mapa de costos (izquierda), los costos más altos tienden al color rojo, mientras que los costos más bajos varían del verde al azul.

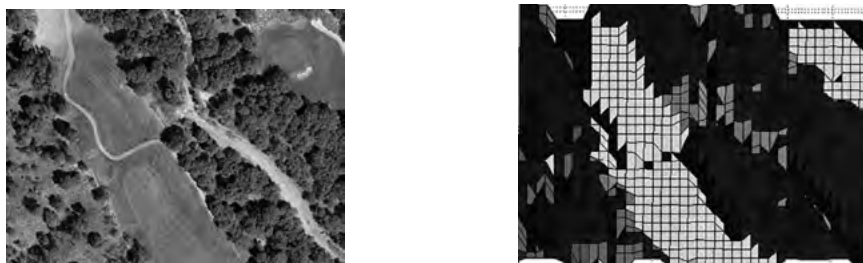
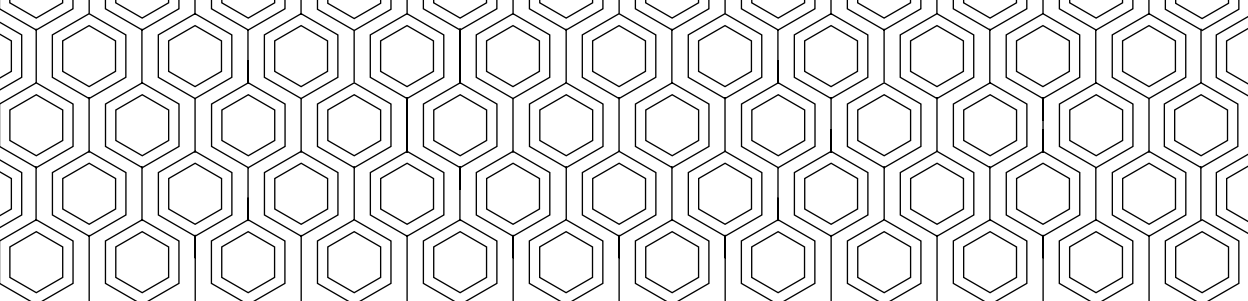


Figura 10. Izquierda: Imagen de un área de terreno no estructurado con pendientes, vegetación densa y terracería. Derecha: El mapa de costos producido por un algoritmo que ha aprendido a reconocer tipos de terreno y relacionarlos con costos elevados si es difícil atravesarlos (colores rojo y naranja para pendientes y vegetación densa), o costos bajos si el terreno es de fácil tránsito (colores verde y azul para terrenos planos y caminos marcados de poca pendiente).

Referencias

- [1] D. Michie, D. J. Spiegelhalter, and C. C. Taylor, Eds. *Machine Learning, Neural and Statistical Classification*. 1994.
- [2] D. O. Hebb. *The Organization of Behavior, a Neuropsychological Theory*. John Wiley & Sons, 1949.
- [3] F. Rosenblatt, *Principles of Neurodynamics: Perceptrons and the Theory of Brain Mechanisms*. Spartan Books, 1962.
- [4] B. Widrow, "An adaptive 'ADALINE' neuron using chemical memistors", Solid-State Electronics Laboratory, Stanford Electronics Laboratories, Stanford University, California, Tech. Rep. 1553-2, 1960.
- [5] M. Minsky and P. Seymour, *Perceptrons: An Introduction to Computational Geometry*. The MIT Press, 1969.

- [6] P. J. Werbos, "Beyond Regression: New Tools for Prediction and Analysis in the Behavioral Sciences". PhD thesis, Harvard University, 1974.
- [7] S. Hanan, "The quadtree and related hierarchical data structures", vol 16, no. 2, pp. 187-260, June 1984.
- [8] "Introducción a la visión por computador", notas de clase para el Programa de Maestría en Electrónica con Énfasis en Procesamiento Digital de Señales, Escuela de Ingeniería Electrónica, Tecnológico de Costa Rica Dr. Pablo Alvarado Moya, 2013.
- [9] S. G. Mallat, "A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol 11, no. 7, pp. 674-693, August 2002.
- [10] M. Kass, A. Witkin, and D. Terzopoulos, "Snakes: active contour models", *International Journal of Computer Vision*, vol. 1, no. 4, pp. 321-331, 1988.
- [11] K. V. Mardia, "Multi-dimensional multivariate Gaussian Markov random fields with application to image processing", *Journal of Multivariate Analysis*, vol. 24, no. 2, pp. 265-284, February 1988.
- [12] C. Cortes and V. Vapnik, "Support-vector networks", *Journal Machine Learning*, vol. 20, no. 3, pp. 273-297, September 1995.
- [13] E. Bayro-Corrochano and N. Arana-Daniel, "Clifford support vector machines for classification, regression, and recurrence", *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 21, no. 11, pp. 1731-1746, November 2010.
- [14] J. Chen, S. Shan, C. He, G. Zhao, M. Pietikäinen, X. Chen, and W. Gao, "WLD: a robust local image descriptor", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 32, no. 9, pp. 1705-1720, September 2010.
- [15] H. Kiani and T. Sim, "Face recognition by Local Radon Binary Pattern" in *Proceedings 19th IEEE International Conference on Image Processing*, Lake Buena Vista, Orlando FL, September-October 2012.
- [16] N. Arana-Daniel, G. López-González, C. López-Franco, and A.Y. Alanis, "Efficient non-convex peeling algorithm for 2D and 3D shape description", in *Proceedings Reunión de Otoño de Potencia, Electrónica y Computación, ROPEC*, 2011.
- [17] N. Arana-Daniel, R. Valencia-Murillo, C. López-Franco, and A.Y. Alanis, "Rough terrain perception through geometric entities for robot navigation", in *Proceedings 2nd International Conference on Advances in Computer Science and Engineering*, 2013.



Sistemas basados en conocimiento

LUIS ALBERTO CASILLAS SANTILLÁN

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS COMPUTACIONALES,
CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍAS,
UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

Introducción

Este trabajo es parte de un esfuerzo de la comunidad científica de la División de Electrónica y Computación del Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías de la Universidad de Guadalajara, en un intento por rescatar la evolución del conocimiento en diferentes vertientes de las modernas tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC). Concretamente, el presente documento intenta recolectar los eventos cruciales en torno a los sistemas basados en conocimiento (SBC).

Suele pensarse que los SBC corresponden al periodo clásico de la inteligencia artificial, de 1956 a 1986, en el cual predominaban representaciones de conocimiento simbólicas que eran tratadas por medio de mecanismos propios de las lógicas proposicional, de primer orden o temporal. El advenimiento de la inteligencia artificial de enfoque moderno, de 1986 a la fecha, con sus representaciones subsimbólicas (números reales) y tratamiento basado en el cálculo, ha permitido la aplicación de estrategias propias de

la inteligencia artificial en entornos que sólo la ciencia ficción había presentado durante los años cincuenta y sesenta. De este modo, toda clase de artefactos de las TIC con capacidades “inteligentes” son comercializados y en general están disponibles para la mayoría de habitantes, principalmente, de ciudades, por todo el planeta. Estas capacidades operan normalmente de forma transparente para los usuarios, sin que éstos se percaten de la operación inteligente de los dispositivos. Sin embargo, la manifestación tácita de los comportamientos inteligentes en estos artefactos, implica: simplicidad de operación, robustez, adaptabilidad, tratamiento seguro de los datos (incluyendo la protección de los mismos), respuesta activa en escenarios inesperados, etcétera.

De este modo, productos de la inteligencia artificial de enfoque moderno se encuentran en nuestra cotidianidad, provistos de modelos que permiten el aprendizaje para el manejo de máquinas, la gestión de incertidumbre y hasta la capacidad de evolucionar a lo largo del tiempo. Las redes neuronales artificiales, sistemas difusos y algoritmos genéticos en las entrañas de estos aparatos, son la base del comportamiento inteligente de la mayoría de productos inteligentes que se presentan comercialmente en los mercados tecnológicos. De este modo, las preguntas que surgen son: ¿dónde están actualmente los SBC?, ¿son realmente un modelo extinto?

El presente esfuerzo está orientado a responder estas preguntas, al tratar los últimos veinte años de esta tecnología; que lejos de estar extinta, se encuentra en un periodo de robusta consolidación en el contexto de la actual economía global que finalmente está dando al conocimiento el correcto valor.

El problema radica en la representación

Desde la consolidación del paradigma de cómputo reconocido como “modelo de von Neumann”, presentado originalmente en [1] y en el contexto del desarrollo de la máquina EDVAC entre 1945 y 1947, las computadoras se han apegado a un esquema de operación que por un lado las provee de certeza operativa, pero por otro lado las torna rígidas e inflexibles en el tratamiento de problemas de naturaleza emergente y no-lineal. Tal como se muestra en la figura 1, este modelo cuenta con un sistema de representación interna

que supone una codificación muy específica para garantizar la operación; restringiendo el uso de las computadoras en una diversidad de escenarios y situaciones que en principio tienen una manifestación inherente que difiere de la codificación máquina esencial. Este esquema de operación computación gesta una categoría de máquinas denominadas *vonneumannianas*.

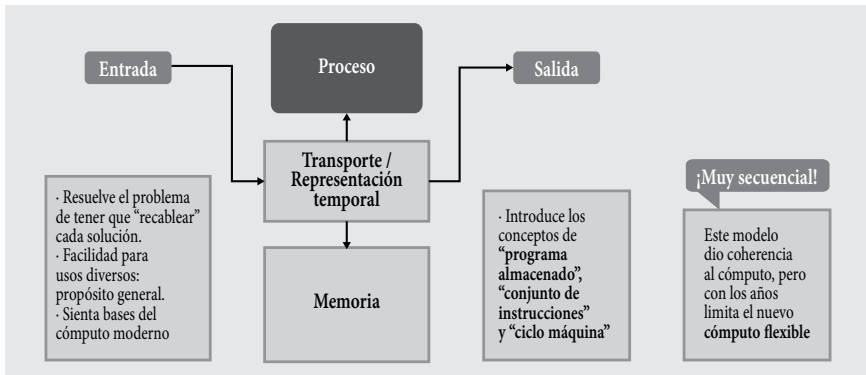


Figura 1. Esquema de operación de las máquinas vonneumannianas, desde 1947.

Es preciso entender, en el contexto del paradigma vonneumanniano de cómputo, que toda representación computacional tiene una parte pasiva (datos, informaciones, etc.) y una parte activa (operadores, instrucciones, métodos, rutinas, etc.).

La parte activa de las máquinas no ha mostrado grandes cambios en su esencia operativa. A pesar de los impresionantes avances tecnológicos que han ido poblando con elevadas escalas de integración a las unidades de procesamiento, con una miríada de ALU⁷ agrupadas en núcleos (*kernels*), y del mismo modo se han logrado reunir con innovadores protocolos de comunicación cantidades impresionantes de equipos formando racimos (clústeres) y estos racimos en agrupaciones que gradualmente conforman *la nube*; en el fondo cada ALU activa es irremediabilmente vonneumanniana en el instante de operar. Este aspecto esencial es la causa de la complejidad que define los límites de lo computable.

Las problemáticas que guardan en su esencia una complejidad tal que supone para las máquinas desafíos en cuanto a consistencia, completitud y

⁷ ALU: *Arithmetic Logic Unit* (unidad aritmética lógica).

decibilidad en su tratamiento, deben ser abordadas con una estrategia diferente. Es preciso un esfuerzo específico de representación del conocimiento que describe a dichas problemáticas. En el entendido que el conocimiento, *per se*, incluye aspectos pasivos y activos.

De este modo, todos los avances en inteligencia artificial giran en torno a nuevas capacidades de representación, la parte *pasiva* es modelada creativamente con estructuras de datos no-lineales y la parte *activa* consiste en gestionar adecuadamente los operadores estándares que describen el comportamiento vonneumanniano: en la medida que necesitamos representar configuraciones innovadoras para datos, informaciones e incluso conocimiento, es preciso construir paralelamente operadores congruentes: que usan creativamente las funcionalidades vonneumannianas disponibles.

Así, siempre es una cuestión de representación y ésta incluye normalmente ambos aspectos: pasivos y activos (desde *Data Driven*⁸ a la fecha). Incluyendo, además, todos los periodos identificados para la práctica de la inteligencia artificial.

Por tanto es válido entender que un sistema de información propio de la gestión tradicional, como un control de inventarios o un sistema de nómina automatizado, son representaciones del conocimiento que en la práctica personas tienen que aplicar empíricamente —y en ocasiones, incluso, manualmente— en el desarrollo de las mismas tareas. También es válido admitir que cualquier sistema de orden “inteligente” de cualquier periodo de la inteligencia artificial es una representación de conocimiento. La diferencia radica en la clase de conocimiento que se desea representar sintéticamente dentro de la máquina y la cuota de complejidad que este conocimiento contiene en su esencia. Algunas clases de conocimiento son más computables que otras, reduciendo cualquier problema que debe ser tratado por una máquina, a un problema de representación de conocimiento. Siempre es una cuestión de representación. Incluso, una concepción extrema de este pensamiento consiste en admitir que toda herramienta (incluyendo martillos, pinzas, arados, timo-

⁸ Data Driven: Modelo de desarrollo de *software* dirigido por los datos y promovido desde mediados de los años setenta. Este modelo fue la base de todo el movimiento promotor de las buenas prácticas en el desarrollo de *software* y ahora es denominado “ingeniería de *software*”.

nes de barco, etcétera) es una representación sintética de un conocimiento que orgánicamente está presente (de forma innata o empírica) en algún ser vivo.

Gestionar las representaciones de conocimiento

Una vez admitido que todo tratamiento sintético de una problemática consiste en encontrar una representación, surgen las preguntas: ¿qué representar?, ¿cómo representarlo? y ¿cómo gestionar las representaciones?

En la Edad Media, Ramón Llull [2] promovía que cada cuerpo de conocimiento fuera entendido como un árbol y los cuerpos de conocimiento formaban así bosques del saber. Había, incluso, un árbol para el cielo y otro para el infierno. La figura 2 muestra un ejemplo de esta noción de Llull. Tal aproximación jerárquica, como un árbol con sus ramas, sigue utilizándose para organizar los libros en bibliotecas y los conocimientos en instituciones educativas.⁹

No obstante la robustez del entendimiento jerárquico del conocimiento, este modelo es sumamente rígido y restringe la dinámica del conocimiento en su sentido más orientado a la aplicación y el aprovechamiento.

Actualmente el conocimiento es entendido como un recurso que puede vincularse a valores de orden económico. Luego de la contundente argumentación que han venido planteando especialistas en describir las emergentes sociedades del conocimiento, de los que destacan algunos trabajos [3, 4].

De este modo, cualquier organización tiene en su inventario de riquezas aquellas que normalmente pueden ser aceptadas como y tales por su naturaleza material; pero también la organización tiene un cúmulo de conocimiento que ha amasado en un periodo de tiempo y está constituido por elementos empíricos en las mentes de sus miembros: la posesión de datos o informaciones críticos, dominio de técnicas o estrategias e incluso los valores de la organización. Una organización como Google ejemplifica muy bien este valor agregado, pero intangible, de la organización, que termina influyendo en el valor económico total de la

⁹ Aunque en las instituciones educativas gradualmente se están liberando de esta aproximación jerárquica y moviéndose hacia un modelo más parecido a una red.

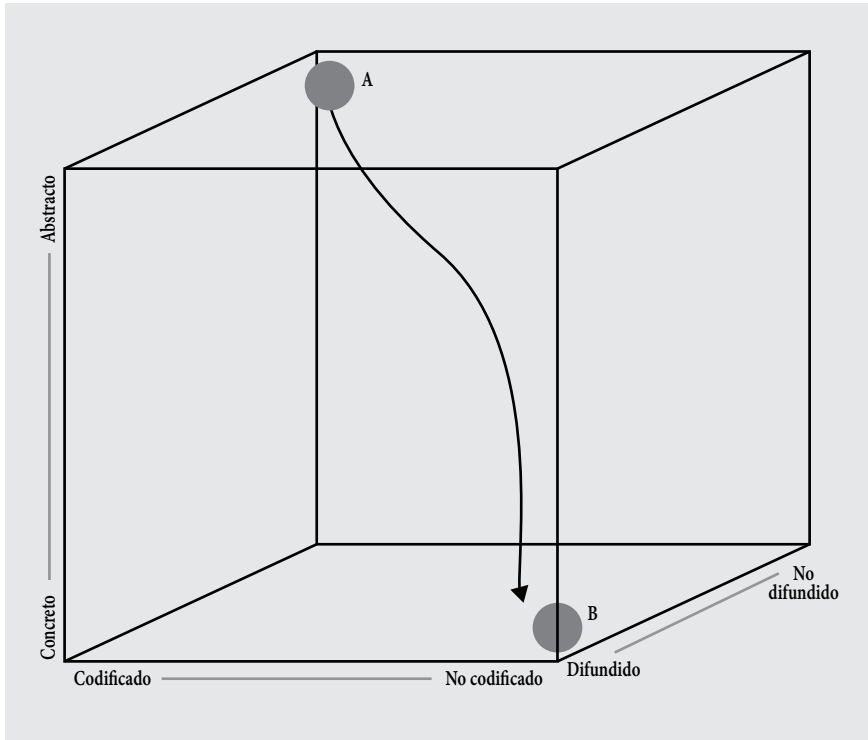


Figura 3. Ejemplo de mapeo en i-Space [5]. En este caso, un concepto está en la posición A y luego viaja a la posición B; a medida que dicho concepto se vuelve más concreto, menos codificado y mayormente difundido, se mueve gradualmente.

Tal como se modela en la figura 3, los conceptos se vuelven más accesibles en la medida que son conectados a la experiencia del observador (se concretizan), son presentados con elementos que el observador tiene en su mente (se descodifican) y se difunden sin restricción (son difundidos). Un ejemplo podría ser el conocimiento para sacar una fotografía, en un principio sólo unos pocos conocían los secretos detrás de las películas sensibles a la luz, la operación de los lentes y el revelado; mientras que ahora cualquier persona puede hacer una toma profesional e imprimir en casa sus fotografías. El conocimiento fue del punto A al punto B. Cuando el conocimiento que viaja es relativo a aspectos tecnológicos, a esta transición se le conoce como *ciclo social de tecnificación* [5]. Una extensión de este modelo fue presentada por [6], incluyendo una cuarta dimensión que modela la noción de la utilidad en el 4D i-Space.

En la medida que los ciclos sociales de tecnificación llevan a las TIC a manos de la gente común, en esa misma medida necesidades comunes de la gente buscan ser satisfechas por medio de las TIC. Aunque dicha satisfacción sea el comportamiento menos común en el contexto de las TIC.

Conocimiento: representación y gestión, los últimos veinte años

Con base en los acontecimientos observados en el periodo referido, desde 1994 se ha consolidado la “Era de la Información” debido a:

- La “mayoría” de la información de la humanidad ha sido digitalizada de algún modo.
- Nuevos paradigmas de programación de alta semántica (POO,¹⁰ 4GL,¹¹ CASE,¹² BD Inteligentes, etc.).
- Madurez en las comunicaciones entre máquinas. Se consolidan los modelos de trabajo basados en red (LAN, MAN, WAN, etc.), dejando a la zaga a los enfoques centralizados.
- Formalización de los almacenes de datos (DWH: *data ware housing*) y las técnicas de minería.
- Es distinguible un repunte en el uso de tecnologías propias de la inteligencia artificial subsimbólica con potencial comercial: control difuso en enseres domésticos, optimización evolutiva en la industria y aprendizaje máquina base en modelos neuronales.

A partir de 1995 inicia la “Era del Conocimiento”, con el reconocimiento del valor que tiene el conocimiento, y considerando: posesión, gestión, explotación, descubrimiento, filtrado, tratamiento, etc. Las organizaciones conscientes del valor del conocimiento han mostrado un diferencial competitivo respecto de sus similares que no lo han hecho.

Este periodo se distingue por los cruces posibles entre datos, soportados por los modelos *big-data* disponibles, que no sólo producen información

¹⁰ POO: Programación orientada a objetos.

¹¹ 4GL: Lenguaje de cuarta generación para procesar y gestionar bases de datos.

¹² CASE: Ingeniería de software asistida por computadora.

útil. El cruce de informaciones útiles genera conceptos: nociones de semántica elevada, por ejemplo:

- La conducta de un tarjetahabiente en cada época del año, en cada clase de establecimiento, en cada monto pagado o adeudado, etc.
- La tendencia de los habitantes de una zona de la ciudad a pagar el impuesto predial en cada época del año.

El acceso a las TIC se consolida en los países industrializados, aunque entre 1995 y 2000 en México sólo hay 66 sitios *web* por cada 1000 habitantes, mientras que llegan a 85 en Alemania.¹³ En el mismo periodo, en los países desarrollados dos tercios de las familias tienen acceso a internet, mientras que en México sólo se llega a 10%. A partir del 2000, en México el acceso a las TIC ha incrementado. Actualmente ronda 30%, lo cual es importante, pero insuficiente.

Se reconoce que el acceso a las TIC debe ser entendido como un derecho humano. Lo que abre las puertas a nuevas manifestaciones de nociones tradicionales de las manifestaciones humanas: comercio electrónico (eCommerce), eGobierno, eLearning, etcétera.

En el contexto del fenómeno económico denominado *globalización*, los artefactos propios de la Era del Conocimiento se convierten en el vehículo sobre el cual se montan las modernas nociones de la economía de mercado. Lamentablemente las economías en vías de desarrollo tienen, como siempre, un desafío mayor para integrarse competitivamente al contexto global de la economía. Las limitaciones tecnológicas, producto de diversos fenómenos combinados,¹⁴ suponen un retraso inherente. Esta circunstancia genera un efecto adverso que se repite en las economías emergentes: la disposición de productos comerciales propios de la modernidad, a la par de la indisposición en el soporte tecnológico para comprender a profundidad la operación de estos dispositivos y eventualmente reproducirlos o mejorarlos. El dilema

¹³ Datos disponibles en la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE).

¹⁴ Vinculables principalmente a limitaciones en los procesos educativos, con efectos complejos. Esto implica preocupantes desproporciones entre estudiantes de ingenierías versus estudiantes de ciencias sociales, económicas y administrativas. Lo que deja a un país sin el soporte tecnológico necesario.

es modernidad *versus* soporte tecnológico. La figura 4 ejemplifica esta circunstancia adversa.

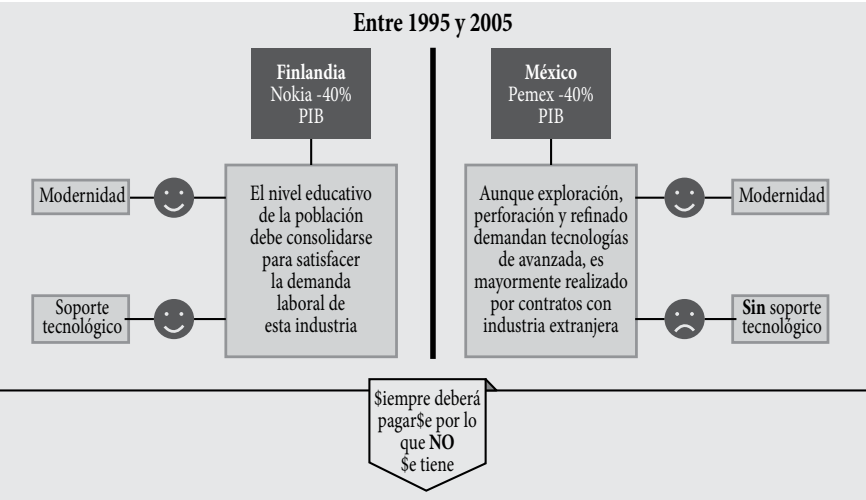


Figura 4. La estrategia global para economías emergentes es llevar la modernidad a las manos de las personas pero sin soporte tecnológico. Lo mismo sucede con la comercialización de modernos *gadgets* en países que no cuentan con el soporte tecnológico para producir dispositivos similares que puedan competir con aquellos que se compran en el extranjero.

Así, se comercializan globalmente toda clase de dispositivos sofisticados que representan a la modernidad. Aunado a interfaces intuitivas e impresionantes capacidades de representación, que simplifican los ciclos de tecnificación —lo cual es admirable—. Esto último implica un acceso a las TIC que seguirá gradualmente incrementando. No obstante esto, el soporte tecnológico demanda más tiempo. Requiere un profundo cambio en la esencia de los modelos educativos, que sabemos no sucederá por decreto.

Por ello los esfuerzos que se desarrollen en el terreno de la ingeniería del conocimiento (IC) permitirán a los equipos de cómputo un mejor proceso de la realidad, más fiel y amable con la manifestación natural de la misma.

La IC consiste en encontrar las estructuras complejas de datos que mejor modelan la realidad, así como los operadores específicos para gestionar dicho modelo. Desde la perspectiva de la inteligencia artificial clásica, el cálculo de predicados de primer orden modela y gestiona efectivamente el

nivel simbólico. Para la inteligencia artificial de enfoque moderno, el cálculo permite tratar el nivel subsimbólico.

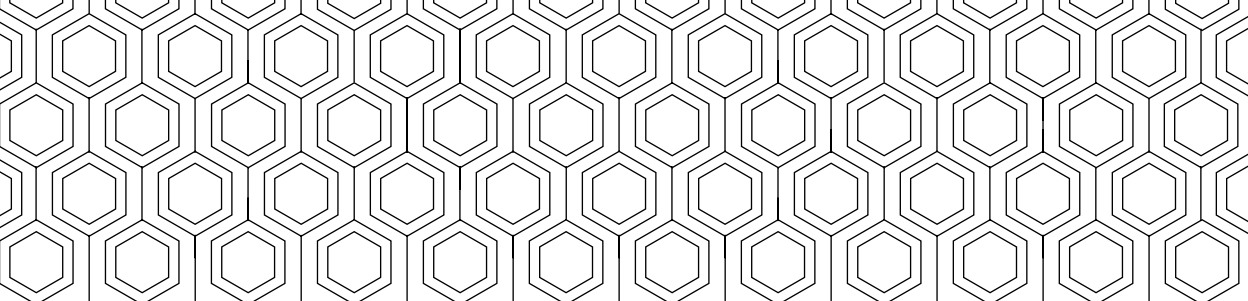
Durante los años sesenta y setenta el modelado fue principalmente simbólico, siendo los sistemas expertos (SE) el principal representante de esta aproximación. La aproximación clásica de los SE permitió que éstos fueran el primer producto comercializable de la inteligencia artificial. Hasta la fecha, los SE siguen siendo utilizados, aunque las facetas de interacción con el entorno de los mismos han cambiado. Ahora hay SE controlando procesos productivos y la seguridad de portales web, evaluando riesgos en asegurados, haciendo diagnósticos médicos, asistiendo en procesos de decisión basados en minería de datos y más, pero sin interactuar directamente con los usuarios, como solían hacerlo. Ahora los SE son alimentados con información de sensores, grandes bancos de datos, comunicaciones remotas, etc., y cuando un SE reacciona, su respuesta es llevada adelante con efectores automáticos de diversa índole.

Durante los años ochenta y noventa hay un repunte en técnicas subsimbólicas, siendo las redes neuronales artificiales (RNA) los sistemas de lógica difusa y los algoritmos genéticos los principales responsables de llevar adelante este movimiento. Estas tecnologías fueron creadas en décadas previas, pero es hasta este periodo cuando alcanzan una realidad pragmática gracias a los esfuerzos en la dimensión de la ingeniería por introducirlos en dispositivos de uso más cotidiano.

Desde el inicio de este siglo, la tendencia es claramente a la hibridación de técnicas. Este movimiento propicia el cómputo flexible, llevando a los sistemas de gestión tradicional al siguiente nivel en cuanto a flexibilidad, respuesta activa y robustez. Esta clase de sistemas suelen utilizar aproximaciones complejas para representar internamente el conocimiento. Estructuras que buscan modelar con fidelidad los fenómenos del entorno, con una aproximación equiparable al proceso que un cerebro natural sigue. Un modelo innovador denominado Análisis de Redes Complejas, permite tratar una diversidad de problemáticas de naturalezas diversas, usando una algoritmia común. El trabajo [7] es fundamental en esta nueva aproximación de la ciencia computacional, que propiamente es un movimiento conocido como “la nueva ciencia de las redes complejas”. Se invita al lector a conocer más al respecto de esta y otras aproximaciones de representación y gestión del conocimiento.

Referencias

- [1] J. V. Neumann, “First draft of a report on the EDVAC”, contract between the United States Army Ordinance Department and the University of Pennsylvania Moore School of Electrical Engineering University of Pennsylvania. Contract No. W-670-ORD-4926, June 30, 1945.
- [2] R. Llull, “Arbre de ciència”, Barcelona: Pere Posa, 20, August, 1505, in SC.L9695.482ab, Houghton Library, Harvard University, April 2014. [Online.] Available: <http://ids.lib.harvard.edu/ids/view/28468922?buttons=y>.
- [3] A. Hargreaves, *Enseñar en la sociedad del conocimiento. La educación en la era de la inventiva*. Barcelona: Octaedro, 2003.
- [4] M. Castells, *The Rise of the Network Society: The Information Age: Economy, Society, and Culture*, Vol. I. Wiley-Blackwell, 2nd. Ed., August 2009.
- [5] M. H. Boisot, *Knowledge Assets: Securing Competitive Advantage in the Information Economy*. Oxford University Press, 1999.
- [6] L. A. Casillas, “A multidimensional model to map knowledge,” *Journal of Knowledge Management Practice*, vol. 6, 2005. [Online.] Available: <http://www.tlainc.com/articl93.htm>.
- [7] A. L. Barabasi. *Linked. How Everything is Connected to Everything Else and What it Means for Bussiness, Science and Everyday Life*. Penguin, May 2003.



Internet de las cosas en los últimos veinte años

ALFREDO GUTIÉRREZ HERNÁNDEZ

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS COMPUTACIONALES,
CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍAS,
UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

A 20 años de la creación de la Red Universitaria de la Universidad de Guadalajara, y durante ese lapso, el desarrollo tecnológico en todo el mundo ha impactado a través de un vertiginoso avance en materia de ciencia y tecnología. En cuanto a internet, ha estado presente desde mucho antes de la consolidación de la Red Universitaria, trayendo consigo un conjunto de avances en materia de comunicaciones, e influencias en los ámbitos social, económico, comercial, político, gubernamental, médico y educativo, entre otros.

Sin embargo, de forma coincidentemente paralela, durante los últimos 20 años ha surgido y se ha desarrollado un fenómeno derivado de la fusión entre la internet y los objetos de uso cotidiano, que recientemente ha recibido la denominación de “internet de las cosas”¹⁵.

En el presente trabajo se hace un abreviada exposición de los eventos más representativos de las últimas dos décadas, el estado actual y las tendencias que ya se avizoran en lo que se refiere a internet de las cosas.

¹⁵ “Internet de las cosas” es el término resultante de la traducción directa del inglés “Internet of Things”.

Precursores

El telégrafo, inventado en 1832 por Baron Schilling con base en impulsos electromagnéticos, se estableció como un importante medio de comunicación. Funcionaba con electricidad, y fue complementado por el código creado por Samuel Morse en 1844, así fue completado con dos de los elementos de la teoría básica de la comunicación: el medio y el código.

En 1926, Nikola Tesla, al lograr transmisiones inalámbricas, pronunció sus proféticas palabras:

Cuando lo inalámbrico esté perfectamente aplicado, la tierra entera se convertirá en un enorme cerebro, lo que de hecho es, todas las cosas siendo parte de un todo real y rítmico [...] y los instrumentos a través de los cuales seremos capaces de lograrlo serán asombrosamente simples comparados con nuestro actual teléfono. Un ser humano será capaz de cargar uno en su bolsillo [1].

En 1950, Alan Turing refiere:

Se puede establecer que lo mejor será proporcionar a las máquinas los mejores sentidos¹⁶ que el dinero puede comprar, y entonces enseñarles a hablar y entender inglés. Dicho proceso podría seguir la forma de enseñanza normal que se utiliza con un niño [2].

En su obra *Understanding Media*, del año 1964, Marshall McLuhan menciona: “A través de medios eléctricos, podemos establecer una dinámica mediante la cual todas las tecnologías previas -incluyendo las ciudades- serán traducidas a sistemas de información” [3]. Y para 1966, Karl Steinbuch asentaba: “En unas cuantas décadas, las computadoras estarán entrelazadas en casi cualquier producto de la industria”.

En 1969 inició el proyecto Arpanet del Departamento de la Defensa de Estados Unidos, que evolucionó al incorporarle el protocolo TCP/IP creado en 1974, el Sistema de Nombres de Dominio (DNS) en 1984, y el concepto de *World Wide Web* (www) en 1989, para dar lugar a la internet que utilizamos en nuestros días.

¹⁶ Alan Turing se refería entonces a lo que hoy conocemos como sensores.

Inicios

La primera “cosa” conectada a internet se le acredita a John Romkey, quien en 1990 logró encender y apagar una tostadora de pan por ese medio. Utilizando el protocolo SNMP a través de una computadora conectada a una red TCP/IP, Romkey envió los comandos necesarios para realizar tal hazaña, así se ganó un lugar protagónico en la ITEROP Conference de ese año.

En 1993, Quentin Stafford-Fraser y Paul Jardetzky crearon una conexión de video a través de la red para observar una cafetera colocada en el laboratorio de cómputo de la Universidad de Cambridge, con el objeto de vigilar los niveles de café en la jarra del aparato.

La imagen de la cafetera era refrescada tres veces por minuto y enviada a los servidores del edificio, después fue puesta en línea para ser vista por el público cuando los navegadores comenzaron a ser capaces de mostrar imágenes. Curiosamente, la cámara siguió transmitiendo hasta el año 2001, cuando decidieron apagar el sistema.

En el año 1994, adelantado a su tiempo, Steve Mann, mediante un complicado entramado de cables y dispositivos, creó un sistema con una cámara colocada como casco y que transmitía imágenes a una red TCP/IP a través de radiofrecuencia; la llamó WearCam. Así inició el uso del concepto *Weareable Technologies*¹⁷, sus contribuciones derivaron más tarde hacia las tecnologías de realidad virtual y cómputo inmersivo.

En el Instituto Tecnológico de Massachusetts, Scott Brave y Andrew Dahley, en compañía del profesor Hiroshi Ishii desarrollaron un proyecto denominado inTouch, que consistía en un conjunto de rodillos que al ser movidos con la palma de la mano, dicho movimiento era transmitido a otro conjunto de rodillos idéntico.

El proyecto inició transmitiendo los movimientos por medios mecánicos, para luego hacerlo por medios eléctricos a través de sensores y motores conectados de forma directa de un conjunto de rodillos a otro. En una fase posterior del proyecto incluyeron un protocolo de comunicación con tal de poner una computadora de por medio, y finalmente incorporaron el protocolo TCP/IP para obtener una respuesta remota. Con el concepto de “objetos distribuidos

¹⁷ En español se ha introducido el término como “tecnologías vestibles”, pero no logra expresar el sentido original, que se acerca más a algo como ‘tecnologías para vestirse’.

físicamente sincronizados”, según los autores, su objetivo era crear una suerte de “teléfono tangible” para establecer una “comunicación táctil” [4].

Mark Weiser construyó en 1998 una fuente de agua afuera de su oficina, y el flujo y la altura de la fuente imitaba en tiempo real las tendencias del volumen del líquido y de los precios en el mercado de valores. Weiser escribió:

La computación ubicua es más o menos lo opuesto a la realidad virtual... mientras la realidad virtual pone a las personas en un mundo generado por computadora, la computación ubicua obliga a la computadora a vivir aquí, en el mundo, con la gente [5].

Kevin Ashton, director ejecutivo del Auto-ID Center utiliza por primera vez el término “internet de las cosas” como título de una presentación realizada ante Procter & Gamble en 1999, con la intención de enlazar la entonces nueva idea del uso de RFID en la cadena de suministros de P&G, con la idea de utilizar internet para algo más allá de sólo obtener la atención de los ejecutivos. Para 2006, Ashton consideraba que a pesar de la importancia que el concepto había cobrado, aún estaba siendo mal entendido [6].

En el mismo año, Neil Gershenfeld consideraba desde una retrospectiva, que el rápido crecimiento del *World Wide Web* pudo ser el “detonante para la explosión real”, la cual consiste en que las cosas comiencen a utilizar la red [7].

Al mismo tiempo, Neil Gross planteaba la posibilidad de que el planeta Tierra vistiese una piel electrónica que utilizaría internet para dar soporte y medio de transmisión a sus sensaciones, tendría integrados termostatos, medidores de presión, detectores de contaminación, cámaras, micrófonos, sensores de glucosa, electrocardiógrafos, electroencefalógrafos; éstos medirán y monitorearán ciudades, especies en peligro de extinción, la atmósfera, los navíos, las carreteras, y flotas de camiones, nuestras conversaciones, nuestros cuerpos e incluso nuestros sueños [8].

En 2000, la marca de electrodomésticos LG anuncia su primer “internet refrigerator”, también conocido como “smart refrigerator”, con capacidad para llevar un registro del tipo de productos que contiene, así como su cantidad, mediante el uso de códigos de barras o RFID; determinar cuándo

es necesario resurtir algún producto; guardar memorandos; con *web cam*, navegador *web*, correo electrónico, televisión, radio y reproductor MP3.

David Rose, en el año 2002, creó y comercializó el “ambient orb”; un dispositivo, aún en el mercado, que monitorea el índice Dow Jones, los portafolios de inversión personal, los informes climáticos, así como otras fuentes e información para cambiar el color de luz que emana, basándose para ello en los parámetros proporcionados, que además se ajustan de forma dinámica.

A partir del año 2003, el concepto “internet de las cosas” comienza a ser mencionado en publicaciones importantes, como The Guardian, Scientific American y Boston Globe, y se inician los primeros proyectos de investigación enfocados a la implementación de dicho concepto, el que aparece por primera vez como título de libro.

En 2004 el Departamento de la Defensa de los Estados Unidos implementa en una escala masiva el uso de RFID en su programa de abastecimiento, para mejorar la eficiencia en la cadena de suministros, al mismo tiempo que Walmart lo implementa en el mundo comercial para su control de inventarios.

International Telecommunications Union (ITU) publica en 2005 su primer reporte relacionado con internet de las cosas, en que estima que se ha agregado una nueva dimensión al mundo de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), con una conectividad a cualquier hora, en cualquier lugar y para cualquier persona, a la que se le agrega la posibilidad de conectividad a cualquier cosa. De esa manera las conexiones se multiplican y se crea una nueva y dinámica red de redes, una internet de las cosas [9].

Rafi Haladjian y Olivier Mével crean en 2005 el Nabaztag, un dispositivo con una simpática forma de conejo que contaba con conectividad WiFi y capaz de emitir alertas verbales acerca de las acciones del mercado de valores, principales encabezados de noticias, alarma de reloj, canales RSS, etc. También podía conectarse a otros Nabaztag, característica que fue probada en una ópera ejecutada por 100 de éstos “smart rabbits” ese mismo año en París, utilizando para ello su conectividad WiFi.

En 2006, el concepto “internet de las cosas” fue reconocido en Europa, y para 2008 se lleva a cabo la primera Conferencia Europea de Internet de las Cosas, en Zurich, evento que se ha venido organizando cada dos años

a partir de entonces. Se establecen diversas áreas de estudio para internet de las cosas, como:

- Heterogeneidad de la red
- Normas
- Protocolos
- Redes autoorganizadas y adaptables
- Detección de redes
- Encaminamiento dinámico
- Confiabilidad y supervivencia de la red
- Escalabilidad de la red
- Estrategias de nombres y direccionamiento
- Programación declarativa
- Manejo de tráfico y congestión de datos
- Resolución en tiempo real y tolerancia al retraso
- Detección y corrección de errores.

En 2007, Google presenta el sistema operativo Android, que tiene un importante impacto no sólo en *smartphones*, sino en todo tipo de dispositivos móviles y dispositivos no considerados móviles pero sí “inteligentes”, cuyo común denominador es la capacidad de conectarse a internet.

Importantes empresas, entre las cuales se cuentan Bosch, Cisco, Ericsson, Intel, SAP, Sun, Google y Fujitsu, entre un total de 50, se reunieron en 2008 para formar la IPSO Alliance con el fin de promover el uso del protocolo IP en redes de “objetos inteligentes” y hacer posible la internet de las cosas.

De acuerdo con CISCO, en 2008 se dio inicio al fenómeno de encontrar más “cosas u objetos” que personas conectadas a internet. Conforme al estudio, el crecimiento en el número de *smartphones*, tabletas, computadoras y en general dispositivos conectados a internet alcanzó los 12,500 millones en 2010, mientras que la población humana en el mundo aumentó a 6,800 millones de personas, con lo que se calculan 1.84 dispositivos por persona conectados, por primera vez en la historia [10].

En 2008, el Consejo Nacional de Inteligencia de Estados Unidos clasificó a la internet de las cosas como una de las seis “tecnologías civiles disruptivas” con impacto potencial sobre los intereses de ese país para 2025.

En el mismo año inicia el “boom” de las “smart cosas” por la demanda del público de productos capaces de interconectarse y de interactuar entre

ellos y con internet; se dispara entonces la venta de productos como la *smart TV*, el *BD-live*, la *smart box*, el *smart phone*, la *tablet* y el concepto de “smart home”. Para 2010, Cisco pone énfasis en que muchos de los dispositivos conectados a internet no son sólo computadoras y *smartphones*.

En 2011 se realiza el lanzamiento público de IPv6, que permite 2128 (34 0,282'366,920'938,463'463,374'607,431,768'211,456) direcciones de red, suficientes para cubrir cualquier necesidad, o como lo expresó Steven Leibson: “Podemos asignar una dirección IPv6 a cada átomo en la superficie de la Tierra, y aún tenemos suficientes direcciones para hacerlo con otras más de 100 tierras” [11].

Durante el mismo año, Arduino y otras plataformas de hardware similares alcanzaron su madurez, haciendo al internet de las cosas más accesible a proyectos del tipo “hágalo usted mismo”; mientras tanto, Cisco, IBM y Ericsson producían grandes iniciativas educativas y de mercado sobre el tema de internet de las cosas, y Samsung, Google y Nokia anuncian sus planes para incluir tecnología NFC¹⁸ en sus dispositivos móviles.

Actualidad

En Europa, a través del área de Tecnologías de la Información y la Comunicación del séptimo Marco Programa para la Investigación y el Desarrollo Tecnológico (ICT-FP7) continúa el interés sobre el internet de las cosas y se destinan fondos para la investigación en este tema en particular, así como a través de otros programas de investigación relacionados, como el “internet del futuro”¹⁹, mientras en el Reino Unido se destinan cinco millones de libras para el desarrollo de internet de las cosas.

Por otro lado, se ha creado la Iniciativa por los Estándares Globales para Internet de las Cosas (IOT-GSI), que promueve un desarrollo unificado de estándares técnicos que haga posible un internet de las cosas a una escala global.

¹⁸ NFC: *Near field communication* (‘comunicación de campo cercano’); es una tecnología de comunicación inalámbrica de corto alcance y alta frecuencia que permite el intercambio de datos entre dispositivos.

¹⁹ “Internet del futuro” es un nombre general para las actividades de investigación sobre nuevas arquitecturas de red para internet.

Diversos grupos de investigación en mundo sobre el tema de internet del futuro están desarrollando nuevas arquitecturas de red en las cuales cuidadosamente han tomado en cuenta la inclusión de todo tipo de objetos susceptibles de ser conectados a internet.

Las nuevas propuestas de arquitectura de red, que están en etapas experimentales, han sido capaces de incluir objetos como sensores o cámaras de vigilancia para formar parte de la red y convertirlos en nodos capaces de crear redes autonegociadas y autogestionadas, y aptos para ofrecer servicios como: repositorios de datos, compresión-descompresión, codificación-decodificación, y hasta resolución de nombres con bases semánticas. Así un dispositivo puede:

- Convertirse en ISP.
- Buscar direcciones de red con protocolos de nombrado semántico.
- Calcular rutas de interconexión.
- Calcular costo, precio y calidad de una interconexión.
- Ofrecer servicios.
- Elegir y consumir servicios de otros nodos de acuerdo a las preferencias del usuario.

Tendencias

Dispositivos comerciales como el Google Glass, o *smartphones* con la aplicación Google Now marcan actualmente la tendencia de consumo, con fotografía y video para almacenar en la nube o compartir en tiempo real, comandos de voz para realizar diversas tareas, para búsqueda proactiva de información basada en geolocalización, horarios y hábitos del usuario, además de las llamadas de voz y de video y de la hiperconectividad que ya son capaces de ofrecer.

Mientras tanto los esfuerzos en materia de investigación buscan el aprovechamiento de las tecnologías aplicables a la internet de las cosas para hacer más comfortable la vida de un ser humano.

Alguno de los ejemplos que ofrece la iniciativa Europa 2020 de internet de las cosas propone como caso de uso: un dispositivo que controla los horarios y dosis de los medicamentos de un anciano, capaz de detectar cuando el individuo ha dejado de tomar el medicamento correspondiente

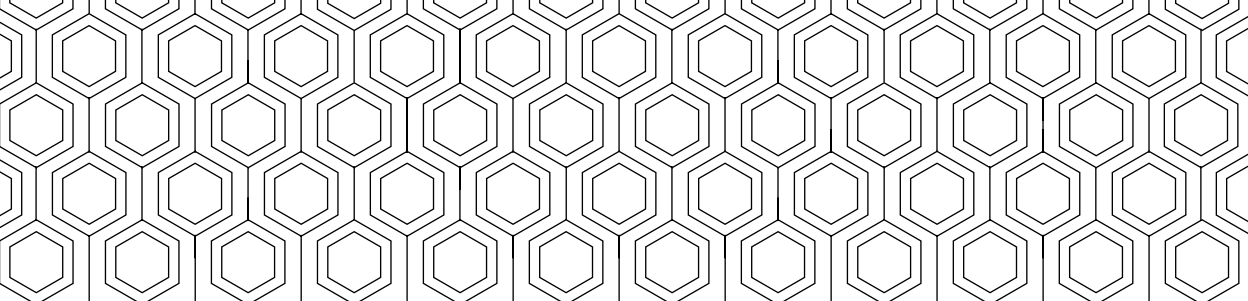
para desencadenar una serie de acciones que involucran la realización de llamadas telefónicas a los familiares del anciano, así como al hospital geográficamente más cercano, donde otro dispositivo, tras recibir la llamada, accedería al historial clínico y enviaría una ambulancia dándole a los tripulantes la información necesitan a través de dispositivos a bordo, y dependiendo del informe *in situ* de parte de los socorristas, dispositivos en el hospital generarían las órdenes necesarias para recibir al enfermo conforme a su situación particular; mientras tanto se realizan llamadas a sus familiares para informarles, de forma continua, el estado de salud que guarda el enfermo.

Una de las más claras tendencias, que divide opiniones drásticamente, es que a futuro no sólo todos los dispositivos que nos rodean estén conectados a internet, sino que gracias a la tecnologías RFID, NFC y otras similares las plantas y los animales ya sean domésticos, salvajes, o de producción agropecuaria estén conectados a internet, con los beneficios que ello puede aportar. Y aún más, que todo ser humano, desde su nacimiento (si no antes), esté permanentemente conectado a la red, formando parte de ella, como un dispositivo móvil más.

Referencias

- [1] J. B. Kennedy, "When woman is boss." *Collier's Weekly*, 1926.
- [2] A. M. Turing, "Computing machinery and intelligence," *Mind*, vol. 59, pp. 433-460, 1950.
- [3] M. McLuhan and L. H. Lapham, *Understanding Media : the Extensions of Man*. London: 1964.
- [4] S. Brave, H. Ishii, and A. Dahley, "Tangible interfaces for remote collaboration and communication," in *CSCW*, pp. 1-9, 1998.
- [5] D. Russel and M. Weiser, "The future of integrated design of ubiquitous computing in combined real and virtual worlds," *CHI*, 1998.
- [6] K. Ashton, "That 'Internet of Things' Thing," *RFID Journal*, 2006.
- [7] N. Gershenfeld, *When Things Start to Think*. Henry Holt and Company, 1999.
- [8] N. Gross, "The earth will don an electronic skin," *Business Week*, 1999.
- [9] International Telecommunication Union, "ITU Internet Reports 2005: The Internet of Things," Geneva, 2005.

- [10] D. Evans, “The Internet of Things,” 2011.
- [11] S. Leibson, “IPv6: how many IP addresses can dance on the head of a pin?,” *EDN Network*, 2008. [Online]. Available: <http://www.edn.com/electronics-blogs/other/4306822/IPv6-How-Many-IP-Addresses-Can-Dance-on-the-Head-of-a-Pin->. [Accessed: 10-Sep-2014].



La robótica en los últimos veinte años

CARLOS ALBERTO LÓPEZ FRANCO

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS COMPUTACIONALES,
CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍAS,
UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

Hasta hace poco tiempo la robótica no era más que una idea en las historias de ciencia ficción. Pero tal vez, esas mentes que soñaban con máquinas capaces de realizar lo que ninguna maquina había podido realizar hasta ese momento, *son las que sembraron la semilla de la inspiración en las mentes de muchos* futuros ingenieros y científicos, que en algún momento contribuyeron al desarrollo de la robótica, para estar en este momento en un punto de la historia donde existe un sinfín de posibilidades y oportunidades para el desarrollo de esta área.

La palabra robot fue utilizada por primera vez con el significado de persona mecánica en la obra de ciencia ficción *Robots Universales Rossum*, del Checo Karel Čapek, en 1920. Sin embargo, el término robótica fue popularizado por el escritor Isaac Asimov, quien lo menciona por primera vez en su cuento de ciencia ficción “Runaround” en 1942. En esta obra se presentan por primera vez las “leyes de la robótica”, las cuales son:

- 1 Un robot no puede hacer daño a un ser humano o, por inacción, permitir que un humano sufra daño.
- 2 Un robot debe obedecer las órdenes dadas por seres humanos, excepto cuando dichas órdenes se contrapongan con la primera regla.

- 3 Un robot debe proteger su propia existencia, siempre y cuando dicha protección no entre en conflicto con las reglas primera y segunda.

Aunque estas reglas fueron elaboradas en el contexto de la ciencia ficción, podemos observar que siempre ha existido una preocupación por la creación de máquinas con un alto nivel de autonomía, el cual, según dichas historias, podría revertirse en contra de sus creadores.

Como toda nueva tecnología, la creación de nuevas herramientas o equipos que contribuyan a facilitar el desarrollo de alguna actividad, genera siempre una controversia, sobre todo por parte de las personas más conservadoras. Tomemos como ejemplo un auto, sabemos que originalmente fue creado para facilitar el traslado de las personas, sin embargo una persona puede causar daño a otra persona en un accidente, pero no por esta razón vamos a etiquetar a un automóvil como un arma mortal; algo similar sucede con los robots.

La historia de la robótica puede trazarse hasta varios siglos atrás, cuando se construían artefactos para resolver problemas de manera automática. Uno de dichos artefactos fue desarrollado por el genio de la antigüedad Leonardo Da Vinci, el “robot” de Leonardo era un caballero mecánico capaz de pararse, sentarse, levantar su visor y maniobrar sus brazos. A lo largo de la historia se han realizado diferentes artefactos que podrían considerarse parte de la historia de la robótica, sin embargo en los últimos años, en especial en los últimos veinte, el desarrollo de robots con un alto nivel de autonomía se ha incrementado de manera considerable.

En el resto de este capítulo trataremos de mencionar algunos de los avances de la robótica que son considerados claves para su desarrollo.

La robótica en la última década del siglo XX

En el año 1992, en la Universidad Carnegie Mellon desarrollaron el robot Dante (figura 1). Era un robot caminante capaz de escalar cuestras empinadas [1]. Los objetivos del proyecto consistían en demostrar las capacidades de un robot en una misión de exploración real, locomoción en terrenos escabrosos, supervivencia en ambientes extremos. El robot tenía como objetivo estudiar el lago de magma en el monte Erebus. La expedición demostró los avances en robótica móvil de la época y presentó futuras ideas para exploradores robóticos.



Figura 1. Robot Dante, desarrollado por la Universidad Carnegie Mellon.

En 1994, esa misma universidad desarrolló el robot Dante II, una versión más robusta de su predecesor, el cual desciende en el cráter del volcán Mt. Spurr para muestrear gases volcánicos.

La robótica en la primera década del siglo XXI

A principios del siglo XXI, Honda debutó con su famoso robot ASIMO (figura 2), con el objetivo de afrontar el reto de la locomoción autónoma. El nombre de ASIMO es un acrónimo del nombre en inglés para “paso avanzado en movilidad innovadora para una nueva era”. El robot fue concebido para funcionar en un entorno habitacional humano [2].

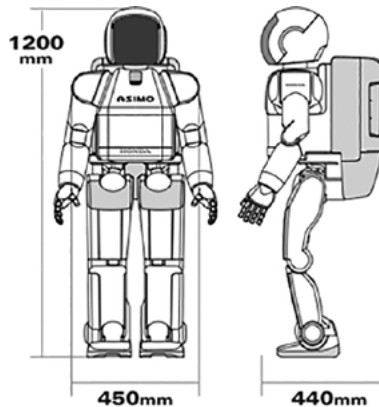


Figura 2. Robot ASIMO, de Honda.

El robot ASIMO es bípedo, con una tecnología de caminado desarrollada por Honda llamada i-Walk. Esta tecnología le permite un caminado más flexible, lo que resulta en pasos suaves y más naturales. ASIMO ha sido actualizado y nuevas versiones se crearon durante toda la década.

En el año 2001, después de la tragedia del 11 de septiembre en Nueva York, la profesora Robin Murphy, después de ver estos terribles hechos, tuvo la idea de utilizar un grupo de robots para ayudar en esa situación [3]. Hasta ese momento, los robots nunca habían sido utilizados en un desastre real, pero ya para ese entonces eran mucho más pequeños y capaces de colaborar en estas situaciones.

Los robots que utilizaron fueron los PackBots, unos robots pequeños manufacturados por iRobot (figura 3).



Figura 3. Robot Packbot desarrollado por iRobot.

En el año 2002, el primer robot doméstico hace su debut, es el roomba de iRobot. Es el primer robot aspiradora, puede realizar su tarea de manera autónoma (figura 4).



Figura 4. Robot roomba, desarrollado por iRobot.

En 2004, el robot de la NASA, llamado Spirit, aterriza en Marte, y comienza la exploración del planeta (figura 5). A diferencia del robot Sojourner, el spirit fue un robot móvil, con un laboratorio móvil [4].



Figura 5. Robot Spirit, desarrollado por el JPL de la NASA.

En el año 2005, el robot Stanley, un vehículo autónomo de la Universidad de Stanford, realizó exitosamente el recorrido del reto DARPA (siglas en inglés de Agencia de Defensa y Proyectos de Investigación Avanzados), ganando un premio de dos millones de dólares (figura 6).



Figura 6. Robot Stanley, desarrollado por un grupo de investigadores de la Universidad de Standford.

El proyecto del robot Stanley fue liderado por el Sebastian Thrun. El reto fue lanzado por la DARPA. El objetivo del reto era desarrollar un robot autónomo capaz de recorrer un circuito todo terreno [5].

La robótica en la segunda década del siglo XXI

En el año 2012, la misión del *Space Shuttle Discovery* lanzó el primer robot humanoide al espacio en la estación espacial internacional conocido como R2, (figura 7). El robonauta tiene una movilidad cercana al rango humano y puede realizar tareas que son peligrosas para los astronautas humanos [6].



Figura 7. Robot desarrollado por la NASA para misiones espaciales.

En 2012, el Departamento de Nevada expidió la primera licencia de conducir a un auto robótico de conducción autónoma [7]. El robot utiliza como plataforma base un Prius de Toyota modificado con tecnología desarrollada por Google (figura 8).



Figura 8. Robot de Google.

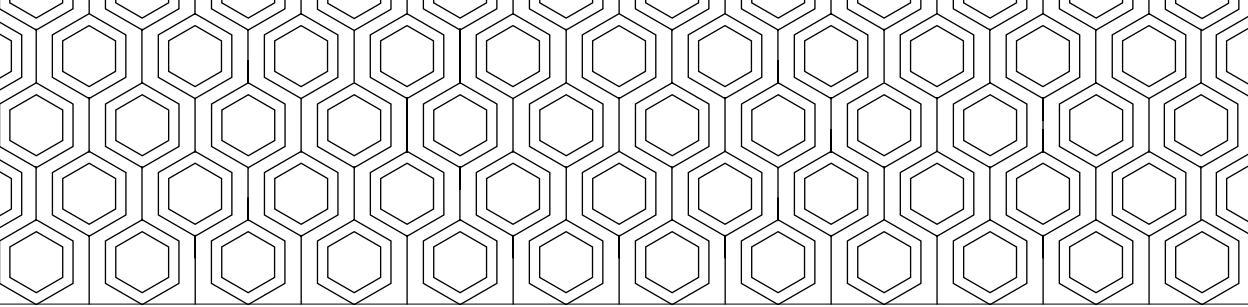
Comentarios finales

La mayoría de las personas piensa que los robots son en su mayoría cosas de películas de ciencia ficción; si tú eres uno de ellos, piénsalo de nuevo. Los robots en la actualidad se encuentran en todo el mundo: caminando dentro de volcanes activos, ensamblando autos, explorando otros planetas... Conforme avanza la robótica, los robots se vuelven cada vez más listos, lo que les permite realizar actividades más complejas y, por tanto, tareas que no queremos hacer o que son peligrosas para el ser humano.

Referencias

- [1] D. W. a. C. T. a. R. Whittaker, "Exploring Mount Erebus by walking robot," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 11, no. 3-4, 1993.
- [2] Honda, 2000. [En línea.] Disponible en: <http://world.honda.com/ASIMO/technology/2000/>.
- [3] R. Murphy, "Trial by fire [rescue robots]," *Robotics Automation Magazine, IEEE*, vol.11, no. 3, 2004.
- [4] J. Nelson, [En línea.] Disponible en: <http://www.jpl.nasa.gov/missions/details.php?id=5917>.

- [5] S. a. M. e. a. Thrun, “Stanley: the robot that won the DARPA Grand Challenge: research articles,” *Journal of Robotic Systems*, vol. 23, no. 9, 2006.
- [6] NASA, 2013. [En línea.] Disponible en: <http://robonaut.jsc.nasa.gov/>.
- [7] G. D. Car, 2012. [En línea.] Disponible en: <http://www.reuters.com/article/2012/05/08/uk-usa-nevada-google-idUSLNE84701320120508>.



La visión computacional en los últimos veinte años

EDUARDO GERARDO MENDIZABAL RUIZ

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS COMPUTACIONALES,
CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍAS,
UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

Introducción

El concepto “visión computacional” se refiere a los algoritmos y métodos matemáticos diseñados con el fin de dotar a las computadoras con la capacidad de percibir, entender e interpretar información cuantitativa adquirida o representada en dos o más dimensiones. Dicha información es normalmente adquirida a través de sensores cuyo rango de operación se encuentra en algún intervalo del espectro de luz (como la luz visible, luz infrarroja, rayos X, etc.), energía mecánica (sonido) o energía electromagnética (ondas electromagnéticas, resonancia magnética, etc.).

La idea de dotar a las computadoras con uno de los sentidos más preciados para el ser humano obedece al deseo de crear seres artificiales que puedan desarrollar tareas con igual o mayor presidencia o eficiencia que los seres humanos. Este deseo parece existir desde el inicio de la revolución industrial y haber tomado más importancia en los últimos 20 años con el desarrollo y auge de las computadoras digitales.

Los primeros años de la visión computacional

Una de las primeras propuestas existentes en la literatura científica relacionada con el concepto de visión computacional fue la tesis doctoral presentada por Lawrence Roberts en 1965 en el Instituto Tecnológico de Massachusett (MIT) [1]. Dicha tesis trataba sobre métodos para la estimación de la profundidad de objetos en una escena mediante el análisis de una fotografía.

Para 1969, el Instituto de Investigación de Stanford (SRI) presentó el robot Shakey, el primer robot de propósito general que incorporaba inteligencia artificial [2]. Shakey contaba con diferentes sensores, incluida una cámara de televisión con la cual se obtenía información acerca del ambiente en donde se movía el robot mediante algoritmos de visión computacional que aún se utilizan hoy en día, como es la transformada de Hough [3].

A principios del año 1970 se podían encontrar en la literatura alrededor de 70 publicaciones científicas relacionadas con los conceptos de visión computacional. Entre 1970 y 1980 el número de publicaciones con temas relacionados con la visión computacional se incrementó a 1,500, incluyendo algunos de los primeros libros sobre el tema, por ejemplo: *Computer Vision Systems* [4] y *Structured Computer Vision* [5].

A partir de los años ochenta la industria de la computación comenzó a tener un crecimiento acelerado, eso permitió que los equipos de cómputo fueran accesibles a un mayor número de personas en laboratorios y centros de investigación. Esto se vio reflejado en un mayor número de publicaciones científicas relacionadas con temas de visión computacional, en el que se proponían nuevos métodos y algoritmos, y un número creciente de aplicaciones de dichas propuestas. Para 1990, el número de publicaciones era de aproximadamente 16,000.

La visión computacional en años recientes

En los últimos 20 años, el área de la visión computacional ha mostrado un incremento exponencial significativo en el número de publicaciones científicas relacionadas con el tema (figura 1). Esto se debe principalmente a los avances en las tecnologías de semiconductores, las cuales permiten tener sensores más precisos y procesadores más rápidos y más pequeños a un me-

nor costo, eso ha permitido que más personas tengan disponible las herramientas necesarias para proponer nuevos métodos de visión computacional. Pero sobre todo, el incremento en el número de productos de investigación es consecuencia de la reciente asimilación de la tecnología por parte de la sociedad, ya que esto abre la oportunidad de ofrecer nuevas aplicaciones basadas en visión computacional para resolver problemas comunes.

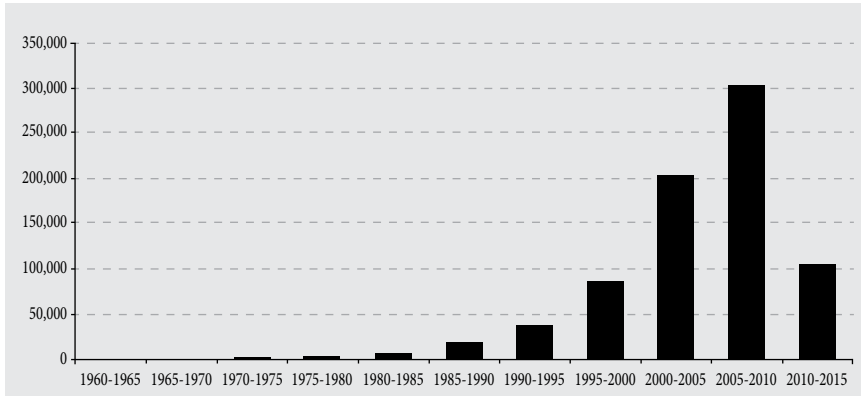


Figura 1. Número de publicaciones relacionadas con la visión computacional por rango de años de acuerdo a búsqueda en Google Scholar.

Algunas de las aplicaciones o áreas más comunes en donde el uso de los algoritmos y métodos de visión computacional han jugado un papel muy importante en los últimos 20 años se mencionan a continuación.

Biometría y seguridad

La biometría se refiere al uso de dispositivos, métodos y técnicas diseñadas para la identificación de individuos basado en sus características biológicas o de comportamiento [6]. La biometría tiene aplicación directa en temas de seguridad, ya que establecer la identidad de una persona es una parte fundamental de cualquier sistema de seguridad en el que se requiera saber si una persona es realmente quien dice ser, o si está autorizada a entrar en ciertas instalaciones o ejecutar ciertas acciones. Los sistemas biométricos han sido implementados con mucho éxito en aplicaciones gubernamentales, comerciales, civiles y forenses, entre otras [7]. Algunos de los dispositivos

más comúnmente utilizados son los lectores de huella digital, los sistemas de reconocimiento facial y los sistemas de identificación por medio del iris (figura 2).



Figura 2. Soldado norteamericano efectuando una prueba de biometría.

Visión robótica

La visión robótica se refiere al uso de tecnología y métodos de visión computacional que permiten a los robots tener una interacción más precisa con su entorno y desarrollar tareas complicadas de manera automática [8]. Algunos de los usos principales de la visión robótica se encuentran en líneas de producción que emplean robots industriales que llevan a cabo tareas como el ordenamiento de objetos, el manejo de material, la asistencia o guía robótica, la inspección automática, el ensamble de piezas, el empaquetado, etcétera.

Fuera de la industria, la visión robótica se utiliza en aplicaciones que requieren reconocimiento de caminos y planeación de trayectorias. Ejemplos de estas aplicaciones son los carros autónomos y los robots humanoides que han sido desarrollados para diferentes funciones (figura 3).



Figura 3. Robot humanoide ASIMO, diseñado y desarrollado por Honda para servir como un asistente multifuncional. Este robot se presentó al público en octubre del 2000.

Análisis de imágenes médicas

La computación aplicada al análisis de imágenes médicas es un campo interdisciplinario que combina diferentes áreas de las ciencias computacionales, estadística y probabilidad, ingeniería electrónica, física, matemáticas y medicina. Este campo del análisis de imágenes médicas se encarga del diseño y desarrollo de los métodos matemáticos y computacionales para la resolución de problemas pertinentes a las imágenes médicas y su uso para investigación biomédica y clínica (figura 4).

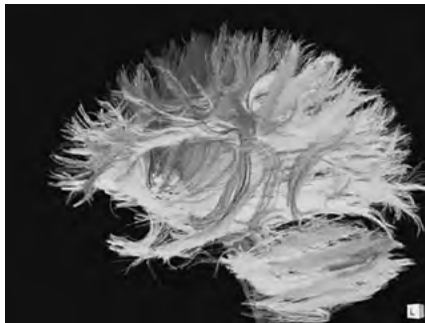


Figura 4. Ejemplo de imagen de tractografía que muestra la conectividad de las fibras nerviosas en un cerebro.

El objetivo principal de la computación aplicada a imágenes médicas es extraer información cuantitativa clínicamente relevante a partir de las imágenes que pueden ser obtenidas mediante alguna técnica de imagenología médica (rayos X, ultrasonido, resonancia magnética, etc.). Esta información es utilizada por los médicos especialistas para generar diagnósticos, definir tratamientos y monitorear el progreso de los pacientes.

Las aplicaciones del análisis de imágenes médicas son numerosas. Algunos ejemplos de las más comunes incluyen la detección de tumores cancerosos en cerebro [9], pulmón [10], mama [11], colon [12], hígado [13], etc. Así mismo, el análisis de imágenes médicas se utiliza enormemente para el diagnóstico y estudio de enfermedades cardiovasculares, como la aterosclerosis [14] y algunos trastornos neurológicos [15]. Probablemente la aplicación del análisis de imágenes médicas más popular es el ultrasonido 4D, el cual permite observar una reconstrucción en 3D del feto mientras está en el vientre materno (figura 5).



Figura 5. Ejemplo de una reconstrucción 4D de un feto a partir de datos de ultrasonido.

El campo de la visión computacional

La visión computacional es un campo multidisciplinario que depende enormemente de otras áreas de la computación, como son la inteligencia artificial, la detección de patrones, el procesamiento y análisis de señales, los métodos numéricos, las matemáticas discretas, etc. En general los métodos

utilizados en visión computacional se pueden agrupar principalmente en cinco categorías: métodos de segmentación, métodos de registro, métodos de rastreo, métodos de caracterización y métodos de modelación.

El objetivo de los métodos de segmentación es seccionar las imágenes en diferentes segmentos que representan objetos o regiones de interés. Por ejemplo, en el análisis de imágenes médicas la región de interés puede ser un tumor o un tejido en particular; en visión robótica la región de interés puede corresponder a algún objeto que debe ser manipulado, mientras que en la biometría el objeto de interés puede ser una persona específica entre una multitud. El proceso de segmentación es en general muy complicado y no existe un método que pueda resolver todos los problemas de segmentación. En cambio, existen diferentes métodos de segmentación diseñados para realizar la tarea dependiendo de las características de la región u objeto de interés. Algunos de los métodos de segmentación se basan en el uso de Atlas [16], uso de contornos o superficies activas [17], uso de estadística sobre los valores de intensidad de las regiones de interés [18], etcétera.

El registro de imágenes es el proceso que busca el alineamiento correcto de imágenes. En el caso más simple, dos imágenes de la misma o de diferente modalidad que contienen información sobre estructuras similares son alineadas. Normalmente una de estas imágenes es tratada como el objetivo, mientras que la otra es manipulada mediante transformaciones geométricas con el fin de encontrar los parámetros que logren la mejor correspondencia entre ambas imágenes. Un ejemplo de la aplicación del registro de imágenes es el caso en el que se requiere examinar una tomografía computarizada o una imagen de tomografía por emisión de positrones con el fin de examinar información estructural y metabólica de un paciente. Otro ejemplo es en el caso de la biometría cuando es necesario alinear las imágenes correspondientes a un individuo que se busca, con las imágenes almacenadas en una base de datos.

Los métodos de rastreo consisten en identificar, modelar y predecir la trayectoria de uno o varios elementos existentes en una secuencia de imágenes. Estos métodos son comúnmente utilizados en aplicaciones de seguridad en las que es necesario identificar el patrón de comportamiento de individuos, o en aplicaciones cinematográficas, en donde varias imágenes reales y simuladas son combinadas en una escena.

El objetivo de los métodos de caracterización es extraer información relevante acerca de objetos o regiones de interés dentro de las imágenes. Esta información es utilizada para definir descriptores para el reconocimiento y categorización automática de dichas regiones u objetos. Entre las aplicaciones en que se utilizan los métodos de caracterización se encuentran la detección de tejidos cancerosos a partir de imágenes médicas, la detección de objetos peligrosos en los aeropuertos mediante el uso de rayos X, la detección de productos defectuosos en las líneas de producción, y la identificación de la raza, edad y género en aplicaciones biométricas.

Finalmente, los métodos de modelación tienen como objetivo generar representaciones matemáticas morfológicas o funcionales de los objetos representados en una imagen. Por ejemplo, actualmente es posible crear prótesis de diferentes miembros u órganos a partir de los datos adquiridos por medio de alguna de las modalidades de imágenes médicas. Así mismo, es posible generar modelos del funcionamiento de órganos como el cerebro y el corazón, lo cual permite incrementar el entendimiento de sus funciones y por lo tanto mejorar los diagnósticos y tratamientos de las enfermedades que los afectan.

El futuro de la visión computacional

A pesar de que en los últimos 20 años la visión computacional se ha desarrollado dramáticamente, es evidente que en los próximos años este campo de la ciencia seguirá teniendo nuevas aportaciones en diferentes aspectos que afectan nuestra vida diaria.

En particular, el surgimiento de los teléfonos inteligentes y tabletas portátiles con alto poder de procesamiento brinda la oportunidad de incorporar nuevas tecnologías de visión computacional a la vida diaria. Un ejemplo de esto es el surgimiento y popularización de las aplicaciones que hacen uso de la realidad aumentada, la cual consiste en combinar imágenes del mundo real con imágenes generadas por medio de la computadora con el fin de aumentar la información que una persona pueda tener de su entorno. Además el surgimiento y desarrollo de las unidades de procesamiento gráfico (GPU por sus siglas en inglés) abre la oportunidad de generar nuevas

aplicaciones de visión computacional que funcionen en tiempo real, las cuales generalmente requieren de un alto poder de procesamiento.

En los próximos 20 años es muy probable que las computadoras lleguen a tener la capacidad de ver, entender e interactuar con el mundo que las rodea de una manera más natural, intuitiva e independiente. Esto seguramente representará cambios drásticos en el estilo de vida de las personas en los países desarrollados y eventualmente en todas las sociedades.

Conclusión

No cabe duda de que la visión computacional ha sido una pieza fundamental en el progreso de la humanidad en las últimas décadas y es muy probable que siga teniendo un papel importante en el desarrollo de las nuevas sociedades que han mostrado un interés creciente en el uso de la tecnología, la cuál es incorporada a sus rutinas diarias y a su forma de vida.

Referencias

- [1] Lawrence Gilman Roberts, "Machine perception of three-dimensional solids". Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 1963.
- [2] L. S. Coles, R. O. Duda, T. D. Garvey, J. H. Munson, B. Raphael, C. A. Rosen, and R. A. Yates, "Application of intelligent automata to reconnaissance", Stanford Research Institute, Tech. Rep., November 1969.
- [3] R.O. Duda, and P. E. Hart, "Use of the hough transformation to detect lines and curves in pictures," AI Center, SRI International, Tech. Note 36, April 1971.
- [4] Allen Hanson, Ed. *Computer vision systems*. Elsevier, 1978.
- [5] Steven Tanimoto, Ed. *Structured Computer Vision: Machine Perception Through Hierarchical Computation Structures*. Elsevier, 1980.
- [6] Anil Jain, Ruud Bolle, and Sharath Pankanti, "Introduction to biometrics," *Biometrics*. Springer, USA, pp. 1-41, 1996.
- [7] Anil K. Jain, Arun Ross, and Sharath Pankanti. "Biometrics: a tool for information security," *Information Forensics and Security, IEEE Transactions*, vol. 1, no. 2, pp. 125-143, 2006.

- [8] Fred D. Turek, "Machine vision fundamentals: how to make robots 'See'," *NASA Tech Briefs*, vol. 35, no. 6, pp. 60-62, 2011.
- [9] Dana Cobzas *et al.*, "3D variational brain tumor segmentation using a high dimensional feature set," *Computer Vision, 2007. IEEE 11th International Conference*. IEEE, 2007.
- [10] Metin N. Gurcan *et al.*, "Lung nodule detection on thoracic computed tomography images: preliminary evaluation of a computer-aided diagnosis system," *Medical Physics*, vol. 29, no. 11, pp. 2552-2558, 2002.
- [11] Carl J. Vyborny, and Maryellen L. Giger, "Computer vision and artificial intelligence in mammography," *AJR American journal of roentgenology*, vol. 162, no. 3, pp. 699-708, 1994.
- [12] Hiroyuki Yoshida, and Janne Nappi. "Three-dimensional computer-aided diagnosis scheme for detection of colonic polyps," *Medical Imaging, IEEE Transactions*, vol. 20, no.12, pp.1261-1274, 2001.
- [13] Laurent Massotier, and Sergio Casciaro. "A new fully automatic and robust algorithm for fast segmentation of liver tissue and tumors from CT scans," *European radiology*, vol. 18, no. 8, pp. 1658-1665, 2008.
- [14] Ioannis A. Kakadiaris, and E. Gerardo Mendizabal Ruiz, "Cardiovascular informatics: a perspective on promises and challenges of ivus Data Analysis," *Optimization and Data Analysis in Biomedical Informatics*, Springer, New York, pp. 117-130, 2012.
- [15] Chien-Wen Cho *et al.* "A vision-based analysis system for gait recognition in patients with Parkinson's disease," *Expert Systems With Applications*, vol. 36, núm. 3, pp. 7033-7039, 2009.
- [16] Ivana Isgum *et al.*, "Multi-atlas-based segmentation with local decision fusion—Application to cardiac and aortic segmentation in CT scans," *Medical Imaging, IEEE Transactions*, vol. 28, no. 7, pp.1000-1010, 2009.
- [17] Tony F. Chan, B. Yezrielev Sandberg, and Luminita A. Vese, "Active contours without edges for vector-valued images," *Journal of Visual Communication and Image Representation* vol.11, no. 2, pp. 130-141, 2000.
- [18] Anil K. Jain, and Farshid Farrokhnia, "Unsupervised texture segmentation using Gabor filters," *Systems, Man and Cybernetics, 1990. Conference Proceedings, IEEE International Conference*. IEEE, 1990.

De la telerrobótica a la sincronización de redes de robots en los últimos veinte años

EMMANUEL NUÑO ORTEGA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS COMPUTACIONALES,
CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍAS,
UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

Introducción

Un sistema de teleoperación bilateral o teleoperador comúnmente se refiere a la interconexión de cinco elementos: el operador humano que transmite fuerzas a un manipulador local conectado, mediante un canal de comunicaciones, a un manipulador remoto, el que a su vez interactúa con un ambiente, tal interacción es reflejada al operador en forma de fuerzas (figura 1). Cuando dicha interacción no se transmite al operador, se habla de un sistema de teleoperación unilateral.

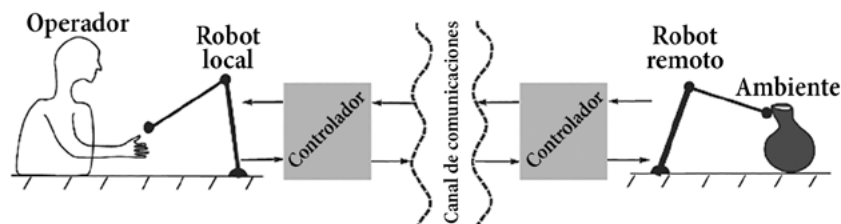


Figura 1. Sistema de teleoperación bilateral.

El principal problema en el control de teleoperadores es la posible inestabilidad causada por los retardos temporales en la interconexión entre el sitio local y el remoto. Una vez asegurado que el teleoperador es estable, se fija otro problema de control cuyo objetivo es lograr que el sistema sea lo más transparente posible, esto es, que el robot remoto se mueva igual que el local y que el operador humano perciba las mismas fuerzas de interacción entre el robot remoto y el ambiente. Desde finales de los años ochenta la comunidad científica se ha centrado en proponer nuevas soluciones a estos dos problemas. El lector interesado puede consultar el trabajo de Hokayem y Spong [1] o el de Nuño *et al.* [2], donde encontrará una reseña histórica de los desarrollos en el control de teleoperadores y de los principales algoritmos de control basados en pasividad, respectivamente.

La teleoperación de robots hace más de veinte años

El primer dispositivo teleoperado del que se tiene registro fue creado por N. Tesla en 1898, en su patente se le denomina *Method of and Apparatus for Controlling Mechanism of Moving Vessels or Vehicles*. Utilizando ondas de radio, Tesla logró controlar la dirección y la velocidad de un bote acuático.

Después, en 1952, R. Goertz creó el primer sistema de teleoperación bilateral cuando trabajaba para el proyecto Manhattan en los Laboratorios Argonne. La solución consistía en dos manipuladores mecánicamente acoplados. A partir de esa fecha, debido al problema de las inestabilidades causadas por los retardos, los sistemas de teleoperación usados eran unilaterales y utilizaban estrategias de control supervisado. De tal manera que, en las tareas de manipulación remota, el operador tenía que esperar a observar, por medio de video, el resultado para luego decidir si debería seguir moviendo el robot remoto o no.

Fue hasta finales de la década de los ochenta, con el trabajo de Anderson y Spong (1989) [3], cuando las técnicas de control de teleoperadores experimentaron un gran avance en cuanto a la robustez ante retardos temporales en las comunicaciones e incertidumbres paramétricas en los robots locales y remotos [2]. Más aún, técnicas recientes apuntan a la mejora de la transparencia del sistema y a la inclusión de múltiples robots locales y remotos [4].

Los desarrollos en los últimos veinte años

Un gran avance en el control de teleoperadores con retardos ha sido el uso de señales de dispersión (scattering signals) para transformar los retardos de las comunicaciones en una línea de transmisión pasiva. Entonces, bajo la hipótesis razonable de que el humano y el ambiente son también pasivos, se puede garantizar la estabilidad global del sistema a través de la pasividad [3, 5, 6]. En este rubro se reportó que los controladores proporcional y proporcional-derivativo más amortiguamiento ($P+d$ y $PD+d$), y que no necesitan usar señales de dispersión, proporcionan estabilidad asintótica y son robustos a los retardos [7, 8]. En [8] se presentaron algunos de los primeros experimentos de teleoperación transatlánticos, efectuados por la Universidad de Illionois en Urbana-Champaign y la Universidad Politécnica de Cataluña. El sistema que se utilizó se puede ver en la figura 2. Cabe resaltar que, el primer esquema que formalmente demostró estabilidad al utilizar la teoría de Lyapunov fue presentado en [9]. A partir de entonces, se han utilizado otras técnicas de análisis, como el teorema de la pequeña ganancia en [10], la teoría de la contracción en [11], álgebras de Lie en [12] y la pasividad en [13, 14, 15]. En [16, 17] se presenta un estudio detallado de la estabilidad de diversos controladores para teleoperadores con retardos, que utilizan técnicas de Lyapunov-Krasovskii y Lyapunov-Razumikhin.

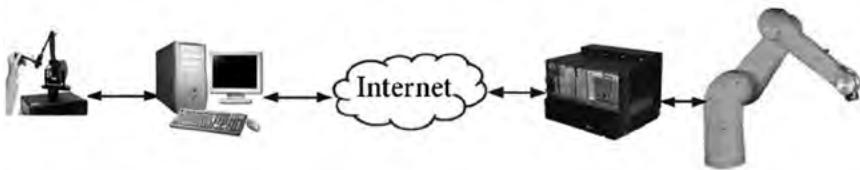


Figura 2. Sistema de teleoperación utilizado en los experimentos transatlántico [8].

Como ya se mencionó, desde su introducción, la transformación de dispersión ha dominado el campo del control de teleoperadores. Sin embargo, la mayoría de los trabajos basados en dicha transformación no pueden proporcionar seguimiento de posición (una excepción notable es el trabajo de Chopra *et al.* [18]). En [19] se propone un controlador adaptable que garantiza el seguimiento de posición y que no utiliza la transformación de dispersión; pero desafortunadamente no puede utilizarse en robots afectados

por las fuerzas gravitacionales. Siguiendo esta línea, en [20] se presenta un nuevo controlador adaptable que puede ser aplicado a cualquier tipo de robot manipulador y que luego ha sido extendido al caso de la teleoperación de redes de robots con retardos [21]. Por otro lado, Lee y Spong [22] sugirieron el uso de controladores proporcionales-derivativos para teleoperadores con retardos constantes. Después, en [7] y en [8], respectivamente, se presentó una prueba formal de que controladores proporcionales con inyección de amortiguamiento son capaces de proporcionar seguimiento de posición y son robustos a retardos constantes y variables.

La mayoría de los trabajos existentes en el área del control de teleoperadores asumen que las velocidades de los robots pueden ser medidas, en general debido a que el ingrediente principal para su estabilización es la inyección de amortiguamiento. Existen pocas excepciones a este hecho, como [23], en donde se propone un controlador basado en técnicas de deslizamiento; [10], que presenta un controlador adaptable basado en técnicas de realimentación con pequeña ganancia; [24], en el que se utiliza un observador de alta ganancia y solamente se prueba acotamiento del error; finalmente, en [25] se propone un controlador dinámico que propaga el amortiguamiento y puede proporcionar seguimiento de posición para sistemas sin retardos. En [26] se utiliza un observador de velocidad basado en técnicas de inmersión e invarianza, y es uno de los primeros trabajos que, asumiendo que se conocen todos los parámetros físicos de los robots, puede demostrar analíticamente el seguimiento de posición aun cuando existan retardos variables en el canal de comunicaciones.

En diversos escenarios en los que los robots interactúan con seres humanos, como en el caso de los robots utilizados en cirugía, aparecen los robots flexibles. El problema de la flexibilidad en los robots ha sido estudiado por diversos investigadores, entre ellos [27, 28], en donde se analizan sus efectos en un sistema de teleoperación. Sin embargo, los análisis reportados han sido realizados para sistemas lineales e invariantes en el tiempo, y en algunos casos [28] sólo para un grado de libertad. Un trabajo importante en el área es el de Tobergte y Albu-Schaeffer [29], en el que se utiliza un controlador con relimentación de estado para sistemas sin retardos. Finalmente, en [30] se reportan diversos controladores capaces de proporcionar seguimiento de posición en teleoperadores con retardos variables pero sin tomar en cuenta los efectos de las fuerzas de la gravedad.

Redes de robots

Por sus aplicaciones en física, biología e ingeniería, el estudio de la sincronización de redes de sistemas dinámicos se ha convertido en un tópico muy importante en el área de teoría de control. Para una revisión de la literatura se puede remitir a [31, 32]. Vagamente hablando, el objetivo de la sincronización es alcanzar una clase de acuerdo entre algunas variables de interés. Está claro que los dos ingredientes principales en tal problema son la dinámica individual de cada sistema y el patrón de interconexión entre ellos. Visto de esta forma, el problema de la teleoperación puede ser considerado como un problema particular de sincronización de sistemas. En esta línea, en [33] se reformula el problema de teleoperación como un problema de sincronización, en el cual el objetivo es sincronizar las posiciones del robot local y del robot remoto (Figura 3). En [19], por medio de controladores adaptativos, se probó que, además de la sincronización, se puede hacer la estimación de los parámetros físicos de los robots. Sin embargo, dicho esquema sólo funciona en sistemas que no son influenciados por la gravedad –la prueba de esto se reportó en [20]–. Utilizando también control adaptativo se han presentado dos algoritmos de control, uno basado en velocidades y otro en aceleraciones [34].

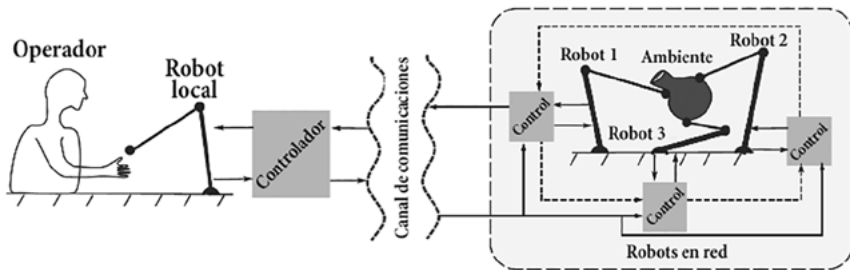


Figura 3. Sistema de teleoperación de redes de robots.

Existe diversa literatura en la que se trata el problema de la sincronización de redes de sistemas con nodos idénticos, particularmente con sistemas lineales e invariantes en el tiempo (LTI) y sin retardos en las comunicaciones, e.g. [31, 32, 35]. Algunos resultados para nodos no-lineales y no idénticos se pueden encontrar en [36]. En el brillante trabajo de [37] se presenta el nuevo concepto de semipasividad, introducido para establecer las condiciones de sincronización global de redes de sistemas no-lineales

difusamente acoplados (no necesariamente idénticos). Otra reciente y fundamental aportación es la de [38], en la que se observó que interconectando las salidas de sistemas pasivos a través de grafos fuertemente conectados y balanceados, dichos sistemas se sincronizan. Además, la sincronización se mantiene en presencia de retardos constantes en las comunicaciones. La propiedad de pasividad también se utiliza en [39, 40, 41, 42], para analizar el comportamiento de la sincronización.

El problema de la sincronización se puede formular también cuando se tiene definida explícitamente una trayectoria deseada. El primer resultado siguiendo esta línea se reportó en [43], en donde se propone un controlador que garantiza la sincronización de la posición, y que está basado en un observador con un acoplamiento todos-contra-todos. Por otro lado, en [44] se considera una red de sistemas genéricos Euler-Lagrange y se presenta una generalización del bien conocido controlador de Slotine y Li -ver [45, 46], para el caso de múltiples sistemas. Finalmente, en [21] se presenta un esquema unificado que puede sincronizar las posiciones de los robots en ambos casos, con o sin trayectoria predefinida.

Breve línea de tiempo

En la tabla 1 se presenta una breve descripción de algunos desarrollos en el campo de la telerrobótica a lo largo de los años.

Tabla 1. Breve línea cronológica de los avances de los sistemas de teleoperación		
Año	Autores	Evento
1898	N. Tesla	Primer dispositivo teleoperado utilizando ondas de radio
1952	R. Goertz	Primer sistema de teleoperación bilateral acoplado mecánicamente
1989	Anderson y Spong [3]	Primer controlador que proporciona estabilidad ante retardos constantes

Tabla 1. Breve línea cronológica de los avances de los sistemas de teleoperación

Año	Autores	Evento
1991	Niemeyer y Slotine [4]	Acoplamiento de impedancias entre el robot local y el robot remoto, para eliminar los efectos del reflejo de ondas de [3]
2006	Lee and Spong [22]	Primer controlador que no utiliza la transformación de dispersión de [3] y que garantiza seguimiento de posición aun con retardos constantes
2008	Nuño <i>et al.</i> [8]	Primer controlador que proporciona seguimiento de posición para sistemas con retardos variables
2008	Secchi <i>et al.</i> [14]	Primer controlador para sistemas con retardos que puede garantizar transparencia
2008	Chopra <i>et al.</i> [19]	Primer controlador adaptable para una clase de teleoperadores
2010	Nuño <i>et al.</i> [20]	Controlador adaptable, extensión de [19], para cualquier teleoperador con incertidumbre paramétrica
2011	Nuño <i>et al.</i> [21]	Extensión de [20] al caso del control de redes de robots con retardos constantes
2012	Sarras <i>et al.</i> [26]	Controlador robusto de retardos constantes que no utiliza mediciones de velocidad
2014	Nuño <i>et al.</i> [30]	Controlador para teleoperadores con robots flexibles y con retardos

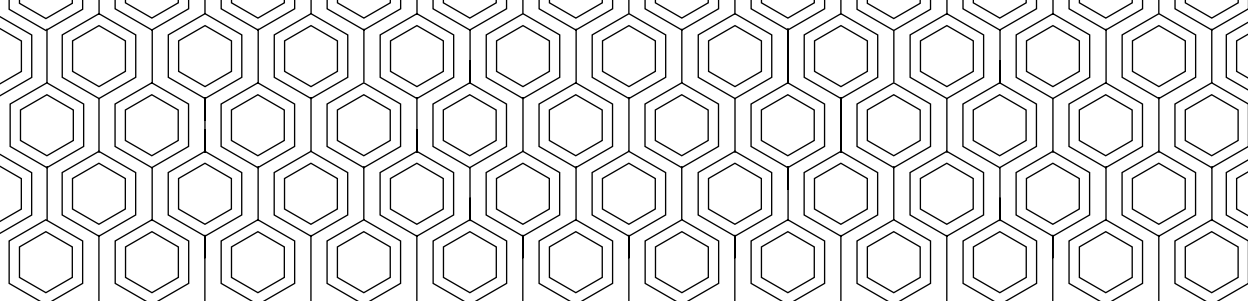
Referencias

- [1] P. F. Hokayem, and M. W. Spong, “Bilateral teleoperation: an historical survey,” *Automatica*, vol. 42, no. 12, pp. 2035-2057, 2006.
- [2] E. Nuño, L. Basañez, and R. Ortega, “Passivity-based control for bilateral teleoperation: a tutorial, *Automatica*, vol. 47, no. 3, pp. 485-495, 2011.
- [3] R. J. Anderson, and M. W. Spong, “Bilateral control of teleoperators with time delay,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 34, no. 5, pp. 494-501, May 1989.
- [4] E. Nuño, I. Sarras, and L. Basañez, “Consensus in networks of nonidentical Euler-Lagrange systems using P+d controllers,” *IEEE Transactions on Robotics*, 26(6):1503-1508, 2013.
- [5] G. Niemeyer, and J.J. Slotine, “Stable adaptive teleoperation,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 16, no. 1, pp.152-162, January 1991.
- [6] E. Nuño, L. Basañez, E. Rodríguez-Seda, and M. W. Spong, “Bilateral teleoperation experiments: Scattering transformation and passive output synchronization revisited,” in *Proceeding of the IFAC World Congress*, Seoul, Korea, pp. 12697-12702, July 2008.
- [7] E. Nuño, R. Ortega, N. Barabanov, and L. Basañez, “A globally stable PD controller for bilateral teleoperators,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 24(3), pp. 753-758, June 2008.
- [8] E. Nuño, L. Basañez, R. Ortega, and M. W. Spong, “Position tracking for nonlinear teleoperators with variable time-delay,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 28, no. 7, pp. 895-910, July 2009.
- [9] R. J. Anderson, and M. W. Spong, “Asymptotic stability for force reflecting teleoperators with time delay,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 11, no. 2, pp. 135-149, 1992.
- [10] I. G. Polushin, A. Tayebi, and H.J. Marquez, “Control schemes for stable teleoperation with communication delay based on ios small gain theorem,” *Automatica*, vol. 42, no. 6, pp. 905-915, June 2006.
- [11] W. Wang and J. J. Slotine, “Contraction analysis of time-delayed communications and group cooperation,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 51, no. 4, pp. 712-717, April 2006.
- [12] S. Stramigioli, A. van der Schaft, B. Maschke, and C. Melchiorri, “Geometric scattering in robotic telemanipulation,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 18, no. 4, pp. 588-596, August 2002.

- [13] G. Niemeyer, and J. J. Slotine, "Telemanipulation with time delays," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 23, no. 9, pp. 873-890, September 2004.
- [14] C. Secchi, S. Stramigioli, and C. Fantuzzi, "Transparency in port-hamiltonian-based telemanipulation," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 24, no. 4, pp. 903-910, August 2008.
- [15] N. A. Tanner, and G. Niemeyer, "Improving perception in time-delayed telerobotics," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 24, no. 8, pp. 631-644, 2005.
- [16] E. Nuño and L. Basañez, "Nonlinear bilateral teleoperation: stability analysis," in *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Kobe, Japan, pp. 3718-3723, May 2009.
- [17] E. Nuño, L. Basañez, and R. Ortega, "Control of teleoperators with time-delay: a lyapunov approach," in *Topics in Time-Delay Systems: Analysis, Algorithms and Control*, J. J. Loiseau, W. Michels, S. I. Niculescu, and R. Sipahi, Eds., LNCIS 388, Springer, 2009, pp. 371-381.
- [18] N. Chopra, M. W. Spong, R. Ortega, and N. Barbanov, "On tracking preformance in bilateral teleoperation," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 22, no. 4, pp. 844-847, August 2006.
- [19] N. Chopra, M. W. Spong, and R. Lozano, "Synchronization of bilateral teleoperators with time delay," *Automatica*, vol. 44, no. 8, pp. 2142-2148, August 2008.
- [20] E. Nuño, R. Ortega, and L. Basañez, "An adaptive controller for nonlinear bilateral teleoperators," *Automatica*, vol. 46, no. 1, pp. 155-159, January 2010.
- [21] E. Nuño, R. Ortega, L. Basañez, and D. Hill, "Synchronization of networks of nonidentical Euler-Lagrange systems with uncertain parameters and communication delays," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 56, no.4, pp. 935-941, 2011.
- [22] D. Lee and M.W. Spong, "Passive bilateral teleoperation with constant time delay," *IEEE Transactions on Robototics*, vol. 2, no. 2, pp. 269-281, April 2006.
- [23] L. Garcia-Valdovinos, V. Parra-Vega, and M. Arteaga, "Observer-based sliding mode impedance control of bilateral teleoperation under constant unknown time delay," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 55, no. 8, pp. 609-617, August 2007.

- [24] C.C. Hua, and X.P. Liu, "Teleoperation over the internet with/without velocity signal," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 60, no. 1, pp. 4-13, January 2011.
- [25] E. Nuño, L. Basañez, C. López-Franco, and N. Arana-Daniel. "Stability of nonlinear teleoperators using PD controllers without velocity measurements," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 351, no. 1, pp. 241-258, 2014.
- [26] I. Sarras, E. Nuño, M. Kinnaert, and L. Basañez, "Output-feedback control of nonlinear bilateral teleoperators," in *American Control Conference (ACC)*, Montreal, CA: IEEE, 2012, pp. 3490-3495.
- [27] D. Moschini, and P. Fiorini. "Performance of robotic teleoperation system with flexible slave device," in *IEEE International Conference Robotics and Automation*, April 2004, pp. 3696-3701.
- [28] M. Tavakoli and R. D. Howe. Haptic Effects of Surgical Teleoperator Flexibility. *The International Journal of Robotics Research*, vol. 28, no. 10, pp.1289-1302, May 2009.
- [29] A. Tobergte, and A. Albu-Schaeffer, "Direct force reflecting teleoperation with a flexible joint robot," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, St. Paul, Minnesota, May 2012, pp. 4280-4287.
- [30] E. Nuño, I. Sarras, L. Basañez, and M. Kinnaert, "Control of teleoperators with joint flexibility, uncertain parameters and time-delays," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 62, no. 12, pp.1691-1701, 2014.
- [31] R. Olfati-Saber, and R. M. Murray, "Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 49, no. 9, pp. 1520-1533, September 2004.
- [32] L. Scardovi, and R. Sepulchre, "Synchronization in networks of identical linear systems," *Automatica*, vol. 45, no.11, pp. 2557-2562, November 2009.
- [33] N. Chopra, and M. W. Spong, "Adaptive Synchronization of Bilateral Teleoperators with time delay," *Advances in Telerobotics*, pp. 257-270, Springer 2007.
- [34] E. Nuño, L. Basañez, R. Ortega, and G. Obregón-Pulido, "Position tracking using adaptive control for bilateral teleoperators with time-delays," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Anchorage, Alaska, USA, May 2010.
- [35] W. Ren, "On consensus algorithms for double-integrator dynamics," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 53, no. 6, pp.1503-1509, 2008.

- [36] J. Zhao, D. Hill, and T. Liu, "Synchronization of complex dynamical networks with switching topology: a switched system point of view," *Automatica*, vol. 45, no. 11, pp. 2502-2511, November 2009.
- [37] A. Pogromsky, G. Santoboni, and H. Nijmeijer, "Partial synchronization: from symmetry towards stability," *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. 172, pp. 65-87, November 2002.
- [38] N. Chopra, and M. W. Spong, "Output synchronization of nonlinear systems with time delay in communication," in *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, December 2006, pp. 4986-4992.
- [39] G.-B. Stan, and R. Sepulchre, "Analysis of interconnected oscillators by dissipativity theory," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 52, no. 2, pp. 256-270, 2007.
- [40] M. Arcak, "Passivity as a design tool for group coordination," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 52, no. 8, pp. 1380-390, August, 2007.
- [41] A. Pogromsky, and H. Nijmeijer, "Cooperative oscillatory behavior of mutually coupled dynamical systems. IEEE Transactions on Circuits and Systems I," *Fund. Theory Appl.*, vol. 48, no. 2, pp.152-162, 2001.
- [42] J. Yao, Z.H. Guan, and D.J. Hill, "Passivity-based control and synchronization of general complex dynamical networks," *Automatica*, vol. 45, no. 9, pp. 2107-2113, September, 2009.
- [43] A. Rodriguez-Angeles, and H. Nijmeijer, "Mutual synchronization of robots via estimated state feedback: a cooperative approach," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 12, no. 4, pp. 542-554, July 2004.
- [44] S. J. Chung, and J. J. Slotine, "Cooperative robot control and concurrent synchronization of lagrangian systems," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 25, no. 3, pp. 686-700, June 2009.
- [45] J. J. Slotine and W. Li, *Applied Nonlinear Control*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1991.
- [46] R. Ortega, and M. W., "Spong. Adaptive motion control of rigid robots: a tutorial," *Automatica*, vol. 25, no. 6, pp. 877-888, 1989.



La realidad virtual en los últimos veinte años

ADRIANA PEÑA PÉREZ NEGRÓN

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS COMPUTACIONALES,
CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍAS,
UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

En 1989, Jaron Lanier, fundador de la ahora desaparecida compañía VPL Research, la primera en vender lentes y accesorios para realidad virtual, acuñó la frase “realidad virtual”, misma que posteriormente fue aceptada por la comunidad de los investigadores y se convirtió en el título específico de esta área científica de la tecnología.

Cinco años después, en 1994, Stephen R. Ellis [1], entonces jefe del laboratorio Advanced Displays and Spatial Perception del Ames Research Center de la NASA, escribió su artículo “What are virtual environments?”, uno de los más citados en el área, donde define los ambientes virtuales como “escenarios computarizados, desplegados en referencia a la cabeza, que dan al usuario la ilusión de desplazamiento hacia otra locación”. Asegurando, en aquel entonces, que éstos proveían de un potencial nuevo medio de comunicación para la interacción entre humano y computadora (HCI por sus siglas en inglés).

El desarrollo de la realidad virtual (VR) está fuertemente ligado al desarrollo de dispositivos de entrada y salida (I/O) para interactuar con la computadora, así como al desarrollo de mejoras en el hardware y el software para el manejo de gráficas. Por sus implicaciones y usos, diferentes áreas de

la computación como la ya mencionada interacción humano-computadora o la inteligencia artificial, además de otras disciplinas como la geometría o la psicología han estado presentes. Sus orígenes se relacionan con los simuladores, pero se definen por la creación de dispositivos que permiten al usuario “entrar” en el mundo virtual sin mediación y no sólo usarlo, como es el caso de los simuladores [1].

Entornos virtuales, realidad virtual y entornos virtuales multiusuario

Para entender lo que es la realidad virtual, es importante conocer el concepto de entorno virtual (VE).

Un VE es un escenario generado por computadora, de una situación real o imaginaria, y no necesariamente tiene el requisito de ser gráfico. Los primeros VE se basaban en texto y eran multiusuario; consistían en juegos que explotaban el uso de la imaginación describiendo en texto las situaciones en las que los jugadores se podían encontrar. Esta tecnología data de finales de los años setentas.

Con la mejora de las computadoras para el uso y manejo de gráficos, llegan las interfaces gráficas (GUI), que se incorporan a estos juegos en línea a principios de los años noventa. Hoy en día es difícil imaginar un VE que no contenga al menos gráficos bidimensionales (2D).

Para la VR se utilizan gráficos tridimensionales (3D), que en contraste con los gráficos 2D utilizan una representación geométrica de la información (generalmente cartesiana) manejada internamente por la computadora para desarrollar los cálculos necesarios, los que incluyen también el manejo de la luz, para desplegarlos en una pantalla que tiene sólo dos dimensiones; este proceso se llama renderización (del inglés *render*).

Sin embargo, una película de animación creada con gráficos 3D, a pesar de ser un escenario virtual, no es VR ya que ésta última implica necesariamente la interacción del usuario con el escenario, situación que se da, por ejemplo en un videojuego.

El primer sistema de VR fue creado por Sutherland en 1963 y, aunque no fue descrito como tal, contenía la idea básica de la inmersión basada en un *head-mounted display* (HMD) —que se describe más adelante—, el cual

envolvía al usuario en un mundo virtual tridimensional. Los dispositivos que maneja la HCI para la VR generan dos principales variantes:

1. *Realidad virtual de escritorio*, que, como su nombre lo indica, se presenta en una computadora de escritorio. Es probable que para acceder a ella no requieran dispositivos especiales I/O.
2. *Realidad virtual inmersiva*, es el ambiente donde el usuario no puede interactuar más que con el mundo virtual, lo que se consigue mediante dispositivos especiales.

Los dos principales dispositivos para realidad virtual inmersiva son el HMD y la “cueva” o CAVETM [2], hecha con proyección trasera dirigida a las paredes y el piso de una habitación en forma de cubo, con al menos tres lados, en dónde se proyectan imágenes sobrepuestas una para cada ojo (proyección estéreo); se utilizan lentes activos para simular la paralaje de los ojos, como se muestra en la figura 1.



Figura 1. Usuario utilizando la CAVETM.

A principios de los años noventa, el desarrollo de la VR se encontraba en laboratorios y los desarrolladores estaban enfocados en un solo usuario. Uno de los cambios principales, además de los dispositivos de despliegue e interacción, se da cuando las aplicaciones de realidad virtual se conectan en red [3].

La realidad virtual multiusuario se denomina Entorno Virtual Multiusuario (MUVE). De acuerdo con Schroeder [3], los usos actuales de los MUVE se pueden dividir en dos grandes categorías: para el entretenimiento y para usos instrumentales con sistemas prototipo o de experimentación.

En la categoría de entretenimiento se encuentran aplicaciones comerciales y mundos virtuales en línea y los juegos masivos multiusuarios (*massively multiplayer role-playing games*, MMRPG), como por ejemplo el famoso World of Warcraft™.

Los entornos para colaborar a distancia, pertenecientes a la segunda categoría son un caso especial de MUVE y se tratan de manera diferente particularmente en la comunidad de investigadores. Se les denomina entornos virtuales colaborativos (*collaborative virtual environment*, CVE) y suelen utilizarse para el estudio de, por ejemplo, las comunicaciones interpersonales o las HCI.

Dispositivos I/O para realidad virtual

La evolución de componentes *hardware* para VR desde su concepción ha sido continua. Algunos de los componentes principales son: las tarjetas gráficas, los HMD y los sistemas de seguimiento o *trackers*. Otros dispositivos de entrada especiales incluyen los de navegación, los de interacción y los de retroalimentación táctil, entre otros (Isdale, 1998; Perry, Smith & Yang, 2004). A continuación se hace una breve descripción de su funcionamiento y mejoras principales.

Tarjetas gráficas

El proceso de despliegue de gráficos por computadora está fuertemente ligado al *hardware*, que a su vez funciona en conjunto con el *software* específico para gráficos. El *hardware* específico para el manejo de los grá-

ficos (también llamado “de video”) era integrado a la tarjeta madre de la computadora, práctica que fue cambiando hacia su integración en la unidad central de procesamiento (CPU). Un chip de gráficos integrado tiene generalmente una pequeña cantidad de memoria embebida, pero toma otra buena parte del sistema principal, presentando un desempeño nada deseable para aplicaciones en 3D. En cambio, una tarjeta de gráficos dedicada tiene memoria y procesador propios específicamente para el manejo de video e imágenes, lo que las hace más convenientes para VR.

Las tarjetas gráficas dedicadas, también conocidas como unidad de procesamiento gráfico (GPU), ofrecen varias funcionalidades, como la de acelerar el renderizado de escenarios 3D y los gráficos 2D. El término GPU fue generalizado por la empresa NvidiaTM en 1999, cuando marcó su modelo GeForce 256TM como el primer GPU del mundo, un solo chip con motor de renderización capaz de procesar un mínimo de 10 millones de polígonos por segundo (unidad básica del procesamiento de gráficas 3D). Posteriormente, ATITM utilizó el término VPU o unidad de procesamiento visual liberado en el Radeon 9700TM en el año 2002, otro nombre con el que también se le conoce a la tarjeta de gráficos dedicada.

Desde su aparición, las tarjetas de gráficos dedicadas han ido incorporando *shaders* (pequeños programas) en diferentes partes del proceso de renderizado, permitiendo su programación y promoviendo el cómputo en paralelo.

Head-mounted display

Los “cascos” de VR o HMD colocan una pequeña pantalla frente a cada uno de los ojos del usuario, todo el tiempo (Figura 2). La vista, el segmento de escenario virtual generado y desplegado, es controlado mediante la orientación de sensores montados en el casco, un sistema de seguimiento o *tracker* que actualiza el escenario virtual conforme los movimientos de la cabeza del usuario, es decir, se despliegan en referencia a la cabeza del usuario [1].

A principios de los años noventa, varios HMD salieron al mercado, entre los que se incluye el Virtual BoxTM, desarrollado por NintendoTM, los iGlassesTM de Virtual I-OTM y el CybermaxxTM, desarrollado por VictormaxxTM. En la mayoría de los casos, un conjunto de lentes ópticos y espejos se utilizan para agrandar la vista, los cuatro tipos principales son: 1) *liquid crystal*

display (LCD), 2) *projected*, 3) *small CRT head mounted display*, y 4) *Single Column LED*[4].

Entre sus problemas conocidos está el cable que limita y restringe la movilidad del usuario, y en especial el limitado campo de visión, que incluso ha sido documentado [5]. En los primeros HMD de los noventa, este campo de visión era de alrededor de 30°, pero se fue ensanchando mediante varias mejoras hasta aproximadamente a 45°. En el año 2012, Palmer Lucky desarrolla el Oculus Rift²⁰, con no sólo un campo de visión de aproximadamente 100°, sino que además lo lanza al mercado por un precio relativamente bajo comparado con sus similares, con muy probables consecuencias en el uso masivo de la realidad virtual. Debemos considerar que el costo de una CAVETM, comparado con un HMD, ha hecho que éstos últimos sean una opción mucho más utilizada, especialmente por los usuarios regulares.



Figura 2. Ejemplo de head-mounted display o HMD.

²⁰ Página oficial: <http://www.oculus.com/rift/>.

Sistemas de seguimiento o *trackers*

Estos sistemas siguen la posición y orientación del usuario y transmiten la referencia al entorno virtual. Su propósito es determinar la posición ‘x’, ‘y’ y ‘z’ y su orientación o inclinación hacia alguno de los ejes (*yaw*, *pitch* o *roll*) de algunas partes del cuerpo del usuario en referencia a un determinado punto. Muchos dispositivos trabajan en conjunto con un sistema de seguimiento o *tracker*, HMD —como ya se mencionó—, pero también algunos guantes digitalizadores, controles de videojuego y *joysticks* que siguen los movimientos de la mano del usuario.

Los *trackers* se dividen principalmente en mecánicos, electromagnéticos, ultrasónicos, infrarrojos y de inercia [4], la mayoría de ellos fueron desarrollados a principios de los noventa y a partir de ahí han ido evolucionando. Un cambio importante sucede en el año 2010, cuando MicrosoftTM lanza para su Xbox 360TM el KinectTM²¹, que infiere la posición del cuerpo en dos fases: 1) primero crea un mapa de profundidad utilizando luz estructurada y luego 2) la posición del cuerpo mediante *machine-learning*; el resultado es un sistema que digitaliza los movimientos del cuerpo sin necesidad de cables.

Dispositivos de entrada para realidad virtual

Estos dispositivos se utilizan para interactuar con los objetos del mundo virtual, existe una gran variedad de ellos, entre los más comunes se cuentan el teclado y el ratón, y otros creados especialmente para VR, como los *joysticks*, los controles de videojuego, los controles tipo WiiTM, las *wand* o los guantes digitalizadores.

Los guantes digitalizadores fueron desarrollados en su mayoría a principios de los noventa. En 1989, MatelTM lanzó al mercado el primer guante digitalizador, el Power GloveTM, un accesorio para su consola de videojuegos NintendoTM que a pesar de ser fuertemente criticado por su imprecisión y dificultad de uso, se consigue vender más de 100,000 unidades en Estados Unidos gracias a la mercadotecnia. Desde entonces se han hecho muchas mejoras a este concepto, por ejemplo, algunos guantes digitalizadores ade-

²¹ Página oficial: <http://www.xbox.com/en-US/kinect>.

más de seguir los movimientos de la mano detectan la flexión de los dedos, o mejor aún, dan retroalimentación táctil, por ejemplo, mediante pistones neumáticos [6]. Hace muy poco, basado en una técnica similar a la del Kinect™, el Leap Motion Controller™²² sigue los movimientos de la mano y de los dedos, sin necesidad de usar un guante o cables.

En cuanto a la retroalimentación táctil, se ha convertido en toda una rama de desarrollo e investigación. En [7] podemos encontrar un buen resumen del estado del arte en estos dispositivos que integran un tercer sentido, el del tacto, a la VR.

Aplicaciones y motores de videojuego

Finalmente y de manera muy breve veamos el *software* para crear gráficos 3D e integrarles HCI. A pesar de que mucho del *software* para realidad virtual se desarrolla de cero, existen numerosas herramientas de alto nivel, aplicaciones y *middleware*, que pueden categorizarse de la siguiente manera:

- *De modelado*: Aplicaciones que nos permiten crear modelos tridimensionales que formarán el escenario virtual mediante interfaces gráficas. Su historia se remonta a los años sesenta, cuando Sutherland como parte de su tesis doctoral presenta el Sketchpad [8], primer programa de dibujo por computadora. Una historia completa de las aplicaciones CAD (*computer-aided design*) puede encontrarse en [9]. Estas aplicaciones son generalmente caras, sin embargo, en años recientes la organización Blender²³, de acceso abierto y con un código muy robusto, permite la creación de modelos 3D sin necesidad de pagar por obtener dicha aplicación.
- *Para manejar el comportamiento*: Los motores de videojuego son plataformas para el manejo de sus tareas relacionadas, como el renderizado, o el tratamiento de la física de los modelos 3D como colisión, por ejemplo [10]. En 1989 el videojuego *Ultima Underworld*™ integra su propio motor de videojuegos con el mismo nombre, mismo que posteriormente toma la empresa *Origin System* integrándole el algoritmo para texturas y mapas [10].

²² Página oficial: <https://www.adafruit.com/products/2106>.

²³ Página oficial: <http://www.blender.org/>.

- *Para distribuir y compartir los entornos:* Los motores de videojuegos también permiten hacer la distribución mediante mensajes, para que los escenarios de los diferentes usuarios sean consistentes.
- *Para manejar los dispositivos I/O:* Muchos de los nuevos dispositivos sólo es necesario conectarlos, sin embargo, pueden encontrarse algunas incompatibilidades debido al uso de OpenGL o Direct3D (ambas interfaces de programación de aplicaciones de gráficos 2 o 3D); mientras que la mayoría tienen su propio conjunto de herramientas de desarrollo de software (SDK por sus siglas en inglés).

Conclusiones

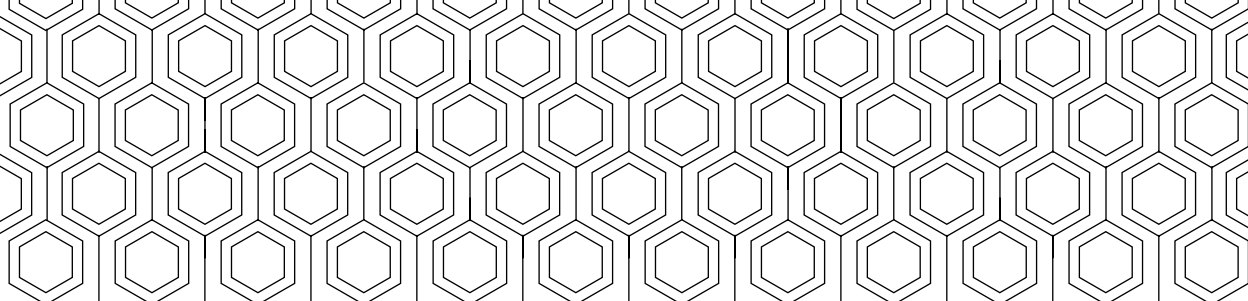
Otras formas de seguir el desarrollo de la realidad virtual podrían ser mediante sus aplicaciones, que poco a poco se han ido introduciendo en la industria y en diferentes disciplinas de estudio; por el desarrollo de cada vez más sofisticadas representaciones de las acciones y emociones de los usuarios, que a través de una representación gráfica tienen presencia en los mundos virtuales; o bien, por el desarrollo de agentes virtuales inteligentes, que incluso pueden comunicarse con los usuarios.

A pesar de los avances queda mucho por hacer, por ejemplo, los dispositivos haptic actualmente se utilizan sólo en algunas aplicaciones particulares; la latencia del sonido ocasionada por su digitalización sigue siendo un problema que rompe la sensación de “estar ahí” [3]; o la todavía común práctica de utilizar dispositivos con cables, por mencionar algunos.

En estos últimos 20 años, como hemos podido apreciar, la industria del videojuego ha tenido un papel preponderante para que la VR saliera de los laboratorios de principios de los noventa y entrara en la casa de los usuarios de computadoras personales, promoviéndose así a través de internet el uso de MUVE. A partir de entonces, nuevos dispositivos I/O que permiten la interacción cada vez menos dependiente de cables y aplicaciones específicas han ido apareciendo en el mercado a precios más accesibles para el usuario regular de computadora. Por último, cabe mencionar que por supuesto los mundos virtuales también se están moviendo a los dispositivos móviles[11].

Referencias

- [1] S. Ellis, "What are virtual environments?", *IEEE Comput. Graph. Appl.*, vol. 14, pp. 17-22, January 1994.
- [2] C. Cruz-Neira, D. J. Sandin, and T. A. Defanti, "Surround-screen projection based virtual reality: the design and implementation of the CAVE," *Computer Graphics*, vol. 27, pp. 135-142, 1993.
- [3] R. Schroeder, *Being there Together: Social Interaction in Shared Virtual Environments*. New York: Oxford University Press, 2011.
- [4] O. Moses, I. E. Onyesolu, and R. O. Obikwelu, "A survey of some virtual reality tools and resources," in *Virtual Reality and Environments*, C. Sik, Ed. Rijeka, Croatia: Intechopen, 2012, pp. 21-42.
- [5] J. Hindmarsh, M. Fraser, C. Heath, and S. Benford, "Virtually missing the point: configuring CVEs for objectfocused interaction," in *Collaborative Virtual Environments: Digital Places and Spaces for Interaction*, E. F. Churchill, D. Snowdon and A. Munro, Eds. London: Springer, 2002, pp. 115-139.
- [6] D. Gomez, G. Burdea, and N. Langrana, "Integration of the rutgers master II in a virtual reality simulation," *IEEE: Proceedings of the Virtual Reality Annual International Symposium in Research Triangle Park, NC*, vol. 3, pp. 198-202, 1995.
- [7] B. D. Varalakshmi, J. Thriveni, K. Venugopa, and L. M. Patnaik, "Haptics: state of the art survey," *International Journal of Computer Science Issues*, vol. 9, 2012.
- [8] I. E. Sutherland, "Sketchpad: a man-machine graphical communication system," Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, Tech. Rep. 296, 1963.
- [9] Checkstress™. *The best CAD software history on the Web*. [Online.] Available: <http://www.cadazz.com/index.htm>. 2004. Consultado en septiembre de 2014.
- [10] S. P. Partha, G. Surajit, and B. Abhishek, "History and comparative study of modern game engines," *Nternational Journal of Advanced Computer and Mathematical Sciences*, vol. 3, pp. 245-249, 2012.
- [11] A. Zarrad, "A survey of routing techniques for mobile collaborative virtual environment applications," *CoRR*, vol. abs/1303.3643, 2013.



La bioinformática en los últimos veinte años

ISRAEL ROMÁN GODÍNEZ

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS COMPUTACIONALES,
CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍAS,
UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

Introducción

Los siglos XIX y XX se caracterizaron por el desarrollo de grandes avances científicos y tecnológicos en muchas disciplinas de la investigación, dos de ellas son las ciencias biológicas y la ciencia de la computación.

Desde la publicación de *El origen de las especies*, escrito por Charles Darwin en 1859 [1], que introducía la idea de la evolución genética como medio de adaptación de los seres vivos, hasta la presentación del primer genoma completo de un organismo vivo (*Haemophilus influenzae*) en 1995 [2], han sido muchos los aportes de diferentes científicos en el camino por entender la evolución de los seres vivos, algunos de ellos son: los conceptos de rasgos dominantes y recesivos acuñados por Gregor Mendel en 1865 [3]; la publicación de la “Teoría del gen” en 1950 por Thomas Hunt Morgan [4]; las reglas de Chargaff que indicaban la cantidad de timina-adenina y guanina-citosina en las secuencias de ADN [5]; Rosalind Franklin y Maurice Wilkins con la llamada “Fotografía 51” [6], imagen obtenida por difracción de rayos X que fue utilizada posteriormente por James Watson y Francis Crick para

proponer el modelo del ADN en 1953 [7]; el anuncio de la primera secuencia completa de una proteína, realizada por Frederick Sanger en 1955 [8]; la publicación del concepto conocido como “dogma central” de la biología molecular desarrollado por Francis Crick y George Gamov en 1956 [9]; el descifrado del código genético, 1961 [10]; durante los años de 1974 a 1977 Allan Maxam y Walter Gilbert [11] desarrollaron a la par de Frederick Sanger [12] diferentes métodos para la secuenciación del ácido desoxirribonucleico (ADN), impulsando significativamente la era genómica.

Paralelamente, las ciencias computacionales fueron creando su propio camino; Charles Babbage, en 1812, ideó y construyó lo que se conoce como la “máquina diferencial”, utilizada para realizar operaciones de cálculo de tablas logarítmicas o funciones polinómicas [13]. Poco después, en 1842, Ada Lovelace desarrolló el que posteriormente se denominaría el primer programa de computadora, un algoritmo para la máquina analítica que calculaba los números de Bernulli [14]; en 1928 surgió la primera computadora análoga [15], a la que le siguió el computador “Zuse Z1” en 1938 y “Colossus” en 1942, ésta última considerada la primera computadora programable [16]. Una época crucial para la evolución de las ciencias computacionales fue el periodo comprendido entre 1933 a 1940, cuando se formalizó el concepto de algoritmo con el surgimiento de tres modelos matemáticos: el concepto de función recursiva general [17], la máquina de Turing [18] y el λ -cálculo [19] [20]. Dicho modelo permitió la construcción de computadoras que fueran reprogramables y, por lo tanto, capaces de resolver el rango completo de problemas computables; la primera computadora en implementarlo fue la ENIAC [21], en 1946.

Además de los antes mencionados, más avances se fueron dando en cada una de las áreas, pero cabe destacar tres eventos que podemos considerar impulsores en el crecimiento de la bioinformática: el desarrollo de la internet, la *World Wide Web* [22] y la secuenciación del genoma de diferentes organismos vivos, incluyendo el del ser humano.

Bioinformática

De acuerdo con Paulien Hogeweg [23], el término *bioinformática* surge a principios de los años setenta, durante las discusiones que mantenía con Ben Hesper sobre investigaciones que planeaban realizar; utilizaron el

término para nombrar así al “estudio de los procesos de información en sistemas bióticos” [23].

La primera vez que lo utilizaron fue en un artículo publicado en el año 1978 [24] [25].

Además de la definición anterior, existen otras que se han ido creando con el paso del tiempo. Por ejemplo, el diccionario Oxford la define como: “Conceptualismo biológico en términos de moléculas y la aplicación de técnicas informáticas para entender y organizar la información, a gran escala, de dichas moléculas. En resumen, la bioinformática es un sistema de manejo de información para biología molecular que tiene muchas aplicaciones” [26], o desde otra perspectiva: “Es el campo interdisciplinario que engloba la biología, ciencias de la computación, matemáticas y estadística para analizar secuencias biológicas, contenido genético, y predicción de funciones y estructuras de macromoléculas” [27, 28].

Actualmente, la bioinformática resuelve problemas de diferente indole, desde el almacenamiento, la gestión y la interpretación de datos generados a gran escala durante la era genómica, hasta la generación de conocimiento a partir de ellos.

Esta disciplina representa la intersección de la genómica, biotecnología y tecnologías de la información, convirtiéndola en una ciencia multidisciplinaria que tiene como objetivo “permitir el descubrimiento de nuevos elementos biológicos que apoyen la creación de una perspectiva global, de la cual se puedan derivar principios biológicos uniformes” [29], y para lograr esto último tenemos que comenzar por tener claros los siguientes conceptos: dato, información y conocimiento.

Datos, información y conocimiento

Con frecuencia existe confusión entre los términos *datos*, *información* y *conocimiento*, al grado que suelen utilizarse indistintamente. Sin embargo, existen diferencias que es necesario conocer.

Un dato es un conjunto discreto de valores sobre un hecho real. Los datos no dicen nada del porqué de las cosas, y por sí mismos tienen poca relevancia. La información es un conjunto de datos, organizados de tal forma que llevan un mensaje a un receptor. Son datos que, en su conjunto,

tienen relevancia y propósito. El conocimiento es una mezcla de experiencia, valores, información y “saber hacer” que sirve como marco para la incorporación de nuevas experiencias e información, y es útil para la acción. Se origina y aplica en la mente de los conocedores [30].

Además, nos es posible encontrar una relación cíclica entre estos tres conceptos. El análisis de los datos y la forma en la que los organizamos nos permite obtener información de ciertos sucesos muestreados y, a partir de dicha información, generar el conocimiento necesario para tomar acciones.

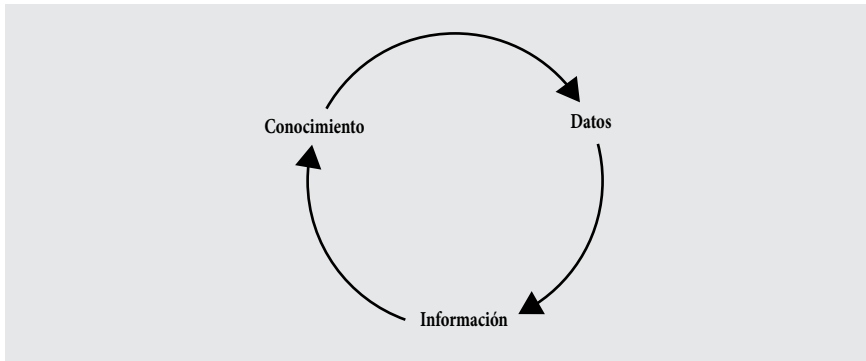


Figura 1. Ciclo de información.

Proceso de información en los seres vivos

Ahora que sabemos que es posible analizar los procesos biológicos como sistemas de información, y que dicho enfoque es tratado por la bioinformática, es necesario definir cuáles son los datos que podemos obtener de los seres vivos, como organizarlos de forma que nos brinden información sobre sus procesos y, por último, interpretar dicha información para generar conocimiento.

A principios del siglo XIX, el descubrimiento del microscopio permitió observar las células. Una célula es una colección de químicos dentro de un saco rodeado por una capa de grasa llamada membrana plasmática. En las células eucariontas, el material genético está ubicado dentro del núcleo, separado del resto de la célula por una membrana. En las células procariontas no hay núcleo y la estructura es más homogénea. Las bacterias son procariontas; plantas, animales y protozoarios son eucariontes [31, 32].

El material genético en las células está contenido en estructuras llamadas cromosomas. La mayoría de los procariontes tiene un solo cromosoma. Por otro lado, en los eucariontes todas las células de un individuo contienen el mismo número de cromosomas, por ejemplo, 46 en los humanos [31, 32].

Los cromosomas están formados por una estructura semejante a una doble hélice constituida por dos hebras muy largas, que se enrollan alrededor de un eje. Los nucleótidos consisten de una base nitrogenada, una molécula de azúcar (desoxirribosa) y un fosfato. Las cuatro bases nitrogenadas son denotadas por la primera letra de cada base: A (adenina), C (citocina), G (guanina) y T (timina). Los nucleótidos de una cadena de ADN están unidos mediante moléculas de fósforo y azúcar, formando una cadena larga que constituye una cadena de ADN. Cada una de estas cadenas tiene la propiedad de estar unida a otra cadena conocida como cadena complementaria, esto a raíz de cierta característica de los nucleótidos de establecer parejas específicas, A-T y G-C. La unión de estos dos tipos de cadenas complementarias da como resultado una cadena que tiene forma de doble hélice, la cual fue propuesta por primera vez por Watson y Crick en 1953. Este tipo de configuración asegura que cada cadena contiene la información necesaria, y la maquinaria bioquímica para que la información pueda ser copiada de generación en generación [31, 32].

Las cadenas en la doble hélice son antiparalelas; además, la dirección a lo largo de cada cadena está determinada por la posición del átomo de carbono en el anillo de desoxirribosa que, unido a los fosfatos, crea las cadenas. Dependiendo de la numeración de los carbonos, si la cadena comienza con el quinto carbono se dice que la secuencia va de 5' a 3'; y para el caso contrario, si comienza con el tercer carbono la dirección va en el sentido 3' a 5' [31, 32].

Las secuencias de ADN tienen un *sentido* y un *antisentido*. Se denomina sentido si la secuencia es la misma que la del ARN mensajero, que posteriormente se traducirá en una proteína. Por lo tanto, a la secuencia complementaria se le denomina antisentido. Otra forma de nombrar a la cadena “sentido” es como cadena 5'-3' y a la antisentido 3'-5' [31, 32].

El genoma es todo el ADN almacenado en los cromosomas de cada especie. Contiene la mayoría de la información necesaria para determinar los rasgos de un organismo (fenotipo) y la información genética que contiene (genotipo) [31, 32].

La mitosis es el proceso de división celular. Durante la mitosis, una célula se divide y crea una nueva célula. Los cromosomas de la célula también se duplican y cuando la mitosis termina, cada célula contiene una copia de cada cromosoma que está en el núcleo [31, 32].

Dentro de las cadenas de ADN existen ciertas cadenas de nucleótidos conocidas como genes. Los genes son secuencias de tripletas de nucleótidos, también llamadas exones, las cuales tienen una correspondencia particular con una proteína. Los exones que forman a los genes se localizan en las cadenas de ADN pero en forma desordenada, es decir, no es posible tomar una porción de la cadena y aseverar que ésta codificará, tal cual, a una proteína. Entre cada exón existen secuencias que no codifican una proteína, y a estas secuencias se les conoce como intrones; a las secuencias que tampoco codifican proteínas y que se encuentran entre cada gen se les denomina regiones intergenéticas [31, 32].

La expresión genética es el proceso biológico por el cual la información contenida en el ADN, específicamente en los genes, es transcrita en ARN mensajero y éste traducido a proteína, el elemento que finalmente realiza alguna tarea en el organismo [31, 32].

Las proteínas se componen de 20 diferentes aminoácidos, los cuales están denotados de 20 diferentes letras. Cada uno de los aminoácidos es codificado por uno o más codones. Las propiedades químicas que diferencian a los 20 aminoácidos causan que éstos se agrupen en, y conformen, cierta estructura 3D que define las funciones específicas de una célula [31, 32].

Por último, Paulien Hogeweg y Ben Hesper observaron que en los procesos biológicos descritos anteriormente es posible identificar etapas de los procesos de información en dichos procesos biológicos, un ejemplo de ello es la acumulación de información mediante cromosomas, la transmisión de dicha información a través del proceso de mitosis y finalmente la interpretación de dicha información en la expresión genética.

Nos parecía que una de las características definitorias de la vida era el procesamiento de información en sus diversas formas, por ejemplo, la acumulación de la información durante la evolución, la transmisión de la información del ADN a los procesos intracelulares, y la interpretación de esa información en múltiples niveles [23].

Los últimos veinte años

Los últimos 20 años de la bioinformática han sido precisamente los más importantes y excitantes. Comenzaremos con decir que dos sucesos dieron pie al desarrollo de la bioinformática: a) se obtuvo, por primera vez, la secuencia completa de un organismo vivo, *Haemophilus influenzae*, en 1995, y b) el anuncio de la CERN de la creación del protocolo que daría vida a la World Wide Web en 1991, dando pie a la era post-genómica.

A partir de ese momento tanto la secuenciación de organismos vivos como su publicación a través de grandes bancos de datos accesibles desde internet, han permitido que muchos investigadores desarrollen modelos, algoritmos y herramientas computacionales, de distinta índole, que permitan a otros científicos encontrar información en este gran conjunto de datos y generar, con dicha información, el conocimiento que nos permita avanzar como humanidad.

En este sentido, los avances recientes que se han presentado en el área de la bioinformática han sido enfocados a resolver problemas que pueden ser clasificados dentro de dos categorías: tareas genómicas y tareas proteómicas. El concepto *tareas genómicas* es usado para denotar el estudio de varios genomas viéndolos como entidades que presentan contenidos similares. Por otro lado, el concepto *tareas proteómicas* hace referencia al estudio de todas las proteínas que surgen a partir de un genoma [33].

Tareas genómicas

Análisis de secuencias genéticas

El alineamiento de secuencias se basa en los principios de *similitud* y *homología* [34]. Similitud es una medida cuantitativa entre dos genes que son idénticos en términos de cantidades observables, y homología se refiere a como dos secuencias, que pueden ser muy similares o no, que comparten un ancestro en común.

Alineamiento de secuencia

Un alineamiento es un arreglo de dos o más secuencias que exhiben dónde son similares y dónde no lo son. El alineamiento *óptimo* es aquel que exhibe el mayor número de correspondencias y el menor número de diferencias. Básicamente existen dos tipos de métodos de alineamiento, *alineamiento global* y *alineamiento local*; el primero maximiza el número de coincidencias entre las secuencias a lo largo de la cadena completa, y el segundo selecciona el número más alto de coincidencias en cierta porción de la secuencia [35, 36].

Búsqueda de patrones

Se buscan patrones nucleicos en una secuencia de ácido nucleico, en un conjunto de secuencias o en una base de datos. Esto es importante para descubrir relaciones evolutivas o patrones entre diferentes formas de vida [37].

Localización de genes e identificación de promotores

Debido a que la secuencia de ADN es demasiado larga, es necesaria la identificación automática de genes de una larga secuencia de ADN. Las células tienen por sí mismas un mecanismo que reconoce el comienzo de un gen, y a este identificador se le conoce como promotor. Los promotores son regiones anteriores a cada gen que indican que enseguida se encontrará uno. Los promotores son los elementos que regulan el inicio de la transcripción [38].

Tareas proteómicas

Las proteínas son polipéptidos formados dentro de las células como cadenas de aminoácidos [39]. Existen diferentes tareas relacionadas con el análisis de proteínas, a continuación se mencionan las más importantes.

Alineación múltiple de secuencia

Técnicas de alineación múltiple de secuencia de aminoácidos se utilizan con los siguientes objetivos: a) encontrar el mayor número de secuencias

coincidentes en diferentes secuencias alineadas, b) ayudar a la predicción de estructuras secundarias y terciarias de nuevas secuencias, y c) servir como paso preliminar en el análisis de la evolución molecular usando métodos filogenéticos [40].

Búsqueda de *motifs*

El objetivo de la búsqueda de *motifs* es encontrar patrones específicos en secuencias de proteínas. Las proteínas son generadas a partir de un conjunto básico de bloques a los que conocemos como dominios. A través de los años, el proceso de evolución ha ido cambiando estos dominios, dando origen a una gran diversidad de secuencias proteínicas, y dado que parten de un conjunto básico, es posible encontrar que proteínas distintas compartan cierta relación local o global. Por esta situación, la búsqueda de *motifs* es una técnica que busca en secuencias ciertos dominios que tengan un significado biológico que categorizará a la proteína en cierta familia [40].

Genómica estructural

La genómica estructural se encarga de la predicción de estructuras tridimensionales de proteínas a partir de una secuencia primaria de aminoácidos [41], ésta es una de las tareas más complicadas en bioinformática. El método de similitud puede ser usado para la predicción de estructuras secundarias y terciarias con base en su homología.

Expresión genética

La expresión de genes es el proceso por el cual la información que codifica a un gen es convertida en una estructura funcional de las células. La expresión de genes incluye la transcripción de una secuencia genética en su correspondiente mRNA y su traslación a proteína, además de aquellas secuencias que se transcriben en ARN pero que no es convertido en proteínas. Por lo tanto, la expresión genética estudia los niveles de expresión de los genes en las células bajo diferentes condiciones [42].

Microarreglos

La tecnología de los microarreglos permite medir los niveles de expresión de miles de genes al mismo tiempo. Para este tipo de análisis lo ideal es que cada una de las moléculas contenidas en los microarreglos identifique un gen o un exón del genoma. Esta técnica nos ayuda para comparar la expresión de genes en su estado normal contra células con cierta enfermedad, por ejemplo células cancerígenas [43].

Análisis de las redes reguladoras de genes

Una pregunta muy importante en la biología es ¿cómo se inicia o se detiene la expresión de genes?, es decir, cómo son regulados los genes [40]. Debido a que casi todas las células tienen el mismo contenido genómico, es posible deducir que la diferencia entre los procesos celulares no radica en el contenido genómico sino en la expresión genómica. La regulación en los genes no ha sido entendida completamente, pero es evidente que un tipo de proteína llamado *factor de transcripción* juega un papel muy importante. Esta proteína se adhiere a partes específicas del ADN conocidas como “sitios obligatorios de factor de transcripción”, que están localizados en zonas denominadas como “regiones de promotores”.

Promotores específicos son asociados con un gen en particular y generalmente no están tan lejanos de sus respectivos genes. Los factores de transcripción controlan la expresión de genes colocando los genes promotores en las regiones de promotores, con lo cual se activa o se reprime la transcripción de los mismos [42, 44].

Conclusiones

La multidisciplinaridad es un concepto que está siendo utilizado cada vez más cuando se habla de colaboración entre diferentes áreas de la ciencia en la búsqueda de solución de problemas.

Como hemos podido ver, la bioinformática es el resultado de la colaboración entre varias disciplinas científicas, por lo tanto es considerada una ciencia de naturaleza multidisciplinaria.

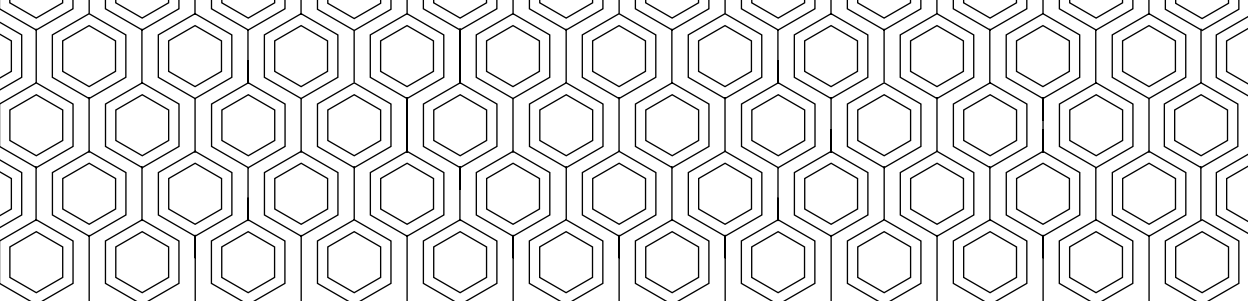
Para el estudio de las áreas biológicas, la bioinformática ha dejado de ser una opción y se ha convertido en una necesidad. Por ello cada vez más se requiere de personas que desarrollen habilidades y conocimiento, tanto en el ámbito de la biología como de la computación, las matemáticas y la estadística, con el objetivo de diseñar e implementar modelos y herramientas computacionales que nos permitan gestionar la gran cantidad de datos que se generan, procesar dichos datos para obtener información y, finalmente, lograr conclusiones que provean del conocimiento necesario para sustentar el avance científico.

Referencias

- [1] C. Darwin, "On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life", *Nature*, 1859.
- [2] R. Fleischmann, M. Adams, O. White, R. Clayton, E. Kirkness, A. Kerlavage *et al.*, "Whole-genome random sequencing and assembly of *Haemophilus influenzae* Rd", *Science*, vol. 269, no. 5223, pp. 496-512, 1995.
- [3] G. Mendel, "Versuche über Pflanzenghybriden. Verhandlungen des naturforschenden Vereines," *Brünn, Bd. IV für dasJahr* 1865.
- [4] K. R. T. H. Benson, "Morgan's resistance to the chromosome theory," *Nature Reviews Genetics*, vol. 2, pp. 469-474, 2001.
- [5] E. Chargaff, S. Zamenhof, and C. Green, "Composition of human desoxypentose nucleic acid," *Nature*, vol. 165, no. 4202, pp. 756-757, 1950.
- [6] R. Franklin and R. G. Gosling, "Molecular configuration in sodium thymonucleate," *Nature*, vol. 171, pp. 740-741, 1953.
- [7] J. D. Watson and F. H. C. Crick, "A structure for deoxyribose nucleic acid," *Nature*, vol. 171, pp. 737-738, 1953.
- [8] A. P. Ryle, F. Sanger, L. F. Smith, and R. Kitai, "The disulphide bonds of insulin," *Biochem. J.*, vol. 60, pp. 542-556, 1955.
- [9] F. Crick, "Central dogma of molecular biology," *Nature*, vol. 227, no. 5258, pp. 561-563, 1970.
- [10] F. H. Crick, L. Barnett, S. Brenner, and R. J. Watts-Tobin, "General nature of the genetic code for proteins," *Nature*, vol. 192, no. 4809, pp. 1227-1232, 1961.
- [11] A. M. Maxam and W. Gilbert, "A new method for sequencing DNA," *Proceedings Natl. Acad. Sci., USA*, vol. 74, no. 2, pp. 560-564, 1977.

- [12] F. Sanger, S. Nicklen, A. R. Coulson, "DNA sequencing with chain-terminating inhibitors," in *Proceedings Natl. Acad. Sci., USA*, vol. 74, no. 12, pp. 5463-5467, 1977.
- [13] M. Lindgren, *Glory and Failure: The Difference Engines of Johann Müller, Charles Babbage, and Georg and Edvard Scheutz*, Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1990.
- [14] T. Simonite, "Short sharp science: celebrating Ada Lovelace: the world's first programmer," *New Scientist*, 2012.
- [15] A. S. Jackson, *Analog Computation*, McGraw-Hill, 1960.
- [16] D. R. , "The Bush differential analyser and its implications," *Nature*, vol. 146, no. 3697, p. 319, 1940.
- [17] W. S. Brainerd and L.H. Landweber, *Theory of Computation*. Wiley, 1974.
- [18] A. M. Turing, "On computable numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem," in *Proceedings of the London Mathematical Society*, vol. 2. pp. 230-265, 1937.
- [19] A. Church, "A formulation of the Simple Theory of Types", *Journal of Symbolic Logic*, vol. 5, 1940.
- [20] A. Church, "An unsolvable problem of elementary number theory", *American Journal of Mathematics*, vol. 58, no. 2, pp. 345-363, 1936.
- [21] J. Shurkin, *Engines of the Mind: the Evolution of the Computer from Mainframes to Microprocessors*. Norton, 1996.
- [22] K. Hafner, *Where Wizards Stay Up Late: the Origins of the Internet*. Simon & Schuster. 1998.
- [23] Hogeweg, Paulien, "The roots of bioinformatics in theoretical.biology," *PLoS computational biology*, vol. 7, no. 3. Public Library of Science, 2011.
- [24] P. Hogeweg and B. Hesper. "Interactive instruction on population interactions," *Comput Biol Med*, vol. 8, pp. 319-327, 1978.
- [25] P. Hogeweg, "Simulating the growth of cellular forms," *Simulation*, vol. 31, pp. 90-96, 1978.
- [26] N. M. Luscombe, D. Greenbaum, and M. Gerstein, "What is bioinformatics? An introduction and overview," *Yearbook of Medical Informatics*, vol. 1, pp. 83-99, 2001.
- [27] A. M. Lesk, *Introduction to Bioinformatics*, 2nd. ed. Oxford University Press, 2005.
- [28] P. Baldi and S. Brunak, *Bioinformatics: The Machine Learning Approach*. Cambridge, MA: MIT Press, 1998.

- [29] R. B. Altman, A. Valencia, S. Miyano, and S. Ranganathan, "Challenges for intelligent system in biology", *IEEE Intell. Syst.*, vol. 16, no. 6, pp. 14-20, 2001.
- [30] A. Broberg, "Learners as Knowledge Workers. Some Implications", presented at Frontiers In Education Conference, San Juan, Puerto Rico, 1999.
- [31] J. Setubal and J. Meidanis, *Introduction to computational molecular biology*, Boston, MA: International Thomson Publishing, 1999.
- [32] C. K. Mathews, K. E. Van Holde, and K. G. Ahern, *Biochemistry*, 3rd. ed. Addison Wesley, 2009.
- [33] J. Cohen, "Bioinformatics—An introduction for computer scientists," *ACM Computing Surveys*, vol. 36, no. 2, pp. 122-158, June 2004.
- [34] H. Nash, D. Blair, and J. Grefenstette, "Comparing algorithms for large scale sequence analysis," in *Proceedings 2nd. IEEE Int. Symp. on Bioinformatics and Bioengineering*.
- [35] S. B. Needleman and C.D. Wunsch, "A general method applicable to the search for similarities in the amino acid sequence of two proteins," *J. Mol. Biol.*, vol. 48, pp. 443-453, 1970.
- [36] T. F. Smith and M.S. Waterman, "Identification of common molecular sequence," *J. Mol. Biol.*, vol. 147, pp. 195-197, 1981.
- [37] D. Gautheret, F. Major, and R. Cedergren, "Pattern searching/ alignment with RNA primary and secondary structure: an effective descriptor for Trna," *Comp. Appl. Biosci.*, vol. 6, pp. 325-331, 1990
- [38] J. W. Fickett, "Finding genes by computer: the state of the art," *Trends Genet.*, vol. 12, no. 8, pp. 316-320, 1996.
- [39] S. L. Salzberg, D. B. Searls, and S. Kasif, *Computational Methods in Molecular Biology*. Amsterdam: Elsevier Science, 1998.
- [40] P. Baldi and S. Brunak, *Bioinformatics: the machine learning approach*. Cambridge, MA: MIT Press, 1998.
- [41] P. Chou and G. Fasman, "Prediction of the secondary structure of proteins from their amino acid sequence," *Adv. Enzym.*, vol. 47, pp. 145-148, 1978
- [42] N. M. Luscombe, D. Greenbaum, and M. Gerstein, "What is bioinformatics? A proposed definition and overview of the field," *Methods Informat. Med.*, vol. 40, no. 4, pp. 346-358, 2001.
- [43] J. Quackenbush, "Computational analysis of microarray data," *Nat. Rev. Genetics*, vol. 2, pp. 418-427, 2001.
- [44] J. Sun, W. Y. Song, L. H. Zhu, and R. S. Chen, "Analysis of tRNA gene sequences by neural network", *J. Comput. Biol.*, vol. 2, no. 3, pp. 409-416, 1995.



Los últimos veinte años en el procesamiento de lenguaje natural

SULEMA TORRES RAMOS

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS COMPUTACIONALES,
CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍAS
UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

Introducción

¿Qué es el procesamiento de lenguaje natural?

El procesamiento de lenguaje natural (PLN), también conocido como lingüística computacional, es un campo interdisciplinario que relaciona a las ciencias computacionales y la lingüística; su objetivo principal es dotar a las computadoras con la habilidad de entender el lenguaje humano, más específicamente, la construcción de programas de computadora para procesar palabras y textos en lenguaje natural (español, inglés, ruso, etcétera) [1].

¿Para qué procesar automáticamente textos en lenguaje natural?

La información es el recurso más importante que poseemos los seres humanos. Gran parte de ésta se comunica, almacena y maneja en forma de lenguaje natural. En la actualidad, podemos obtener grandes volúmenes de información en forma escrita, ya sea de manera impresa o electrónica.

Las computadoras son una herramienta indispensable para el procesamiento de la información plasmada en textos, ya que son capaces de manejar grandes volúmenes de datos. Sin embargo, una computadora no puede hacer todo lo que las personas normalmente hacemos con el texto, por ejemplo, responder preguntas basándose en la información proporcionada, o hacer inferencias lógicas sobre su contenido, o elaborar un resumen de esta información.

Por ello, para que una computadora sea una herramienta de ayuda en el procesamiento de información, tiene que entender nuestro lenguaje.

Las computadoras fueron creadas para resolver nuestros problemas y no para crearnos más problemas (como la necesidad de aprender informática). Deben ser nuestros ayudantes naturales, fáciles de usar. Deben aprender nuestro lenguaje y no obligarnos a aprender el suyo. [2]

Aplicaciones de procesamiento de lenguaje natural

El PLN cuenta con un gran número aplicaciones prácticas que se pueden clasificar en cuatro principales grupos: búsqueda de información, presentación de la información, traducción automática e interfaces humano-máquina.

Búsqueda de información

Debido a la gran cantidad de información que se encuentra disponible (generalmente en texto), se vuelve difícil encontrar lo que se necesita, y más aún, que la computadora entienda la necesidad del usuario. Las principales aplicaciones concernientes a esta actividad son: recuperación y extracción de información.

- Recuperación de información. Se define como el proceso de encontrar, en una colección grande de datos (usualmente almacenados en computadoras), material (por lo común documentos) de naturaleza no estructurada (regularmente texto) que satisfaga una necesidad de información [3]. Se trata de decidir el grado de relevancia de un documento o texto, dependiendo de la petición del usuario.

- Extracción de información. Consiste en la obtención de las partes interesantes del texto, para pasarlas a un formato de base de datos, es decir a un formato estructurado [4].

Presentación de la información

Una vez que se ha logrado el acceso a los documentos o textos buscados y se tiene control sobre los datos, es necesario presentar de manera eficientemente la información que contienen. Las principales aplicaciones de este grupo son: generación automática de resúmenes y sistemas de respuesta automática.

- Generación automática de resúmenes. A nivel de documento, se trata de extraer o detectar las ideas más importantes que contiene y presentarlas al usuario en forma de texto corto para que éste usuario pueda leerlo en un tiempo razonable. A nivel de conjunto de documentos, se trata de agrupar y clasificar los documentos de acuerdo a su contenido. Un ejemplo de clasificación de documentos es el enrutamiento de correos de quejas o de ventas enviados a una empresa dependiendo de su contenido.
- Sistemas de respuesta automática. Son sistemas diseñados para tomar una pregunta en lenguaje natural y proporcionar una respuesta. De esta manera los usuarios no tienen que navegar y leer una o varias páginas de resultados de búsqueda para encontrar la información deseada [4].

Traducción automática

La gran cantidad de información disponible se encuentra en diferentes idiomas, lo cual crea una barrera lingüística que dificulta el acceso a la información a muchas personas. Para corregir esta situación, el procesamiento de lenguaje natural aporta las tecnologías de la traducción automática. La traducción automática tiene como objetivo tomar un texto en un idioma y traducirlo a otro idioma sin modificar su sentido.

Interfaces humano-máquina

Las principales aplicaciones en este grupo son: interfaces con bases de datos, sistemas de dictado y sistemas de diálogo.

- Interfaces con bases de datos. El objetivo es poder acceder a la información contenida en una base de datos haciendo consultas sin saber programar, es decir, planteando las preguntas en lenguaje natural.
- Sistemas de dictado. Con estos sistemas se puede dictar a la computadora el texto que el usuario desea escribir sin teclearlo él mismo. Según [2], la miniaturización de los sistemas electrónicos aumentará la importancia de la comunicación por voz, por ejemplo será la única (y muy natural) manera de interactuar con un reloj de pulsera inteligente.
- Sistemas de diálogo. Reciben como entrada frases en lenguaje natural expresadas de forma oral, y generan como salida frases de la misma forma. Estos sistemas implican el uso de diálogos para realizar una tarea; que puede ser muy simple y bien definida, como hacer una reservación de hotel, o una tarea más compleja, que comprenda el razonamiento, como la planificación de unas vacaciones en familia [5].

Historia

De acuerdo con [2], el nombre de lingüística computacional fue inventado en los tiempos cuando eso era: lingüística para las computadoras. Los lingüistas, a través de la introspección e intuición, escribían las reglas y los diccionarios, cada vez más exactos y detallados, acercándose al objetivo: dotar a la computadora con la capacidad de entender el lenguaje humano.

Sin embargo, con la llegada de internet se tuvo acceso a grandes cantidades de información (la gran mayoría en texto), lo cual reorientó el área de la lingüística computacional, convirtiéndola principalmente en una rama del aprendizaje automático.

La Figura 1 muestra algunos eventos que marcaron la evolución de la lingüística computacional (o procesamiento de lenguaje natural), mismos que se describen brevemente a continuación.

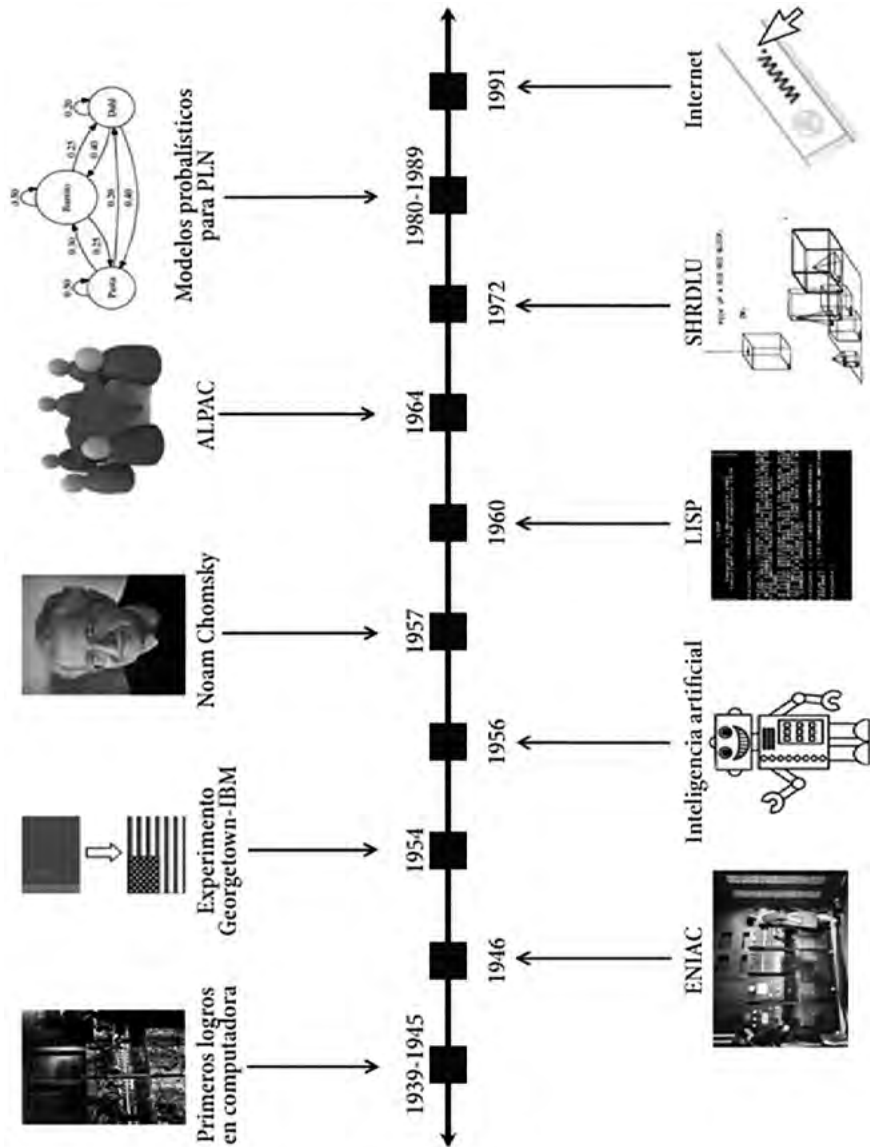


Figura 1. Línea de tiempo del procesamiento de lenguaje natural.

Primeros logros en el diseño de computadoras (1939-1945)

La Segunda Guerra Mundial demandó sofisticados desarrollos informáticos, lo cual desató la necesidad de controlar la mayor cantidad de datos posibles y lograr la automatización de procesos complejos. Con ello, en esta época se desarrollaron los primeros diseños de computadoras.

ENIAC (1946)

John Presper Eckert y John William Mauchly construyen la ENIAC (un acrónimo de *electronic numerical integrator and computer*) en la Universidad de Pennsylvania. Fue la primera computadora electrónica de propósitos generales, fue diseñada inicialmente para calcular la trayectoria de proyectiles [6].

Experimento Georgetown-IBM (1954)

La idea de la traducción automática se introdujo al público general el 7 de enero de 1954. El proyecto era una colaboración entre la Universidad de Georgetown e IBM y consistía en una traducción totalmente automática de más de sesenta oraciones del ruso al inglés. El computador sólo reconocía seis reglas gramaticales y contaba con 250 ítems en su vocabulario. Las oraciones fueron traducidas a un buen nivel de inglés sin intervención humana [7].

Nacimiento de la inteligencia artificial (1956)

En 1956 se llevó a cabo un seminario organizado por John McCarthy donde se estableció el término “inteligencia artificial”. De acuerdo con [8], uno de los problemas de la inteligencia artificial que se trató fue la posibilidad de que una computadora pudiera ser programada para utilizar el lenguaje humano, específicamente el inglés.

Contribución inicial de Chomsky (1957)

El lingüista estadounidense Noam Chomsky revolucionó el campo de la lingüística teórica desarrollando nuevas teorías y herramientas formales enfocadas a describir los lenguajes. En [9] publicó un modelo

generativo del lenguaje que posteriormente se conoció como gramáticas generativas-transformacionales. Esto generó el interés de muchos investigadores del procesamiento de lenguaje natural dado que era un modelo formal del lenguaje que teóricamente facilitaba su implementación computacional [8].

LISP (1960)

El lenguaje de programación de alto nivel LISP (*list processing*) fue introducido por John McCarthy [10]. Muchos sistemas de procesamiento de lenguaje natural han sido escritos en LISP [11].

ALPAC (1964)

En 1964 el gobierno de los Estados Unidos establece ALPAC (Automatic Language Processing Advisory Committee), un comité formado de siete científicos dirigidos por John R. Pierce, con el fin de evaluar el progreso de la lingüística computacional, en general; y específicamente, la traducción automática [12].

SHRDLU (1972)

Desarrollado por Terry Winograd en el MIT [13], fue el primer programa de computadora que llevó la noción de procesamiento de información semántica a otro nivel, permitiendo al usuario interactuar mediante frases simples en inglés. El usuario debía dar instrucciones a SHRDLU para mover los objetos de su entorno.

La cobertura lingüística de SHRDLU era muy amplia en comparación con programas anteriores. Era capaz de manejar, por ejemplo, cuantificación, algunos tipos de pronombres y negación. Era capaz de aprender definiciones de palabras, generar un diálogo similar al natural y contestar preguntas sobre la historia de su conversación y su plan de ejecución [11].

Modelos probabilísticos (1980-1989)

Aparecen nuevas gramáticas orientadas a un tratamiento computacional y se presenta un aumento en el uso de los modelos probabilísticos, princi-

palmente en las tecnologías del habla, el etiquetado gramatical, el análisis sintáctico y la semántica [8].

World Wide Web (1991)

Con la llegada de internet se tuvo acceso a grandes cantidades de información (la gran mayoría en texto). La lingüística computacional, en lugar de conducirse por introspección e intuición, se convirtió en el estudio estadístico directo de los datos disponibles.

Los últimos veinte años

El PLN se ha transformado en una rama del aprendizaje automático, orientándose hacia un enfoque estadístico. De acuerdo con [8], esta situación ha sido propiciada por la necesidad de contar con aplicaciones prácticas que generen resultados a corto plazo. En este sentido, los avances de los últimos 20 años se ven reflejados en las aplicaciones prácticas que se describen a continuación.

Recuperación de información

Los motores de búsqueda *web* surgen después de 1993 debido al crecimiento de los sitios web. Con el nacimiento de los motores de búsqueda como Yahoo (1994) y Google (1996) se tuvo un crecimiento notable en la recuperación de documentos relevantes.

Sin embargo se comenzó a reconocer que diferentes usuarios con diferentes necesidades de información podían buscarla utilizando la misma consulta [14]. Por ello, a finales de los noventa se hizo un esfuerzo no sólo por recuperar documentos relevantes sino también por medir el grado de relevancia dependiendo de la petición del usuario; tarea que sigue siendo desarrollada.

Actualmente, la recuperación de información evoluciona a medida que lo hace la computación. El ejemplo más reciente es el rápido crecimiento de los dispositivos móviles y redes sociales. En esta parte, la recuperación de información ha desarrollado la búsqueda social, enfocada en la búsqueda que involucra a comunidades de usuarios y el intercambio de información informal [15].

Extracción de información

La investigación sobre extracción de información fue impulsada por las competencias resultantes de las Message Understanding Conferences, que tuvieron lugar desde 1987 hasta 1998. En ellas se ofrecieron inicialmente tareas de referencia para el reconocimiento de eventos, y más tarde para otras líneas, como el reconocimiento de relaciones, por ejemplo. El contenido de estas tareas se trasladó desde dominios militares hacia artículos periodísticos de las áreas de negocios y tecnología. Las competencias desencadenaron el desarrollo de varios sistemas bien conocidos en esta rama [16].

Generación automática de resúmenes

Alrededor de 1997 renace el interés por la generación automática de resúmenes, surgiendo diferentes conferencias y competencias al respecto, como: ACL Workshop, AAAI Spring Symposium y SUMMAC: a TREC-like TIPSTER-Funded Summarization Evaluation Conference.

Recientemente se ha dedicado mucho esfuerzo a estas tecnologías, sin embargo los resultados obtenidos hasta ahora son modestos, aunque cada vez mejores [2].

Sistemas de respuesta automática

Gran parte de este trabajo se inició en 1999 con la tarea de *question answering*²⁴ de la competencia Text Retrieval Conference (TREC)[17], que tenía como objetivo encontrar respuestas simples, en el texto, a un número limitado de preguntas (tales como quién y cuándo).

En años más recientes se han estado desarrollando técnicas que proporcionan respuestas más específicas para preguntas más detalladas. El éxito de aplicaciones como Siri de Apple, Watson de IBM y Yahoo! Respuestas es en parte debido a estas tecnologías [15].

²⁴ Término en inglés para referirse a respuesta automática.

Traducción automática

A principios de los años noventa hubo un crecimiento significativo en el uso de estas tecnologías, principalmente en agencias comerciales, servicios de gobierno y empresas multinacionales, donde se produjeron traducciones a gran escala, sobre todo en documentación técnica [18].

La traducción automática en la *web* comienza en 1996, ofreciendo traducción gratuita de textos pequeños.

La calidad de la traducción automática ha mejorado significativamente en la última década. El traductor de Google (puesto a disposición en 2006) permite traducir un texto de un idioma a otro sin ayuda externa, y aunque la calidad del texto producido tiene sus deficiencias, resulta de gran utilidad.

Conclusión

El procesamiento de lenguaje natural es la ciencia que se encarga de habilitar a las computadoras para entender el lenguaje humano.

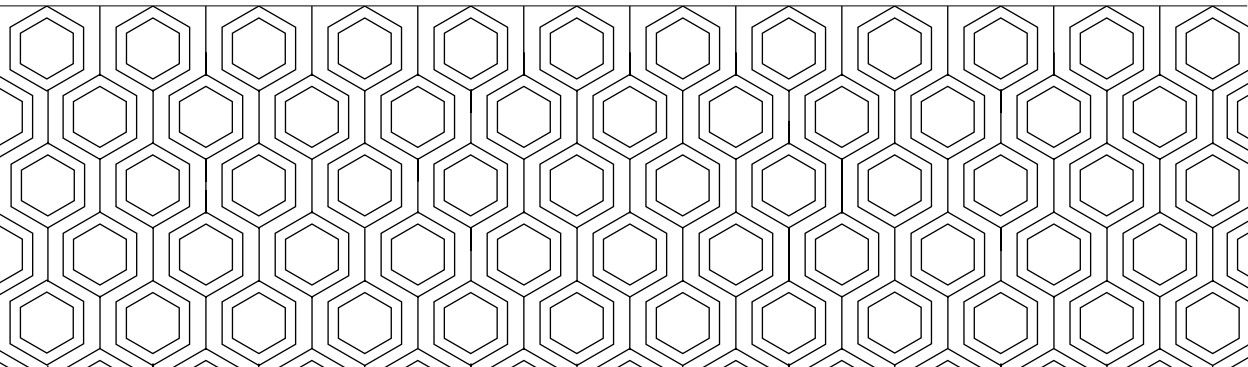
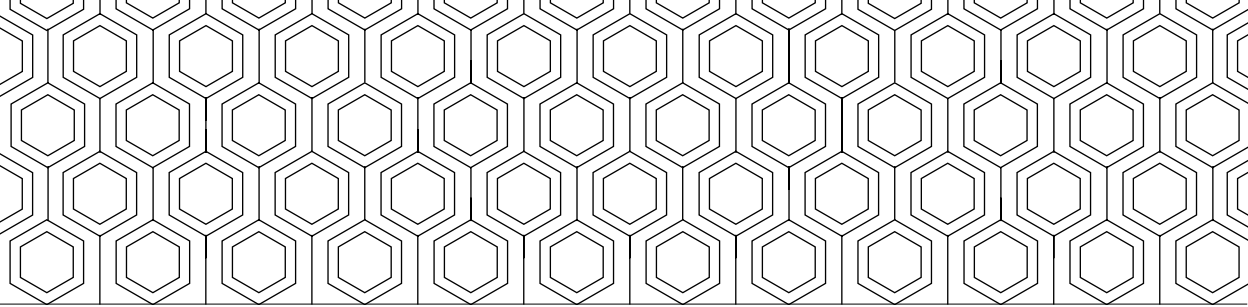
Los lingüistas escribían reglas, diccionarios y otros recursos, dotando a la computadora del conocimiento necesario para alcanzar el objetivo. Posteriormente, esta ciencia evolucionó en el aprendizaje automático de los datos disponibles, orientándose hacia un enfoque estadístico.

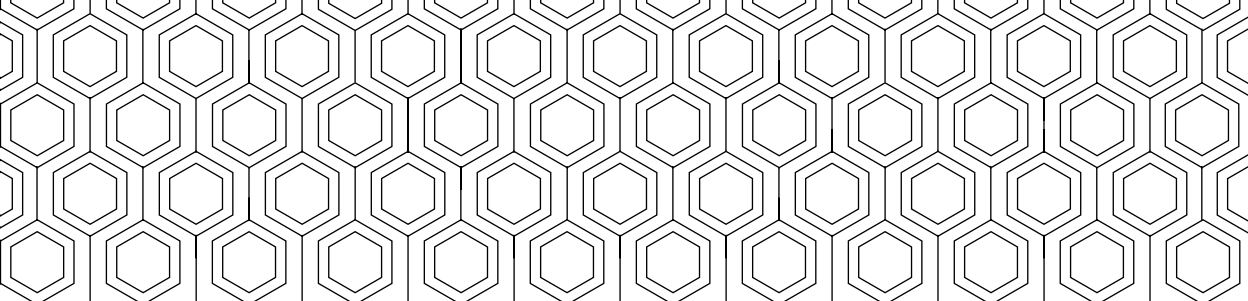
Sin embargo, una gran parte de la comunidad de PLN está de acuerdo en que el enfoque más apropiado es la combinación de estrategias de diferentes disciplinas orientadas a convertir a las computadoras en verdaderos ayudantes que entiendan nuestro lenguaje.

Referencias

- [1] I. A. Bolshakov y A. Gelbukh, *Computational Linguistics: Models, Resources, Applications*. México: IPN/UNAM/Fondo de Cultura Económica, 2004
- [2] A. Gelbukh. “Procesamiento de lenguaje natural y sus aplicaciones,” *Komputer Sapiens*, año II, vol. I, pp. 6-11, enero-junio de 2010.
- [3] C. D. Manning, P. Raghavan, and H. Schütze, *Introduction to Information Retrieval*. Cambridge University Press, 2008.

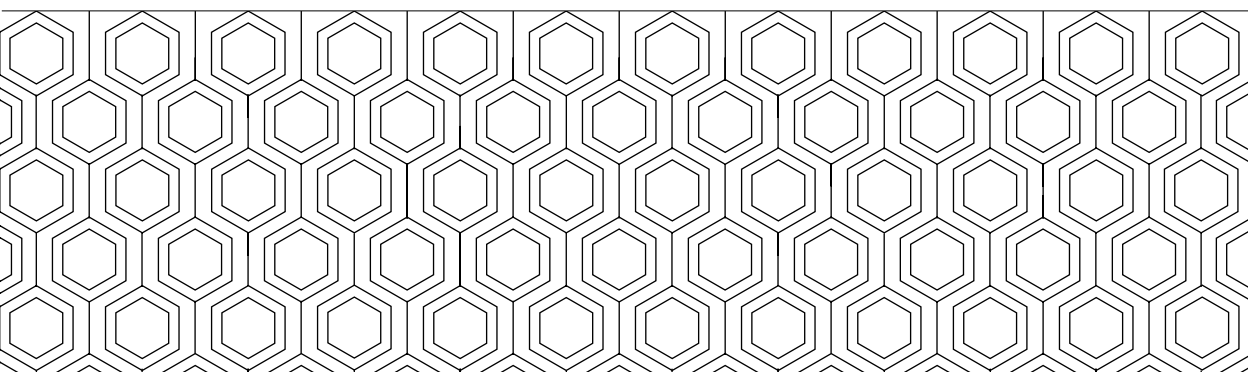
- [4] M. Hernández y J. Gómez, “Aplicaciones de procesamiento de lenguaje natural,” *Revista Politécnica*, vol. 32, no. 1, pp. 87-96, julio de 2013.
- [5] K. Jokinen y M. McTear, “Spoken Dialogue Systems,” *Synthesis Lectures on Human Language Technologies* 2, no. 1, 2009.
- [6] A. W. Burks y A. R. Burks, “The ENIAC: first general purpose electronic computer,” *IEEE Annals of the History of Computing*, vol. 3, no. 4, pp. 310-399, 1981.
- [7] J. Hutchins, “From first conception to first demonstration: the nascent years of machine translation, 1947-1954. A chronology,” *Machine Translation*, vol. 12, no. 3, pp. 195-252, 1997.
- [8] C. Pascual, “En defensa del procesamiento del lenguaje natural fundamentado en la lingüística teórica,” *Onomázein*, vol. 2, no. 26, pp. 13-48, 2012.
- [9] N. Chomsky, *Syntactic Structures*. The Hague: Mouton, 1957.
- [10] J. McCarthy, “Recursive functions of symbolic expressions and their computation by machine, Part I,” *Communications of the ACM*, vol. 3, no. 4, pp. 184-195, 1960.
- [11] W. G. Lehnert and M. H. Ringle, *Strategies for Natural Language Processing*. Psychology Press, 2014.
- [12] J. Hutchins, “ALPAC: the (in) famous report,” *Readings in machine translation*, vol. 14, pp. 131-135, 2003.
- [13] T. Winograd, “Understanding natural language,” *Cognitive psychology*, vol. 3, no. 1, pp. 1-191, 1972.
- [14] J. Verhoeff, W. Goffman, and J. Belzer, “Inefficiency of the use of Boolean functions for information retrieval systems,” *Communications of the ACM*, vol. 4, no. 12, pp. 557-558, 1961.
- [15] M. Sanderson y B. Croft, “The history of information retrieval research,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. Special Centennial Issue, pp. 1444-1451, 2012.
- [16] C. Schmidt, “Information extraction,” presented at Seminar in Artificial Intelligence-Natural Language and AI, Viena, Austria, 2013.
- [17] E. M. Voorhees, “The TREC question answering track,” *Natural Language Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 361-378, 2001.
- [18] J. Hutchins, “Machine translation over fifty years,” *Histoire épistémologie langage*, vol. 23, no. 1, pp. 7-31, 2001.

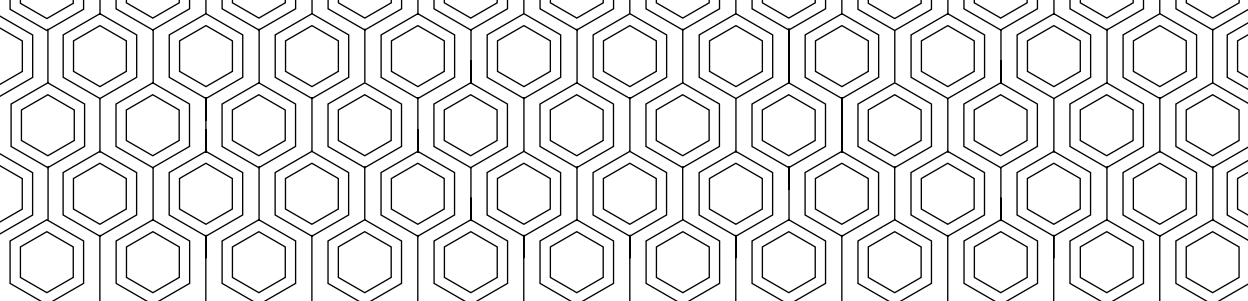




Capítulo IV.

Bioingeniería





La terapia celular en los últimos veinte años

SILVIA MORA LEE

LABORATORIO DE TERAPIA CELULAR E INNOVACIÓN BIOTECNOLÓGICA,
CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍAS,
UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

PAOLA BEATRIZ CASTRO GARCÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS COMPUTACIONALES,
CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍAS,
UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

Se entiende como terapia celular el tratamiento de una patología mediante el trasplante de células vivas administradas ya sea de forma directa en un órgano o un tejido, o de manera sistémica, en un organismo con el fin de reparar un tejido o restaurar funciones perdidas o defectuosas.

El uso de dicha terapia es antiguo, a lo largo de la historia se han utilizado múltiples tipos celulares con la finalidad de intentar curar alguna patología; pero actualmente la terapia celular se limita al uso de terapias avanzadas con células madre, debido a la capacidad que éstas tienen de diferenciarse en células específicas requeridas para la reparación de los tejidos o las células dañadas o defectuosas.

En estos últimos años ha surgido un gran interés en la investigación con células madre, lo que ha mejorado su utilidad. Con anterioridad se consideraba a la terapia celular como una terapia de sustitución celular para

reemplazar tejido u órganos dañados, sin embargo, se ha demostrado que el trasplante celular tiene efectos beneficiosos en la evolución de diferentes patologías; se ha postulado que las células madre trasplantadas pueden actuar como bombas secretoras de diferentes factores de crecimiento y de citocinas que modulan los daños patológicos, aunque no se conocen con certeza los mecanismos de acción, lo que deja abierta la puerta a continuar realizando tareas de investigando.

Células madre

Las células madre se pueden definir como; células inmaduras indiferenciadas con capacidad indefinida de renovarse y dejar su estado indiferenciado inicial para convertirse en células de diferentes linajes celulares. Esto es posible porque se dividen simétricamente y/o asimétricamente, es decir, cada célula madre da como resultado dos células hijas, una de ellas conserva su potencial de diferenciación y autorrenovación, mientras que la otra célula muda hacia un linaje celular maduro y definido, o ambas mantienen sus características iniciales.

Son capaces de renovarse a sí mismas y producen células maduras con características y funciones específicas, se diferencian por su respuesta a ciertos estímulos fisiológicos.

Se clasifican de diferentes maneras de acuerdo a las características ya mencionadas. Las dos clasificaciones más utilizadas toman en cuenta su capacidad de diferenciación y el estadio de su fuente de origen.

Clasificación de células madre por capacidad de diferenciación

Totipotentes

Aparecen en las primeras etapas de desarrollo del embrión, antes de la formación del blastocito. Son capaces de formar un organismo completo, tanto tejido intra- como extraembrionario (placenta y cordón umbilical). Éstas son los cigotos.

Pluripotentes

Son aquéllas capaces de dar lugar a todos los tejidos que forman al embrión, pero no al tejido extraembrionario. Se les conoce mejor como células madre embrionarias.

Multipotentes

Son parcialmente especializadas, capaces de generar los tipos celulares del tejido de donde provienen, o de otros tejidos con similitud embriogénica pero nunca un individuo completo, dependiendo del grado de multipotencia de las mismas.

Unipotentes

Sólo se diferencian en un único tipo celular, se encuentran en los diferentes tejidos del cuerpo y su función es la de actuar como reservorios de células en los tejidos. Mejor conocidas como progenitores celulares.



Figura 1. Células madre totipotentes, pluripotentes y multipotentes.

Clasificación de células madre por estadio de fuente de origen

Células madre embrionarias

Son células obtenidas de la masa interna del blastocisto, tienen capacidad **puripotencial** de diferenciación, pueden generar todos los tipos embrionarios celulares. Sin embargo además de los aspectos éticos y legales que su utilización conlleva presentar limitaciones importantes, tales como la falta de diferenciación dirigida, la tumorigenicidad y la inmunogenicidad.

Con la finalidad de evitar la formación de teratomas postrasplante de células embrionarias, la mayoría de los estudios han utilizado células pre-diferenciadas de los distintos tipos celulares por estudiar.

Existen diferentes resultados de la utilización de estas células, tanto en modelos animales como en estudios clínicos, sin embargo el trasplante de estas células no tiene buena perspectiva a futuro, ya que aún no se ha comprobado la integración de estas células con el tejido hospedero, al margen de la controversia con respecto a su seguridad tumorigénica.

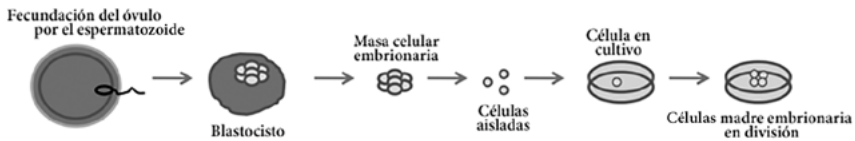


Figura2. Cultivo de células embrionarias.

Células madre adultas

Las células madre adultas son células indiferenciadas presentes en órganos y tejidos de individuos adultos que son capaces de convertirse en células diferenciadas del tejido donde proceden. De este modo, actúan como reservorios naturales celulares durante la vida, actuando cuando se produce un daño en el tejido.

Las células madre procedentes de tejidos adultos tienen grandes ventajas sobre las células madre embrionarias a nivel práctico, como son: su fácil obtención, y el hecho de que su uso no presenta problemas éticos ni rechazo inmunológico, lo que permite terapias autólogas.

Estas células se encuentran en la mayoría de los tejidos, incluyendo la médula ósea, hueso trabecular, músculo, tejido adiposo, sangre periférica, tracto gastrointestinal, sistema nervioso central, pulmón, dermis, folículo piloso, limbo corneal, etc. En la mayoría de los casos, las células madre de tejidos adultos son capaces de diferenciarse en linajes del tejido procedente, tales como las células madre del sistema nervioso central, que generan neuronas, astrocitos y oligodendrocitos. Algunas células madre son unipotentes, como las de la capa basal de la epidermis interfolicular, que producen queratinocitos, o algunas células hepáticas, que pueden tener la función de repoblación a largo plazo.

Algunas de las células madre adultas más estudiadas son las siguientes:

Células Madre Mesenquimales:

Uno de los tipos celulares más estudiados y utilizados en la terapia celular son las células madre mesenquimales (MSC). Son células no hematopoyéticas, originalmente procedentes de tejido de médula ósea, aunque actualmente existen varias fuentes de ellas, como la sangre de cordón umbilical y el tejido adiposo. El tejido adiposo es la fuente que más potencial terapéutico presenta, ya que de él se pueden obtener mayores cantidades de células mesenquimales en comparación con la médula ósea, además se obtienen de un tejido de desecho mediante liposucción del donador, procedimiento menos riesgoso que el de una extracción medular. Algunos investigadores describen estas células como una población totalmente diferente, las cuales se denominan células madre de tejido adiposo (ADSC), y parecen tener menos rechazo inmunogénico y mayor compatibilidad entre donador y trasplantado, lo que las hace potencialmente más utilizables.

Cohnheim fue el primer científico que sugirió la presencia de MSC en el tejido de la médula ósea, después de observar la cicatrización de una herida en estudios experimentales de conejos. Este patólogo alemán hizo una herida en una extremidad del animal, al que le inyectó colorante de anilina junto con células obtenidas de la médula ósea, y después de un tiempo encontró células teñidas en el sitio de la herida, con lo que concluyó que las células fibroblásticas teñidas se derivaban de la médula ósea y se transferían al sitio de la herida a través del sistema circulatorio.

Muchos años después de este reporte, mediante diversas investigaciones los científicos demostraron que la médula ósea es capaz de producir cartílago y tejido óseo, pero no fueron capaces de determinar las células responsables de esta cualidad.

Friedenstein y colaboradores fueron los primeros en aislar y describir una población de fibroblastos procedentes de la médula ósea, los cuales presentaban propiedades condrogénicas y osteogénicas. Se refirieron a estas células como unidades formadoras de colonias de fibroblastos. Hasta la actualidad estas células han sido referidas como células estromales de médula ósea, células progenitoras de médula ósea y células madre mesenquimales, siendo esta última nominación de uso más frecuente, sobre todo en las investigaciones publicadas recientemente.

Como cualquier otro tipo de células madre, las MSC poseen dos propiedades importantes: la capacidad de autorrenovación a largo plazo y la capacidad de diferenciarse en distintos linajes celulares, tales como células de hueso, de cartílago y de tejido adiposo.

Existe controversia en cuanto al perfil de expresión de marcadores de superficie de las MSC. De acuerdo con la Sociedad Internacional de Terapia Celular, los marcadores CD70, CD90 y CD105 se consideran marcadores positivos, mientras que el marcador CD34 se considera negativo. En este contexto, algunos científicos creían que los tres marcadores positivos eran coexpresados en diversas células, porque son inespecíficos para la detección de MSC; sin embargo se ha demostrado que el CD34 resulta ser positivo siempre para las MSC derivadas de tejido adiposo.

En cultivo estas células muestran una morfología fibroblástica delgada, son adherentes al plástico, tienen alta capacidad de diferenciación en diversas estirpes celulares. Pittenger demostró que casi una tercera parte de las células en cultivo muestran capacidad de diferenciación osteogénica, condrogénica y adipogénica, mientras que las otras dos terceras partes muestran capacidades de diferenciación en linajes adipogénicos o capacidades bipotenciales osteogénicas o condrogénicas.

Además de diferenciarse en células de hueso, de cartílago y de tejido adiposo, se ha reportado que las MSC poseen capacidades de diferenciación de distintos tipos celulares no mesenquimales, como las neuronas, queratinocitos, los hepatocitos, las células intestinales y las células epiteliales de

riñón. Esta propiedad se conoce como plasticidad o transdiferenciación de las MSC.



Figura 3. Obtención y diferenciación de células madre mesenquimales.

Células madre de cordón umbilical

Estas células madre que en un principio parecían poco confiables, a lo largo de estos años se han convertido en uno de los recursos principales para la terapia celular que utiliza células madre o progenitoras hematopoyéticas, las que pueden reconstituir el sistema hematopoyético en pacientes con trastornos benignos o malignos. Las células de sangre de cordón umbilical, en comparación con otras fuentes de células mesenquimales, poseen una mayor capacidad de proliferación y autorrenovación *in vitro* de células progenitoras.

En la década de los ochenta fue propuesto el primer trasplante con células madre de cordón umbilical como fuente de célula hematopoyéticas, HalBroxmeyer lo sugirió en una reunión privada con Edward A. Boyse y Judith Bard. La viabilidad de esta propuesta fue apoyada por una serie de estudios *in vitro* con sangre del cordón umbilical humano y por estudios *in vivo* con sangre de ratón. Estos estudios fueron publicados en el año 1989, después del primer trasplante de sangre de cordón umbilical humano realizado con éxito en un paciente joven con anemia de Fanconi en 1988.

En los últimos 12 años se ha avanzado en una mayor comprensión de las características biológicas de sangre de cordón umbilical (SCU), en paralelo con sus aplicaciones en la mejora del éxito de los trasplantes clínicos. Bancos de SCU, tanto de donantes sanguíneamente emparentados o no, se han establecido en diferentes países, para su uso tanto en clínica como en investigación. Más de 600,000 unidades de SCU se han almacenado para su uso

en trasplantes a nivel mundial, y aproximadamente unas 30,000 unidades SCU han sido realizados con éxito hasta la fecha [1]. A pesar de que existen 20 millones de donantes voluntarios adultos en el Programa Nacional de Donantes de Médula Ósea, muchos pacientes, especialmente aquéllos de orígenes raciales o étnicos diversos, no tendrán un adecuado emparejamiento en base al sistema de antígenos leucocitarios humanos (HLA por sus siglas en inglés); en consecuencia, un donador voluntario conocido sería el recurso necesario [1]. En Europa, los bancos más grandes estaban en Dusseldorf, Milán, Londres y París. En los Estados Unidos, el Centro de Sangre de Nueva York, bajo la dirección de Pablo Rubinstein, estableció el banco más grande SCU sin relación familiar y reportó el primer grupo más grande de personas con trasplante de SCU sin parentesco.

En cuanto a su procesamiento, la SCU es recogida en el instante que tiene lugar el nacimiento; es recolectada y entregada con seguridad para su almacenamiento y la posterior determinación del número de células progenitoras. El procedimiento de recogida que se practica actualmente, implica una punción venosa relativamente simple, directa del cordón umbilical, seguida por el drenaje por gravedad en una bolsa de sangre llena de anticoagulante estéril estándar, utilizando un sistema cerrado; es similar al procedimiento utilizado en la recogida de la sangre entera. Para su análisis, son separadas alícuotas de la muestra original para exámenes rutinarios. Las unidades son criopreservadas y almacenadas en nitrógeno líquido. Es importante que el proceso de recolección sea lo más adecuado posible, ya que los resultados esperados después de un trasplante con SCU, se correlacionarán con la dosis de células infundidas. Por lo que debe ser tomado en cuenta el umbral de células injertadas, y así obtener un trasplante funcional, reduciendo de manera considerable la incidencia de eventos secundarios relacionados con el mismo. Así también se ha visto que existe una relación con el número de células injertadas y la recuperación de otros tipos celulares que se correlacionan con el éxito del trasplante, como son las poblaciones de plaquetas y neutrófilos. Los límites del umbral empíricamente aceptados actualmente son 1.7×10^5 para el antígeno de superficie CD34⁺ células/kg o 2.5×10^7 de células nucleadas criopreservadas por kg [2]. Desafortunadamente, las células madre/progenitoras provenientes de SCU están intrínsecamente limitadas por la cantidad que se puede recoger a partir de una placenta, eso restringe así también la elección del receptor, ya que conlleva considerar su peso

corporal. Como es evidente, una posterior infusión de células adicionales del mismo donante no puede ser posible, ya que es necesario aplicar toda la unidad primaria de SCU en el primer trasplante.

Aunque hay una abundancia de factores positivos a la utilización de células de SCU como tratamiento en la terapia y la investigación hay aspectos como el que sólo el 50% de las muestras recogidas de la sangre del cordón se puede utilizar realmente en los trasplantes, porque el tamaño de la muestra es demasiado pequeño. Sin embargo, el lado positivo es que cuando se dona una muestra pequeña de SCU, no se descarta, sino que se utiliza en la investigación [3]. Una ventaja en comparación con otras fuentes de células madre para trasplante es la reducción de los estrictos criterios de compatibilidad entre donante y receptor del sistema HLA. [4]

Otro modelo que se conoce para criopreservar células madre de SCU es el de almacenaje por relación familiar, en el que se almacena la SCU en beneficio del donante o de sus familiares. Después de más de una década de experiencia clínica, actualmente se acepta que los trasplantes de SCU alogénicos y autólogos son equivalentes o pueden ser comparados favorablemente con los de células progenitoras de médula ósea, especialmente en niños. Los estudios iniciales de supervivencia a largo plazo en niños con trastornos hematológicos benignos y malignos, que fueron trasplantados con SCU de un hermano donante, presentaron una supervivencia comparable o superior a los niños que recibieron un trasplante de médula ósea.

Los trasplantes con SCU tienen que cumplir una serie de nuevos desafíos. Un ejemplo de ello son los retrasos en la reconstitución del sistema inmune, lo que ha llevado a un aumento de la incidencia en los últimos tiempos de infecciones virales después del trasplante que pueden ser fatales.

Muchos métodos para disminuir el rechazo del injerto contra huésped están bajo investigación, incluyendo un mayor número de donantes para reducir el desajuste HLA. Otras estrategias en los ensayos clínicos son la infusión de las células madre/progenitoras de SCU de forma intraósea, y su expansión *ex vivo* con cocteles de citocinas, modificando los factores para su crecimiento y su mantenimiento *in vivo*. Así como aumentar la investigación en el grado de plasticidad y/o transdiferenciación de la SCU, puesto que se sabe que contiene células madre muy inmaduras, lo que sugiere su gran potencial. Por tanto los bancos de SCU podrían aumentar dramáticamente el alcance de su importancia clínica.

Cuando miramos a través de los años, anticipamos un futuro prometedor en el uso de células madre/progenitoras de SCU, como la posibilidad de una selección digitalizada, su uso en muchas más indicaciones terapéuticas y, sin lugar a duda, un incremento en la mejora de los resultados clínicos.

Células madre pluripotentes inducidas

Durante más de cuatro décadas, los científicos han estado fascinados con la investigación de los mecanismos de transferencia nuclear, que en esencia era el único método para producir células totipotentes y células madre pluripotentes a partir de células somáticas diploides. Hasta ahora que se descubrieron de las células madre pluripotentes inducidas (iPSC), en cuya generación se utilizan factores de transcripción definidos. En comparación con el proceso de transferencia nuclear, la técnica de iPSC se diferencia en el proceso de reprogramación, pero ofrece una simplicidad significativa y permite la generación de células madre pluripotentes específicas del paciente, con lo cual desaparecen las preocupaciones éticas que suscita este tipo de terapia.

Fueron establecidas por primera vez por Takahashi y Yamanaka en 2006, y se ha hecho un progreso continuo en los métodos para producirlas durante los últimos años. Uno de los principales temas que ha abarcado su uso en terapia celular es que las iPSC han demostrado compartir un perfil molecular muy similar con las células madre embrionarias, y esto es aún más importante por ser funcionalmente idénticas; por tanto, la reprogramación de células somáticas con características embrionarias, sin necesidad de utilizar embriones humanos, tiene grandes aplicaciones terapéuticas en medicina regenerativa. Sin embargo amplios ensayos de diferenciación tanto *in vitro* como *in vivo* han sido generados para determinar perfiles del transcriptoma y perfiles de epigenoma, donde se ha visto que existen patrones moleculares distintos y/o genes específicos que distinguen a las iPSC de las células madre embrionarias.

Inicialmente, las iPSC se generaron a partir de fibroblastos de ratón, mediante la introducción retroviral de los factores de transcripción Oct4, Sox2, c-Myc y Klf4 [5]. La acción elemental de estos cuatro factores de transcripción se describió como la reprogramación de células somáticas; fue el caso de fibroblastos presentando características pluripotentes como células

madre embrionarias, a través de múltiples eventos epigenéticos estocásticos (por ejemplo, el silenciamiento de genes somáticos y genes retrovirales que supuestamente activan Dnmt3a y 3b, y la activación de diversos genes.

La técnica convencional para la integración de factores de reprogramación se basa en virus, lo que resulta como una integración permanente de oncogenes al genoma (por ejemplo: c-Myc y Klf4, con un alto potencial de alteraciones genómicas perjudiciales); por lo que varios métodos han ido surgiendo para disminuir este problema (por ejemplo, el uso de plásmidos de transfección transitoria, o adenovirus de no integración, o vectores episomales). Sin embargo todavía existe el riesgo de inserción de partes de los transgenes en el genoma de la célula diana.

Muchos procesos que se llevaron a cabo para lograr una mejora en la inducción de células somáticas a iPSC. En julio del 2007, Nanog y Oct4 fueron determinados como cruciales para el mantenimiento del estado indiferenciado de células madre embrionarias, formando bucles autorreguladores endógenos de Oct4/Sox2/Nanog genes. Posteriormente, Nanog-iPSC fueron generados por Okita *et al.* a partir de fibroblastos de ratones transgénicos que contenían la construcción Nanog-GFP-IRES-Puro^r. Los fibroblastos de este ratón transgénico no expresan el gen endógeno Nanog; por lo tanto, son sensibles a la puromicina. Y aunque la construcción dio grandes resultados, no garantizó ser equivalente a células madre embrionarias de ratones. Tanto así que la reactivación del retroviral C-My cincrementó la tumorigenicidad en ratones quimera obtenidos por inyección en el blastocito de Nanog-seleccionados. En enero de 2008, Nakagawa *et al.* Informaron y presentaron un protocolo modificado para la generación de iPSC de ratón que no requería el transgén c-Myc. Es importante destacar que los ratones quiméricos derivados de las iPSC c-Myc-*minus* no desarrollaron tumores durante el periodo de estudio. Además, la omisión del transgén c-Myc dio como resultado el aislamiento eficiente de células iPS sin la selección de medicamentos (por ejemplo, selección Nanog-puromicina). Este hallazgo es ventajoso para la generación de iPSC humanos (hiPSC), debido a que el genoma humano no se acomoda a la proteína fluorescente del gen reportero-IRES-PuroNanog-verde.

Entre abril de 2008 y febrero de 2009, se publicaron tres artículos informando que iPSC ratón podrían ser generadas a partir de células somáticas adultas de diferentes orígenes, incluyendo linfocitos con diferenciación ter-

minal B, células de hígado y estómago, y células madre neurales, aunque era necesaria la combinación de transgenes diferentes, según el origen somático. Por lo tanto, el estado epigenético de las células somáticas afectó la eficacia de su reprogramación en iPSC.

En noviembre de 2007, dos grupos informaron de forma independiente la generación de iPSC a partir de células somáticas adultas mediante un método retroviral/lentiviral, mediada por la transferencia de genes que utiliza una combinación de Oct4, Sox2, c-Myc y Klf42, o Oct4, Sox2, Nanog y Lin28. Estos informes generaron enorme interés en la investigación de iPSC para aplicaciones de terapia celular en la medicina regenerativa humana, así como en modelos de enfermedades humanas[6].

La eficiencia en la reprogramación de distintos tipos celulares dependerá también de la etapa en el desarrollo de la célula. De hecho, muchos tipos de células somáticas (especialmente ciertas células madre de tejido específico o células progenitoras) expresan de forma endógena uno o más de los cuatro factores de reprogramación (por ejemplo, cMyc, Klf4 y Sox2) en diferentes niveles, y se demostró que tal expresión endógena de estos factores de reprogramación es suficiente para sustituir su sobreexpresión e inducir la reprogramación. Es así que una célula en estado temprano de desarrollo será más fácil de reprogramar que las células mayores; por ejemplo, las células fetales y neonatales respecto de las células adultas o células senescentes.

Si bien, los avances en la mejora de los procesos de generación de iPSC han sido significativos, aún nos encontramos en el inicio del verdadero potencial que éstas tendrán en el futuro. La atención se centrará en los reforzar los conocimientos en seguridad, mecanismos de reprogramación, el estudio de nuevos factores que modulen su reprogramación y que garanticen la eficiencia en su aplicación en la terapia, basándose en los procesos de señalización y estudios epigenéticos. Así como estudiar su capacidad de diferenciación tanto *in vitro* como *in vivo* y los riesgos de tumorigenicidad. Los estudios que continúan deberán requerir trasplante de estas células en animales inmunodeficientes, con la subsiguiente observación a largo plazo.

Aportes más importantes en la terapia celular en los últimos veinte años

El gran interés que ha suscitado la terapia celular ha motivado importantes investigaciones y avances en estos últimos años. Desde el reporte de nuevas células, la diferenciación y nuevas aplicaciones de las ya descritas en años anteriores, así como de las recién reportadas. Estas investigaciones han sido tan relevantes que el mundo científico se ha interesado en ellas apreciando su importancia como nuevas aportaciones científicas, lo que ha llevado a adjudicar un premio Nobel a investigaciones de este tipo. Pero a pesar de que en estos últimos años se han reportado múltiples avances, aún quedan muchas incógnitas que responder referentes a terapia celular, lo que implica muchos años más de investigaciones con estas terapias y su combinación con otras biotecnologías.

Entre las aportaciones más relevantes se pueden mencionar las siguientes:

- 1994. Se describe por primera vez la existencia de células madre en la mayoría de los tipos de cáncer. [7]
Se trasplantan con éxito células de limbo corneal en pacientes con daño corneal [8].
- 1995. Se aprueba la enmienda Dickey-Wicker en Estados Unidos, que prohíbe el uso de fondos federales para la investigación que implica la destrucción de embriones humanos [9].
- 1996. Se logra la primera clonación de un mamífero a partir de una célula adulta [10,11].
- 1997. Se describen los primeros indicios de la existencia de células madre cancerosas. Bonnet y Dick publicaron que aislaron una subpoblación de células leucémicas que expresan marcadores CD34+/CD38-, la cual es capaz de dar lugar a tumores [12].
- 1998. James Thompson establece las primeras líneas celulares embrionarias de humano [13].
- 1999. Se producen los primeros descubrimientos para poder diferenciar células madre de diferentes linajes celulares [14].
- 2000. Se comprueba por primera vez la plasticidad de las células madre mesenquimales [15].
- 2001. Se identifican por primera vez células madre de la dermis de la piel de mamíferos [16].

- 2002. Zuk y colaboradores describen por primera vez las células madre procedentes de tejido adiposo (ADSC) [17].
- 2003. El doctor. Songtao Shi, del NHI, descubre nuevas células madre encontrados en los dientes primarios [18].
- 2004. Se obtienen por diferenciación de células madre embrionarias las primeras células dopaminérgicas, objetivo de terapia para la enfermedad de Parkinson [19].
Hwang Hoo Suk anuncia falsamente la creación de células madre embrionarias a partir de oocitos no fertilizados [20].
- 2005. Ernest McCulloch y James Till, importantes investigadores, ganan el premio Albert Lasker de investigación médica básica por describir por primera vez las células madre [21].
- 2006. Shinya Yamanaka describe que al introducir cuatro factores de transcripción específicos podía convertir células adultas en células madre pluripotentes [22].
- 2007. El premio Nobel de Fisiología fue otorgado conjuntamente a Mario R. Capecchi, Sir Martin J. Evans y Oliver Smithies, por sus investigaciones para introducir modificaciones genéticas específicas en ratones mediante el uso de células embrionarias [23].
- 2008. Se otorga el premio Gairdner a Sam Weiss por su descubrimiento en 1992 de las células madre neurales [24].
- 2009. John Gurdon y Shinya Yamanaka son galardonados con el premio Lasker por sus descubrimientos en la reprogramación nuclear, proceso que hace que células adultas especializadas puedan formar células madre pluripotentes. Ese mismo año, Yamanaka también recibe el premio Gairdner [25].
El presidente Barack Obama autoriza de nuevo el financiamiento de investigaciones con células madre embrionarias mediante el fondo federal, lo que permite que Estados Unidos se reencamine a las investigaciones en dicho tema.
- 2010. Se comprueba la reprogramación de las células madre pluripotentes inducidas iPSC a linaje neural [26].
Se generan iPSC a partir de la reprogramación eficiente de células de médula ósea [27].
- 2011. Investigadores de la Universidad de Minnesota reportan la descelurización de un corazón cadavérico humano y su repoblación con

células madre adultas. Crean así el primer corazón bioartificial basado en células madre [28].

- 2012. Se otorga el premio Nobel de Medicina a John Gurdon y Shinya Yamanaka por el descubrimiento de las ipsc.
- 2013. Se reporta el descubrimiento de una población diferente de células madre procedentes de tejido humano de senos sanos, llamadas células madre pruripotentes endógenas (epsc), que han podido ser reprogramadas como células cardíacas [29].

El Doctor Gregorio Chaenbalk reporta el descubrimiento de las células Muse-AT, células madre pluripotentes presentes en el tejido adiposo, las cuales no forman teratomas, ya se han podido diferenciar como adipocitos, células neurales y hepatocitos [30].

- 2014. Se reporta el efecto beneficioso de las iPSC humanas provenientes de precursores neurales en la reparación de daños en la médula espinal [31].

Referencias

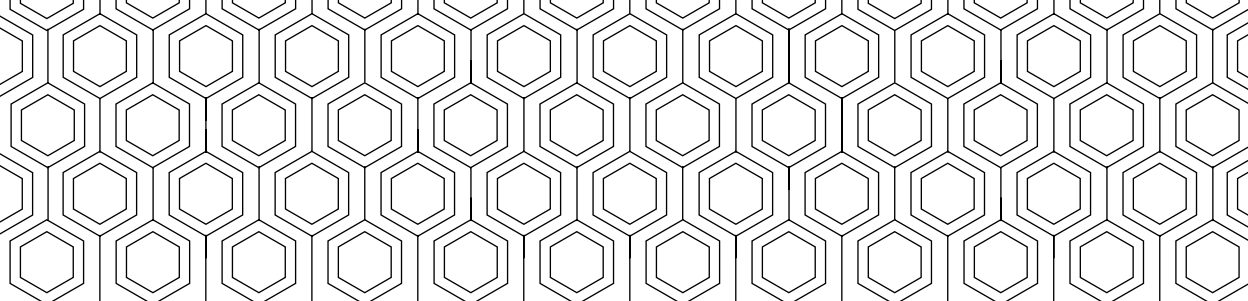
- [1] K. K. Ballen, E. Gluckman, and H. E. Broxmeyer, "Umbilical cord blood transplantation: the first 25 years and beyond," *Blood*, no. 122, pp. 491-8, 2013.
- [2] J. E. Wagner, J. N. Barker, T. E. DeFor, K. S. Baker, B. R. Blazar, C. Eide, A. Goldman, J. Kersey, W. Krivit, M. L. MacMillan, P. J. Orchard, C. Peters, D. J. Weisdorf, N. K. Ramsay, and S. M. Davies, "Transplantation of unrelated donor umbilical cord blood in 102 patients with malignant and nonmalignant diseases: influence of CD34 cell dose and HLA disparity on treatment-related mortality and survival," *Blood*, no. 100, pp. 1611-1618, 2002.
- [3] Program NMD. Cord Blood Donation: Frequently Asked Questions. [Online.] Available: http://marrow.org/Get_Involved/Donate_Cord_Blood/Cord_Blood_FAQs.aspx.
- [4] J. Kanda, L. Kaynar, Y. Kanda, V. K. Prasad, S. H. Parikh, L. Lan, T. Shen, D. A. Rizzieri, G. D. Long, K. M. Sullivan, C. Gasparetto, J. P. Chute, A. Morris, S. Winkel, J. McPherson, J. Kurtzberg, N. J. Chao, and M. E. Horwitz, "Pre-engraftment syndrome after myeloablative dual umbilical cord blood transplantation: risk factors and response to treatment," *Bone Marrow Transplant*, no. 48, pp. 926-931, 2013.

- [5] H. Okano, M. Nakamura, K. Yoshida, Y. Okada, O. Tsuji, S. Nori, E. Ikeda, S. Yamanaka, and K. Miura, "Steps toward safe cell therapy using induced pluripotent stem cells," *Circ Res*, no. 112, pp. 523-33, 2013.
- [6] H. Zhou and S. Ding, "Evolution of induced pluripotent stem cell technology," *Curr Opin Hematol*, no. 17, pp. 276-80, 2010.
- [7] K. R. Trott, "Tumour stem cells: the biological concept and its application in cancer treatment," *Radiother Oncol*, no. 30, pp. 1-5, 1994.
- [8] R. J. Tsai and S. C. Tseng, "Human allograft limbal transplantation for corneal surface reconstruction," *Cornea*, no.13, pp. 389-400, 1994.
- [9] A. A. Kiessling, *The History of the Dickey-Wicker Amendment*. Bedford Stem Cell Research Foundation, August 24, 2010.
- [10] P. G. Shiels, A. J. Kind, K. H. Campbell, D. Waddington, I. Wilmut, A. Colman, and A. E. Schnieke, "Analysis of telomere lengths in cloned sheep," *Nature*, no. 399, pp. 316-317, 1999.
- [11] P. G. Shiels, A. J. Kind, K. H. Campbell, I. Wilmut, D. Waddington, A. Colman, and A. E., "Schnieke. Analysis of telomere length in Dolly, a sheep derived by nuclear transfer," *Cloning*, no. 1, pp. 119-125, 1999.
- [12] D. Bonnet and J. E. Dick, "Human acute myeloid leukemia is organized as a hierarchy that originates from a primitive hematopoietic cell," *Nat Med*, no. 3, pp. 730-737, 1997.
- [13] J. A. Thomson, J. Itskovitz-Eldor, S. S. Shapiro, M. A. Waknitz, J. J. Swiergiel, V. S. Marshall, and J. M. Jones, "Embryonic stem cell lines derived from human blastocysts," *Science*, no. 282, pp.1145-1147, 1998.
- [14] T. Burdon, I. Chambers, C. Stracey, H. Niwa, and A. Smith, "Signaling mechanisms regulating self-renewal and differentiation of pluripotent embryonic stem cells," *Cells Tissues Organs*, no.165, pp. 131-43, 1999.
- [15] J. Sanchez-Ramos, S. Song, F. Cardozo-Pelaez, C. Hazzi, T. Stedeford, A. Willing, T. B. Freeman, S. Saporta, W. Janssen, N. Patel, D. R. Cooper, and P. R. Sanberg, "Adult bone marrow stromal cells differentiate into neural cells in vitro," *Exp Neurol*, no.164, pp. 247-256, 2000.
- [16] J. G. Toma, M. Akhavan, K. J. Fernandes, F. Barnabe-Heider, A. Sadikot, D. R. Kaplan, and FD Miller, "Isolation of multipotent adult stem cells from the dermis of mammalian skin," *Nat Cell Biol*, no. 3, pp. 778-784, 2001.
- [17] C. E. Mendoza, K. B. Augustinsson, and B. Axenfors, "Some properties of isolated pig plasma esterases sensitive to 3,5-di-t-butylphenyl methylcarbamate (butacarb)," *Biochem Pharmacol*, no. 25, pp. 701-70, 1976.

- [18] S. Shi and S. Gronthos, "Perivascular niche of postnatal mesenchymal stem cells in human bone marrow and dental pulp," *J Bone Miner Res*, no. 18, pp. 696-704, 2003.
- [19] Y. Zhang, Y. Adachi, Y. Suzuki, K. Minamino, M. Iwasaki, H. Hisha, C. Y. Song, K. Kusafuka, K. Nakano, Y. Koike, J. Wang, E. Koh, Y. Cui, C. Li, and S. Ikehara, "Simultaneous injection of bone marrow cells and stromal cells into bone marrow accelerates hematopoiesis in vivo," *Stem Cells*, no. 22, pp. 1256-1262, 2004.
- [20] W. S. Hwang, Y. J. Ryu, J. H. Park, E. S. Park, E. G. Lee, J. M. Koo, H. Y. Jeon, B. C. Lee, S. K. Kang, S. J. Kim, C. Ahn, J. H. Hwang, K. Y. Park, J. B. Cibelli, and S. Y. Moon, "Evidence of a pluripotent human embryonic stem cell line derived from a cloned blastocyst," *Science*, no. 303, pp. 1669-1674.
- [21] http://www.laskerfoundation.org/awards/2005_b_description.htm
http://www.laskerfoundation.org/awards/2005_b_description.htm
- [22] K. Takahashi and S. Yamanaka, "Induction of pluripotent stem cells from mouse embryonic and adult fibroblast cultures by defined factors," *Cell*, no. 126, pp. 663-676, 2006.
- [23] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/2007/index.html.
- [24] <http://stemcellfoundation.ca/en/scientist/sam-weiss/>.
- [25] <http://www.laskerfoundation.org/awards/2009basic.htm>.
- [26] C. Tian, R. J. Ambroz, L. Sun, Y. Wang, K. Ma, Q. Chen, B. Zhu, and J. C. Zheng, "Direct conversion of dermal fibroblasts into neural progenitor cells by a novel cocktail of defined factors," *Curr Mol Med*, no. 12, pp. 126-137, 2012.
- [27] A. Kunisato, M. Wakatsuki, Y. Kodama, H. Shinba, I. Ishida, and K. Nagao, "Generation of induced pluripotent stem cells by efficient reprogramming of adult bone marrow cells," *Stem Cells Dev*, no. 19, pp. 229-238, 2010.
- [28] S. F. Badylak, D. Taylor, and K. Uygun, "Whole-organ tissue engineering: decellularization and recellularization of three-dimensional matrix scaffolds," *Annu Rev Biomed Eng*, no. 13, pp. 27-53, 2011.
- [29] S. Roy, P. Gascard, N. Dumont, J. Zhao, D. Pan, S. Petrie, M. Margeta, and T. D. Tlsty, "Rare somatic cells from human breast tissue exhibit extensive lineage plasticity," *Proc Natl Acad Sci, USA*, no. 110, pp. 4598-603, 2013.
- [30] S. Heneidi, A. A. Simerman, E. Keller, P. Singh, X. Li, D. A. Dumesic, and G. Chazenbalk, "Awakened by cellular stress: isolation and characterization

of a novel population of pluripotent stem cells derived from human adipose tissue,” *PLoS One*, no. 8, p. e64752.

- [31] N. Romanyuk, T. Amemori, K. Turnovcova, P. Prochazka, B. Onteniente, E. Sykova, and P. Jendelova, “Beneficial effect of human induced pluripotent stem cell-derived neural precursors in spinal cord injury repair,” *Cell Transplant.*, 2014.



La biología sintética en los últimos veinte años

JOSÉ ALEJANDRO MORALES VALENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS COMPUTACIONALES,
CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍAS,
UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

Desde el comienzo de la historia ha quedado registro de las preguntas más importantes de la biología: ¿Qué es la vida? ¿Cómo surge? ¿Qué la constituye? ¿Está suscrita a su naturaleza o es capaz de tener un fundamento distinto? ¿Cómo podemos hacer uso de ella? ¿Cambiarla, modificarla, controlarla?

Todas las respuestas e ideas que se han ofrecido a lo largo de ese tiempo están ligadas al desarrollo tecnológico y al *zeitgeist* de la élite intelectual de la época. Las propuestas actuales al fenómeno biológico son entonces el resultado de la estructura del conocimiento científico. El desarrollo tecnológico que hemos alcanzado nos permite abordar nuevamente estas difíciles preguntas con una perspectiva más profunda pues no sólo tenemos la oportunidad de conocer mejor los sistemas que estudiamos, sino tenemos la capacidad (al menos hipotética) de crear eventos que no existían previamente. A estos esfuerzos le llamamos biología sintética, que surgió hace menos de 20 años como una rama de la ciencia dedicada a: 1) el diseño y construcción de nuevas partes biológicas, dispositivos y sistemas; y 2) el rediseño de sistemas biológicos naturales ya existentes.

La célula es la unidad básica viva y, sin duda el componente central de toda célula es su DNA. El DNA es un biopolímero compuesto por cuatro bloques –nucleótidos– distintos dispuestos ordenadamente en secuencias (p.ej. genes, promotores, insuladores, etc.) asociadas a casi todas las funciones biológicas. A un conjunto de secuencias seriadas en un acomodo particular que es capaz de conferir a la célula las capacidades fundamentales asociadas a la vida (esto es: autonomía, reactividad, adaptabilidad y reproducción) le llamamos genoma; y todas estas capacidades asociadas a la vida están ligadas al flujo de la información genómica.

La información genómica

Si bien el flujo de la información genómica se describió hace más de 50 años en lo que se conoce como el “dogma central” de la biología molecular, ahora es posible trazar analogías claras entre dos de los sistemas de información mejor conocidos: La información genómica y la información computacional. Ambos son sistemas de información lineal, discreta y finita, su codificación es de estados reducidos pues en uno el código es binario mientras que en el otro es cuaternario, y en ambos casos la información está claramente identificada en comandos y sus parámetros, que se ejecutan después de un proceso de compilación [3].

Existen dos rutas fundamentales en el flujo de la información genómica. La primera ruta es un evento de transmisión de la completitud de la información genómica y está ligada a la reproducción, herencia, mutación y perpetuidad de la vida. La otra ruta es aquella que transforma segmentos particulares de información genómica –los genes– en componentes activos de las células –RNA y proteínas–. La primera ruta se estudia generalmente a través de la observación de las secuencias y variaciones genómicas y epigenómicas, mientras que la segunda ruta se ve principalmente beneficiada por las técnicas del DNA recombinante.

La tecnología molecular

En 1977 Sanger, et al. describieron una técnica de secuenciación de DNA, que permitía conocer ~200 nucleótidos de una cadena de DNA en un ensayo [13] F. & Coulson, A. R. (1975. A partir de entonces la tecnología de secuen-

ciación progresó lentamente hasta que en 1990 estos procesos se habían miniaturizado, automatizado y abaratado lo suficiente como para proponer el Proyecto del Genoma Humano. La propuesta era “simple”: Secuenciar las ~3 Gbp que componen el genoma de la especie humana. En este proyecto estuvieron inicialmente involucrados 6 países y 20 centros de investigación, costó 2.7 mil millones de dólares tan sólo en los Estados Unidos. El proyecto concluyó en 2003 con una carrera entre la industria y las organizaciones sin fines de lucro por secuenciar el genoma en tres años, en vez de los quince originalmente propuestos.

Al final, una de las metas propuestas para las siguientes dos décadas fue poder secuenciar el genoma de una persona en un día a un costo de USD\$1,000.00 [2]. Dos meses antes de la redacción de este texto, Illumina Inc. (San Diego, California, USA) presentó la plataforma HiSeq X Ten (<http://systems.illumina.com/systems/hiseq-x-sequencing-system.ilmn>), con la cual declara ser capaz de cumplir la meta trazada en 2003. Como resultado del avance tecnológico en el área de secuenciación, ahora es posible conocer simultáneamente los genomas de todo un ecosistema, los genomas de organismos extintos y el genoma de una célula individual.

Este progreso geométrico en la tecnología de “lectura” del DNA ha expandido nuestro horizonte científico y por supuesto ha creado nuevos desafíos a conocer acerca de los genomas que coexisten en todos los nichos imaginables. Si bien, como se discutirá más adelante, la biotecnología es capaz de reubicar dentro de un genoma fragmentos de DNA foráneos, uno de los desafíos que prevalecen es la capacidad de “escribir” el genoma, o visto de otra manera escribir el programa completo.

Dicha capacidad de escritura se ha visto mermada por factores tecnológicos y conceptuales. Por un lado, la tecnología de escritura no ha progresado a la misma velocidad que aquella de la lectura. Con base en el costo de la secuenciación de cada nucleótido, en la actualidad es 100 veces/bp más caro construir cadenas cortas de DNA y el costo es 1,000 veces/bp mayor cuando se trata de construir un genoma bacteriano *de novo* [15].

Sin embargo, el mayor de los problemas es que no sabemos qué escribir o qué decir pues aún no entendemos cómo se escribe un programa completo [4]. Es por ello que la única opción actual para la modificación genómica son las técnicas de DNA recombinante.

Dichas técnicas nacieron entre 1972 y 1973 [1, 7] y se desarrollaron para tomar segmentos cortos funcionales de DNA e incorporarlos a un sistema celular foráneo. Digitalmente puede entenderse como un proceso de copiar/pegar instrucciones, comandos o parámetros genómicos y tiene tres objetivos principales: 1) Observar el flujo de información y las características funcionales biológicas de los segmentos copiados/pegados, 2) Recuperar los productos del proceso de compilación (expresión) de estos segmentos, particularmente los productos proteicos, y 3) Incorporar nuevos elementos funcionales o de control para el diseño o rediseño de los sistemas biológicos del huésped.

Los sistemas biológicos

Uno de los genomas conocidos más pequeño, perteneciente a una bacteria del género *Mycoplasma*, está compuesto por 582 kbp, contiene 482 genes en un cromosoma circular y el número de proteínas es ligeramente mayor. Sin embargo si censáramos las interacciones entre todos los elementos moleculares de esta bacteria el número sería dos órdenes de magnitud mayor al de la cuenta de genes. Documentar todas estas interacciones, su dinámica y ambiente no sólo es un trabajo largo, tedioso y caro, habrá porciones que no podrían evaluarse por la naturaleza y las propiedades de las moléculas de estudio.

A pesar de ello, las interacciones y concentraciones relativas de cada elemento molecular de una célula bacteriana puede estimarse a través de modelos estáticos como los grafos o modelos dinámicos como las ecuaciones diferenciales. Cada modelo tiene perspectivas y alcances diferentes, la elección de un modelo sobre otro está íntimamente relacionada a la naturaleza de las interacciones a modelar y al nivel celular que se esté abarcando; por supuesto cada aproximación proporcionará resultados también distintos. Los problemas más importantes surgen cuando se desea integrar los modelos, pues por lo regular la semántica de cada modelo impide la conjunción de los datos analizados entre distintos niveles o variables de modelado.

El número de variables operando en una célula, la cantidad de datos que maneja y la dificultad para establecer modelos matemáticos más “universales” crean un nudo gordiano de complejidad biológica y matemática para

lo cual no existe todavía solución. Es por ello que el diseño de organismos y genomas *de novo* no es una opción por el momento y la mayoría de los esfuerzos se dedican al rediseño o introducción de elementos o circuitos nuevos a los sistemas celulares existentes [3]. Esta tendencia irá cambiando conforme comprendamos y seamos capaces de manejar teorías celulares multinivel y multivariable.

Por otro lado, si bien el rediseño es lo más empleado en la actualidad, no es frecuente observar rediseños extensos, pues dado que una célula depende fundamentalmente de su propio flujo de información, tenderá a contener sistemas robustos, con información vastamente redundante y alto nivel de adaptabilidad. Estos son fenómenos conocidos de los organismos vivos y se reflejan al momento de implementar rediseños del interactoma celular [9, 16]. Es frecuente observar que las células se resistan al cambio; ya sea que retornen sus funciones a lo más próximo a las condiciones originales o bien tengan una respuesta espuria o incluso mueran al fallar en el intento de reorganizar el mapa de interacciones.

A pesar de todas las dificultades técnicas, metodológicas y conceptuales, el campo de la biología sintética, que nació hace menos de 20 años tiene mucho auge y varios ejemplos notables.

La biología sintética

En la actualidad hay múltiples ideas que se están poniendo a prueba, desde rediseños completos de bacterias, hasta hacer crecer tu propia casa a partir de árboles que se estimulan selectivamente para crear un espacio habitable (<http://inhabitat.com/grow-your-own-treehouse/>). Los siguientes ejemplos de biología sintética no intentan ser exhaustivos sino son sólo para ilustrar los alcances y perspectivas que se están explorando en la actualidad.

Biosensores de arsénico

Todo empezó en la competencia iGEM 2009, donde estudiantes de la Universidad de Cambridge presentaron una bacteria sintética derivada de la *Escherichia coli*, a la cual introdujeron un circuito para responder ante algún estímulo químico particular y dar como resultado un cambio de color en

la bacteria (<http://2009.igem.org/Team:Cambridge>). Denominaron a estas bacterias sintéticas *Escherichia chromi* y eran capaces de colorearse en tonos morado, naranja, amarillo y verde (<http://echromi.com/>).

En esta competencia, uno de los estímulos químicos con los que se evaluó a estas bacterias fue el arsénico. Es entonces que el Dr. James W. Ajioka, el investigador principal que asesoró al grupo de *E. chromi* decidió llevar este biosensor al siguiente nivel: Inició un proyecto colaborativo para detección rápida y barata de arsénico en el agua (<http://arsenicbiosensor.org/index.html>). Para ese entonces, los circuitos biosensores de arsénico ya eran conocidos y viables, lo que hizo la diferencia en este proyecto fue: 1) La inclusión de proteínas cuya expresión es perceptible a simple vista y 2) la idea de embeber el biosensor en placas de papel que aseguren su bajo costo, fácil manejo y distribución, de tal manera que el biosensor pudiese ser utilizado en regiones paupérrimas y con elevada contaminación por arsénico.

Biorremediación y bioelectricidad

Por un lado, es ampliamente practicado la inoculación de consorcios bacterianos para el tratamiento de aguas negras y por otro, desde hace tiempo se conocen bacterias que generen electricidad. En 2003, el Dr. Bruce Logan tuvo la idea de combinar estas dos capacidades en un organismo que pueda realizar las dos funciones simultáneamente [10]. Seleccionó las bacterias con los circuitos metabólicos necesarios y diseñó un dispositivo, una batería microbiana la cual se alimenta de aguas negras y produce niveles medibles de voltaje. Actualmente se encuentra trabajando en escalar el voltaje para producción directa de bioelectricidad, mientras las baterías consumen los contaminantes del agua, efectivamente tratando las aguas negras.

Creación de bacterias

El Instituto J. Craig Venter de Biología Sintética en 2010 reportó el primer trasplante exitoso de un genoma interespecie [5]. El genoma introducido en cuestión había sido construido por medios no biológicos. Estos experimentos demostraron efectivamente la posibilidad de crear un genoma *de novo* para ingresarlo en una célula y “resetear” sus condiciones para convertirse en aquella que dicta el nuevo genoma. Con base en esta metodología, este

grupo de investigación busca crear la bacteria con el genoma sintético más pequeño [6, 8, 14].

Biología sintética y nanoingeniería

La construcción biológica de nanomateriales es un área conocida desde hace varios años, adicionalmente se conocen ejemplos de magnetobacterias y de otros organismos con fenómenos de acumulación de materiales útiles o deseables en la industria. Se están desarrollando rediseños metabólicos para controlar la agregación de material magnético a los bionanomateriales y con ello ganar nuevas propiedades deseables en los mismos [11].

DNA origami

En 2006, Rothemund, et al. publicaron las micrografías de plegamientos controlados de secuencias sintéticas cortas [12]. Dichos plegamientos dieron oportunidad a los investigadores a generar figuras geométricas a voluntad. Este tipo de desarrollo de nanobiomateriales tiene dos ventajas principales: 1) pueden codificarse y construirse en un sistema vivo, y 2) con un diseño apropiado, las secuencias origami contienen información inocua para la célula huésped, lo que da como resultado una implementación técnica relativamente sencilla y de fácil propagación.

Las técnicas de plegamiento geométrico controlado y otras semejantes tienen grandes posibilidades de aplicación en campos como la biocomputación, la criptografía y los sistemas de seguridad.

Conclusiones

Las partes, dispositivos y sistemas que diseñamos o rediseñamos resultan útiles para entender la complejidad e interacción biológica. Junto con la habilidad de modificar viene la necesidad de aplicar este conocimiento para resolver problemas puntuales y mejorar las condiciones de la humanidad.

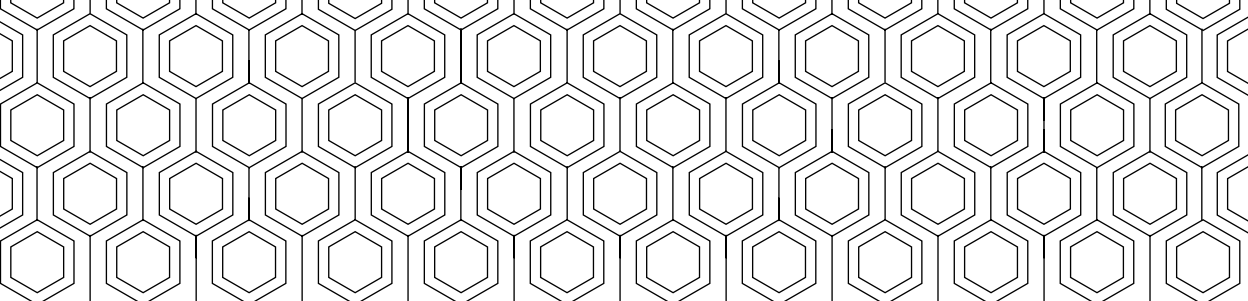
Aún falta mucho por conocer y, a pesar de que lo que implementamos amplía nuestra visión de la biología, todavía queda abierta la pregunta acerca de si la biología sintética será o no capaz de responder a las inquietudes más

profundas de la humanidad: ¿Qué es la vida? ¿Cómo surge? ¿Qué la constituye? ¿Está suscrita a su naturaleza o es capaz de tener un fundamento distinto? ¿Cómo podemos hacer uso de ella? ¿Cambiarla, modificarla, controlarla?

Referencias

- [1] Cohen SN, Chang ACY, Boyer HW, Helling RB. 1973. Construction of biologically functional bacterial plasmids in vitro. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 70(11):3240–44
- [2] Collins FS, Green ED, Guttmacher AE, Guyer MS. 2003. A vision for the future of genomics research. *Nature.* 422(6934):835–47
- [3] Densmore DM, Bhatia S. 2014. Bio-design automation: software + biology + robots. *Trends Biotechnol.* 32(3):111–13
- [4] Esvelt KM, Wang HH. 2013. Genome-scale engineering for systems and synthetic biology. *Mol. Syst. Biol.* 9(641):641
- [5] Gibson DG, Glass JI, Lartigue C, Noskov VN, Chuang R-Y, et al. 2010. Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome. *Science.* 329(5987):52–56
- [6] Glass J, Smith H, Hutchison C, Alperovich N, Assad-Garcia N. 2007. Minimal bacterial genome
- [7] Jackson DA, Symons RH, Berg P. 1972. Biochemical method for inserting new genetic information into dna of simian virus 40: circular sv40 dna molecules containing lambda phage genes and the galactose operon of escherichia coli. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 69(10):2904–9
- [8] Koonin E V. 2000. How many genes can make a cell: the minimal-genome concept. *Annu. Rev. Genomics Hum. Genet.* 1:99–116
- [9] Lam CMC, Suárez Díez M, Godinho M, Martins dos Santos V a P. 2012. Programmable bacterial catalysis - designing cells for biosynthesis of value-added compounds. *FEBS Lett.* 586(15):2184–90
- [10] Logan BE. 2008. *Microbial Fuel Cells*. Wiley-Interscience. 216 pp. 1st ed.
- [11] Rice MK, Ruder WC. 2014. Creating biological nanomaterials using synthetic biology. *Sci. Technol. Adv. Mater.* 15(1):014401
- [12] Rothemund PWK. 2006. Folding dna to create nanoscale shapes and patterns. *Nature.* 440(7082):297–302

- [13] Sanger F, Nicklen S, Coulson AR. 1977. Dna sequencing with chain-terminating inhibitors. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 74(12):5463–67
- [14] Stano P, Luisi PL. 2013. Semi-synthetic minimal cells: origin and recent developments. *Curr. Opin. Biotechnol.* 24(4):633–38
- [15] Wang HH, Isaacs FJ, Carr P a, Sun ZZ, Xu G, et al. 2009. Programming cells by multiplex genome engineering and accelerated evolution. *Nature.* 460(7257):894–98
- [16] Xu P, Bhan N, Koffas M a G. 2013. Engineering plant metabolism into microbes: from systems biology to synthetic biology. *Curr. Opin. Biotechnol.* 24(2):291–99



El análisis del movimiento en los últimos veinte años

HUGO ABRAHAM VÉLEZ PÉREZ

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS COMPUTACIONALES,
CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍAS,
UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

Introducción

En los últimos años, los avances científicos y tecnológicos han permitido un rápido conocimiento del cuerpo humano. La combinación de diferentes ramas de la ciencia (e.g. la Medicina, la Física, la Biología y la Ingeniería) ha sido el antecedente para la formación de nuevas ciencias. Este es el caso de una de las disciplinas que recientemente ha estado adquiriendo un gran auge debido no solo al gran número de ramas y conocimientos que combina sino también por la cantidad e importancia de sus campos de aplicación: la Biomecánica.

La Biomecánica es una ciencia multidisciplinaria que utiliza los principios de la mecánica para estudiar y explicar algunos procesos fisiológicos de los seres vivos. Su definición aún no ha sido totalmente homogenizada. Una de las más recientes y aceptadas es la realizada por el Instituto de Biomecánica de Valencia (1992): *“Conjunto de conocimientos interdisciplinarios generados a partir de utilizar, con el apoyo de otras ciencias biomédicas, los*

conocimientos de la mecánica y distintas tecnologías en: primero, el estudio del comportamiento de los sistemas biológicos y, en particular del cuerpo humano; segundo, en resolver los problemas que le provocan distintas condiciones a las que puede verse sometido” [1].

Aunque los grandes avances en Biomecánica se han desarrollado en el último siglo, su historia se remonta a la antigüedad en la cultura griega, quienes iniciaron con los conocimientos básicos de mecánica, física, matemáticas y medicina. Entre las contribuciones más importantes a estas ciencias podemos citar a grandes filósofos como Pitágoras, Hipócrates, Platón, Aristóteles, Arquímedes y Galeno. El siguiente periodo que aportó importantes avances en estas áreas fue el Renacimiento, con las aportaciones de Leonardo Da Vinci, Copérnico, Miguel Ángel y Vesalio. La gran revolución científica que se vivió entre 1600 y 1800 quedó marcada por los trabajos de Galileo Galilei, Descartes, Newton, Euler y Lagrange. Algunos trabajos identifican el periodo comprendido entre 1800 y 1900 como el “siglo de la marcha” [1]. Este periodo se caracterizó por el desarrollo de métodos experimentales consagrados a estudiar los movimientos del cuerpo. El estudio de la locomoción humana tuvo avances significativos con la invención de la cámara fotográfica. Durante el siglo xx, en el año 1972 se constituye en Pensilvania la primera sociedad de biomecánica: la International Society of Biomechanics (ISB). En 1976 se funda la European Society of Biomechanics (ESB) y en 1982 se consolida la International Society of Biomechanics in Sports (ISBS). En los años posteriores se han fundado más sociedades en diferentes países, como Alemania, Suiza, Francia, España y Estados Unidos.

Los laboratorios instalados en hospitales, centros de rehabilitación, empresas e incluso universidades de estos países, en su mayoría cuentan con equipos y tecnología de punta que permiten la cuantificación de variables que detallan los movimientos del cuerpo en diferentes actividades. En este contexto, una de las herramientas más poderosas que existe para describir el movimiento (principalmente humano) es un laboratorio de análisis de movimiento.

El presente documento pretende hacer una síntesis de los avances más significativos que ha tenido la ciencia respecto al análisis del movimiento, particularmente del cuerpo humano, destacando también la labor de algunos estudiosos en este dominio.

Biomecánica

En el término *biomecánica* coexisten dos componentes: *bios*, "vida" y *me-khanike*, "inventar" o "igenio", lo que significa que en esta ciencia podemos encontrar tanto aspectos biológicos como mecánicos. Por esto la biomecánica suele estudiarse de la misma forma que la mecánica: centrándose en el movimiento de los cuerpos, ya sea sin atender a las fuerzas que lo provocan (cinemática) o bien estudiando las relaciones ente las fuerzas y un sistema en movimiento (dinámica) o en reposo (estática). La biomecánica suele dividirse en tres subdisciplinas:

- a) Biomecánica médica. En esta área podemos agrupar todas las aplicaciones a la medicina, siendo las más beneficiadas: la traumatología (aplicación de principios mecánicos en traumas, lesiones, estudio de cargas, esfuerzos, etc.), la rehabilitación (estudio de momentos y fuerzas en ejercicios rehabilitadores), la fisiología (explica cuantitativa y mecánicamente procesos biológicos) y la ortopedia (desarrollo de prótesis y órtesis).
- b) Biomecánica ocupacional. Incluye el campo de la ergonomía, cuyo objetivo es la adaptación y mejora de las condiciones de trabajo del hombre, aumentando así su rendimiento y disminuyendo lesiones.
- c) Biomecánica de la actividad física y deportiva. Esta área se ocupa del andar cotidiano del hombre, así como también de actividades como correr, caminar, saltar, etc. y de deportivas a mediante el estudio de la actividad física y deportiva. Actualmente, un campo de aplicación que se está viendo enormemente beneficiado por esta rama es el deporte. En nuestros días, el desempeño de un atleta es de importancia no sólo para los entrenadores, sino también para las marcas comerciales que los patrocinan y las que fabrican el equipo deportivo que utilizan.

En cualquiera de estas subdisciplinas en las que se divide la biomecánica, un laboratorio de análisis de movimiento es comúnmente utilizado para la cuantificación del movimiento del cuerpo.

Evolución histórica

Como se ha mencionado previamente, aunque los grandes avances de la Biomecánica han ocurrido en el último siglo y medio, su historia data de la época de los grandes filósofos griegos.



Aristóteles (384 – 322 a.C.)

Creía que el corazón era la fuente de la inteligencia humana y que el movimiento del cuerpo se debía al paso del aire respirado por todo el cuerpo. Su obra *De Motu Animalium* (Movimiento de los animales) resulta el antecedente más antiguo del análisis científico del movimiento. Este texto da cuenta de las primeras observaciones hechas a la marcha y el primer análisis geométrico del movimiento muscular.



Galeno de Pérgamo (130 – 200 d.C.)

Nombrado por el emperador Marco Aurelio como físico del emperador. En su obra *De Motu Musculorum* (Movimiento de los músculos) plasma su pasión por el mecanismo del movimiento. Pensaba que el movimiento se transmitía del cerebro al músculo a través de un *spiritus animalis* y que éste se adquiría gracias a las terminales nerviosas que componen el músculo.



Vesalio (1514 – 1564)

Se considera el fundador de la anatomía moderna. Su obra *De Humani Corporis Fabrica* (Sobre la estructura del cuerpo humano) consta de siete volúmenes y representa una revolución de la anatomía humana. El término *Fabrica* del título de su libro hace referencia a los matices arquitectónicos que los huesos, músculos, articulaciones y ligamentos tienen dentro de la estructura corporal.



Galileo Galilei (1564 – 1642)

Publicó un tratado sobre el análisis mecánico del movimiento animal, llamado *De animalium motibus* (Movimiento de los animales). Esta obra aborda el análisis biomecánico del salto humano, la marcha de los caballos y los insectos así, como la determinación de las condiciones que permitían al cuerpo humano inmóvil flotar; entre otros análisis.



Giovanni Borelli (1608-1679)

Es considerado el padre de la biomecánica. Su obra *De motu animalium* (Movimiento de los animales) describe la geometría de movimientos humanos complejos, como saltar, correr o nadar. Igualmente analizó la marcha y fue el primero en comprender la ventaja mecánica que las palancas del sistema músculo-esquelético proporcionan al movimiento del cuerpo humano. Estudió las fuerzas que intervienen para mantener el equilibrio y determinó la posición del centro de gravedad en el cuerpo humano.

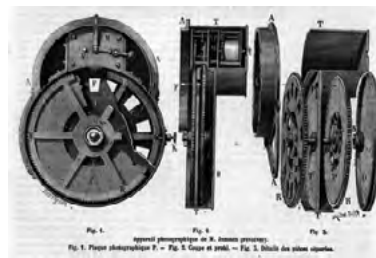


Pierre Janssen (1824-1907)

Astrónomo francés, descubridor del elemento químico helio. En 1874 y con el objetivo de estudiar el tránsito del planeta Venus por el sol (figura 1a), Janssen ideó un novedoso instrumento con el que se podía obtener una serie continua de fotografías llamado “revolver fotográfico” (figura 1b) [2]. El artefacto sintetiza morfológicamente y operativamente tres invenciones previas: la ametralladora, por su capacidad de disparar repetidamente; la cámara fotográfica, por su diseño de caja oscura, y el fenaquitoscopio, por la forma en la que almacena las imágenes capturadas.



(a)



(b)

Figura 1. (a) Experimento de Janssen para estudiar el fenómeno astronómico llamado “pase de Venus”. (b) Mecanismo del “revólver fotográfico”.



Étienne Jules Marey (1838–1904)

Aunque fue pionero en el campo de la Biomecánica, es reconocido también como pionero de la cinematografía. En 1863 perfeccionó su “método bráfico”, que estudiaba el movimiento utilizando instrumentos de registro y gráficos. La técnica que utilizó para sus investigaciones fue la llamada cronofotografía. Utilizando polígrafos e instrumentos de registro similares tuvo éxito en el análisis con diagramas del caminar de un hombre y de un caballo, del vuelo de los pájaros y los insectos (figura 2a). Los resultados de sus investigaciones se publicaron en *La Machine Animale*. En 1882, perfeccionó el “rifle fotográfico” (figura 2b), inspirado en el revólver fotográfico de Janssen; era capaz de tomar doce exposiciones en un segundo [3].

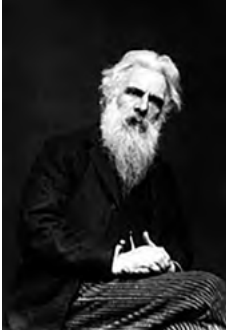


(a)



(b)

Figura 2. (a) Imágenes obtenidas por Marey mediante cronofotografía. (b) Mecanismo del “rifle fotográfico”.



Eadweard Muybridge (1830–1904)

Fotógrafo inglés que inició sus trabajos estudiando el trote de los caballos a petición del señor Leland Stanford, aficionado a estos animales y quien sostenía la idea de que había un instante, durante el trote largo o el galope, en que el caballo no apoyaba ningún casco en el suelo. Por otro lado, James Keene afirmaba lo contrario. En aquel entonces, no había ni herramienta ni método capaz de probar quién de los dos tenía la razón. Sin embargo, Muybridge ideó una nueva técnica: en paralelo a unos 40 metros de longitud había una batería fija con 24 cámaras fotográficas, y en ambos extremos de la pista, colocadas en ángulos de 90° y de 60°, había otras dos baterías de cámaras. En cada instante se disparaban sincrónicamente tres cámaras, una de cada batería. Se impresionaban placas secas a una velocidad de obturación graduable que podía regularse desde varios segundos hasta la altísima velocidad de 1/6000 de segundo, según la velocidad del motivo a fotografiar. Así, en 1878 se publicaron seis grabados hechos sobre negativos ampliados de fotografías de Muybridge, donde se veía a un caballo moviéndose al paso y al trote (figura 3).

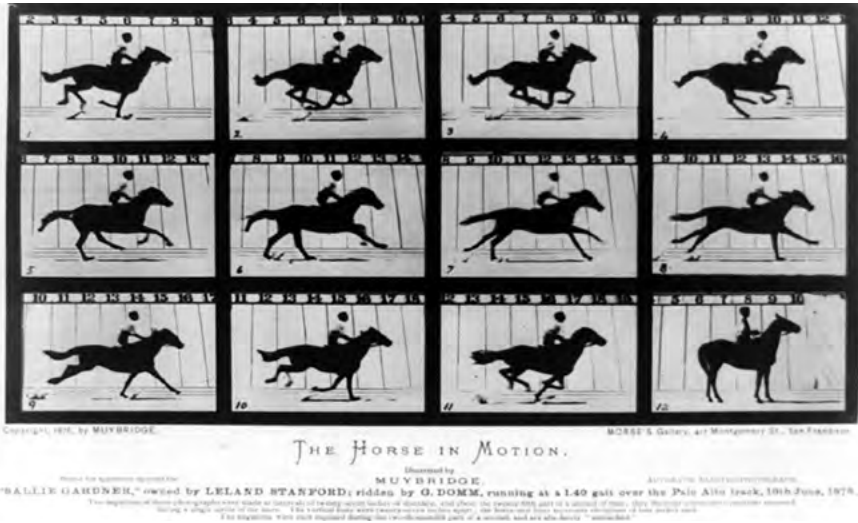


Figura 3. Ejemplos de fotografías de un caballo a galope tomadas por Muybridge.

Durante los años cincuenta, el interés por el deporte, la proliferación de publicaciones sobre el análisis del movimiento y la biomecánica aplicada a la actividad deportiva, hizo que las investigaciones se extendieran a otros aspectos relacionados con la actividad física, como el equipamiento y el rendimiento deportivos. Durante la primera mitad de la década de los sesenta, las publicaciones se orientaron hacia la actividad muscular y articular, unas dirigidas hacia los movimientos básicos y otras hacia las habilidades deportivas. Durante la segunda mitad de esta década aparecieron las primeras revistas especializadas en educación física [1].

En 1972 se constituye en Pensilvania la primera sociedad de biomecánica: la International Society of Biomechanics (ISB). En 1976 se funda la European Society of Biomechanics (ESB) y en 1982 se consolida la International Society of Biomechanics in Sports (ISBS). En los años posteriores se han fundado más sociedades en diferentes países, como Alemania, Suiza, Francia, España y Estados Unidos.

Aunque las investigaciones descritas en este documento fueron hechas utilizando cámaras de película, la aplicación generalizada de sistemas de cámara de video para el análisis del movimiento tanto en condiciones normales como en condiciones patológicas se inició en la década de los setenta. Los tratamientos basados en los resultados del análisis del movimiento y la marcha avanzaron significativamente en la década de los ochenta con la implementación de computadoras y *software* capaces de procesar a mayor velocidad la información ahora digitalizada. De esta forma nacen empresas dedicadas a la comercialización de *hardware* y *software* altamente especializados en el procesamiento no sólo de imágenes tomadas por cámaras de video e infrarrojas, sino que también incorporan datos electrofisiológicos, como el electrocardiograma (ECG) y el electromiograma (EMG), entre otros, asociados al movimiento. Ejemplos de estas empresas son los sistemas de movimiento Vicon y BTS.

Los laboratorios instalados en hospitales, centros de rehabilitación, empresas e incluso universidades de estos países, en su mayoría cuentan con equipos y tecnología de punta que permiten la cuantificación de variables que detallan los movimientos del cuerpo en diferentes actividades. En este contexto que una de las herramientas más poderosas que existe para describir el movimiento (principalmente el humano) es un laboratorio de análisis de movimiento (LAM).

Laboratorio de análisis del movimiento

Los registros de video y las técnicas de procesamiento de imágenes complementadas con datos electrofisiológicos (como el EEG y el EMG) se han convertido en herramientas indispensables para el análisis tanto dinámico como estático del movimiento y de posturas del cuerpo humano. Un laboratorio de análisis de movimiento (LAM) se compone de un sistema optoelectrónico de varias cámaras de video en el rango infrarrojo y que registran imágenes a frecuencias relativamente altas. El sujeto en estudio por lo regular se coloca marcadores esféricos pasivos reflectivos en zonas óseas o en articulaciones específicas y de acuerdo a protocolos biomecánicos ya establecidos (figuras 4 y 5).

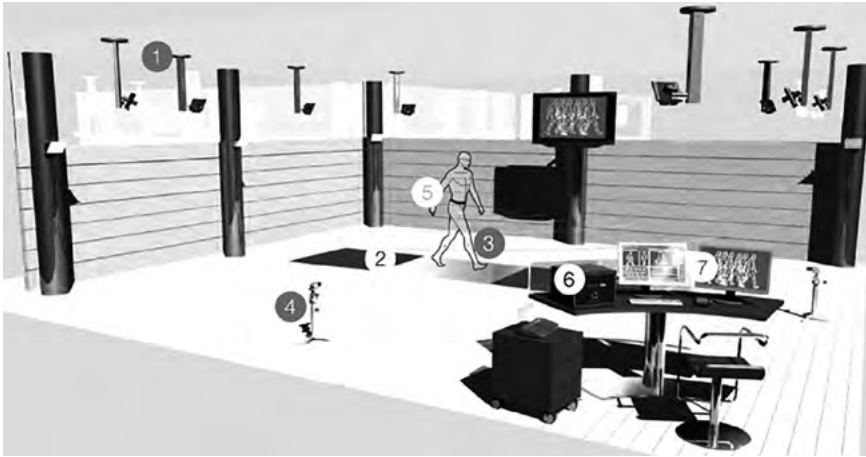


Figura 4. Ejemplo de un laboratorio de análisis del movimiento (LAM) con cámaras fijas: (1) Videocámaras digitales infrarrojas HD, (2) tapete "sensorizado", (3) sistema EMG inalámbrico, (4) videocámaras, (5) sistema de sensado inercial, (6) CPU y (7) Software.

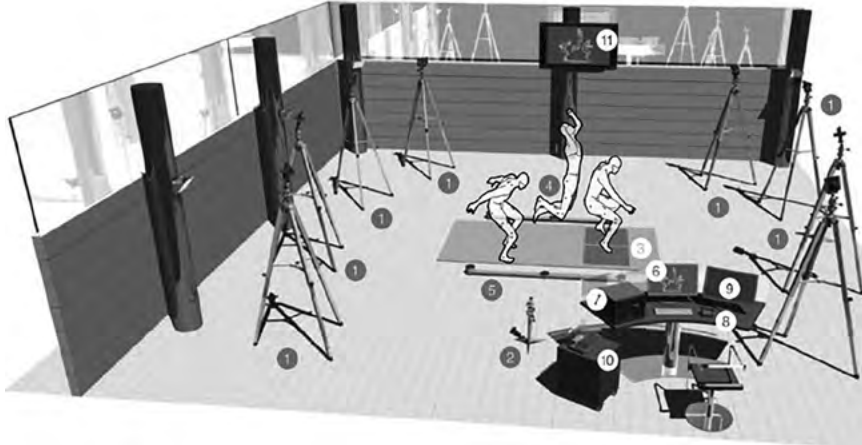


Figura 5. Ejemplo de un laboratorio de análisis del movimiento (LAM) con cámaras móviles: (1) videocámaras infrarrojas optoelectrónicas, (2) videocámaras, (3) plataformas de fuerza, (4) sensores EMG inalámbrico, (5) sistema de seguimiento óptico, (6) software, (7) CPU, (8) unidad receptora de EMG, (9) monitores, (10) estación para EMG, (11) pantalla de control.

Una vez calibrado el sistema para el sujeto en estudio, un *software* se encarga de correlacionar las imágenes provenientes de las diferentes cámaras para construir el “esqueleto” virtual del sujeto (figura 6) y poder cuantificar ángulos de movimiento, adelantar y retroceder el video, observar desde diferentes ángulos el desplazamiento. Con todos los datos recolectados se pueden sacar estadísticas o gráficas que describan patrones de movimiento (figura 7).

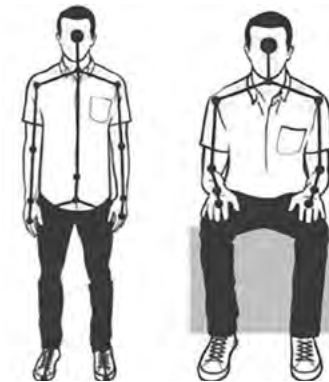


Figura 6. Ejemplo de “esqueletos” de articulaciones.

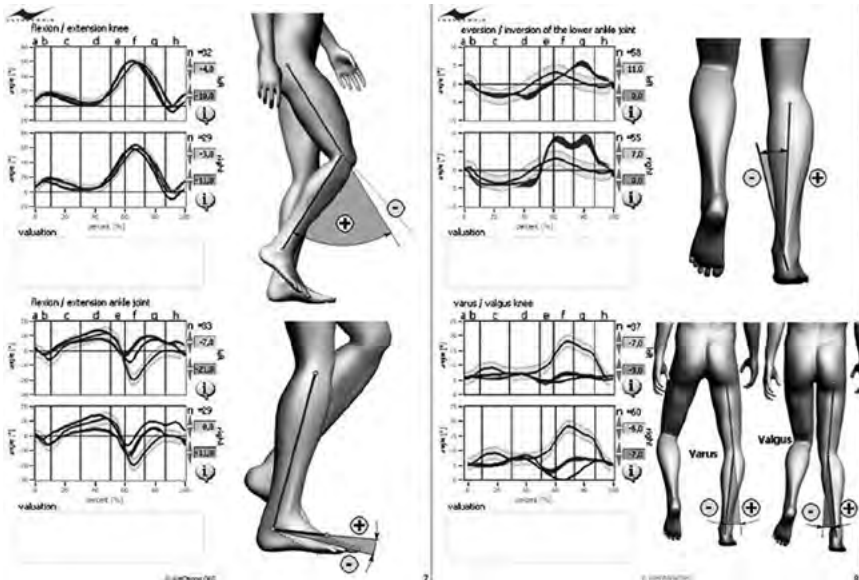


Figura 7. Ejemplo de cuantificación de ángulos de movimiento, obtención de gráficas y estadísticas que describen el movimiento.

Los datos electrofisiológicos como el EEG y el EMG son adquiridos de forma independiente del sistema de video. Las fuerzas de reacción que tiene el cuerpo sobre el suelo se miden a través de plataformas de fuerza ubicadas en el piso. El sujeto en estudio debe pisar sobre estas plataformas de la manera más natural posible para no alterar las mediciones. Por otro lado, la actividad eléctrica muscular (EMG) se puede hacer con electromiógrafos. Es altamente deseable que éstos registren la actividad muscular de forma inalámbrica para que las mediciones se afecten lo menos posible. Estos mismos criterios son aplicables para el registro de señales electroencefalográficas (EEG).

A título de ejemplo mencionamos a una empresa líder en equipos para el análisis de movimiento: VICON, cuyas cámaras optoelectrónicas se han consolidado en el mercado por el potencial que ofrecen para el rastreo de movimiento. Aparte de permitir la determinación de parámetros biomecánicos, cinemáticos, dinámicos, estáticos, cálculos indirectos como velocidad, aceleración, etc., con una gran exactitud, sus cámaras permiten el uso de frecuencias de muestreo que van desde los 515 Hz hasta los 2 kHz a una resolución de 4 MPx. Los estudios que permiten hacer estos equipos pueden

ser en espacios cerrados o a la intemperie. Finalmente cabe mencionar que los estudios que su *software* permite hacer en la marcha humana se basan en estándares clínicos internacionales ISO.

Aplicaciones

Aplicaciones médicas

Una de las aplicaciones que tienen los datos obtenidos en un LAM es la evaluación cuantitativa de las funciones motoras que permite determinar el estado funcional de los pacientes ya sea en condiciones patológicas, con el objetivo de determinar estrategias de tratamiento, terapias, evaluación, etc., o bien en condiciones normales, para determinar parámetros “normales” en una población (figura 8).

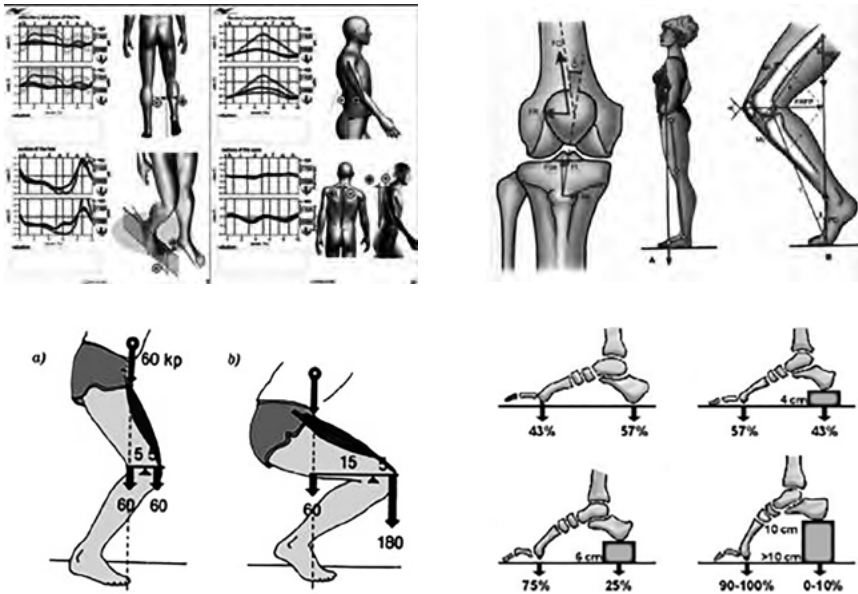


Figura 8. Ejemplos de aplicaciones médicas al análisis del movimiento.

Aplicaciones ergonómicas

Otra aplicación común del análisis del movimiento es el diseño de espacios laborales, mejoramiento de las condiciones laborales, reducción de lesiones, de molestias y de dolores derivados de la postura en los lugares de trabajo (figura 9). Una mala postura es un desequilibrio del sistema musculoesquelético que produce un mayor gasto de energía del cuerpo, ya sea cuando éste se encuentra en actividad o cuando está en reposo, provocando cansancio y/o dolor. Las personas, al tratar de restablecer el equilibrio de sus cuerpos, adoptan nuevas posiciones, ocasionando mayores deformidades, en vez de reducir los efectos de una mala postura. Estas deformidades pueden ser incapacitantes desde el punto de vista estético y en lo funcional. La mala postura en las personas es causada generalmente por problemas congénitos, genéticos, infecciosos, posturales o idiopáticos (originados en sí mismo). Las deformaciones en la columna también se pueden deber a enfermedades degenerativas o malos hábitos [4].

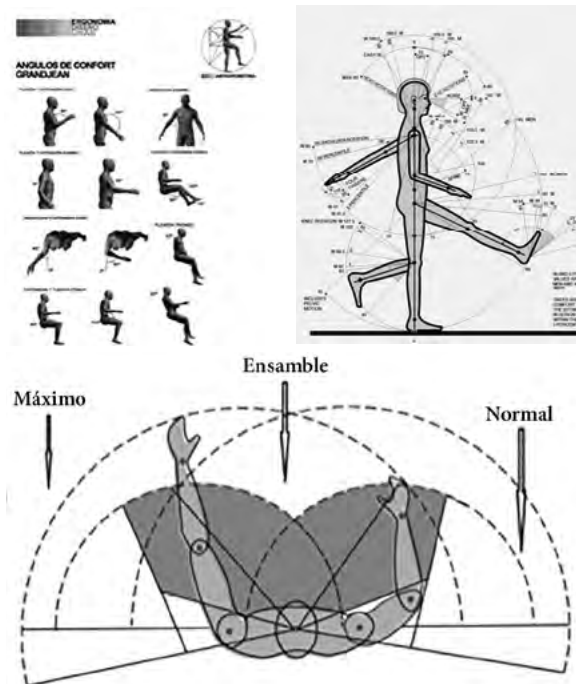


Figura 9. Ejemplos de aplicaciones ergonómicas del análisis del movimiento.

Aplicaciones cinematográficas

Una de las aplicaciones más recientes y ampliamente utilizadas del análisis del movimiento involucra a la industria cinematográfica. Anteriormente la filmación de una película implicaba la construcción de escenarios, ya fueran de tamaño real o a escala, que resultaba costosa. Lo mismo ocurría con los efectos especiales y demás acrobacias que debían hacer los actores para impresionar al público. En la actualidad todo eso ha quedado atrás y ahora se emplean computadoras para generar escenarios virtuales, efectos especiales, etc. El uso de estas tecnologías abarata enormemente los gastos de producción. Finalmente, no hay que olvidar la animación por computadora, que tanto éxito ha tenido en la producción de películas infantiles (figura 10).



Figura 10. Ejemplos de aplicaciones cinematográficas del análisis del movimiento.

Aplicaciones en videojuegos

Finalmente, otra aplicación de esta herramienta es en los videojuegos. El principio en que se basa esta aplicación es similar al de la industria cinematográfica (figura 11).

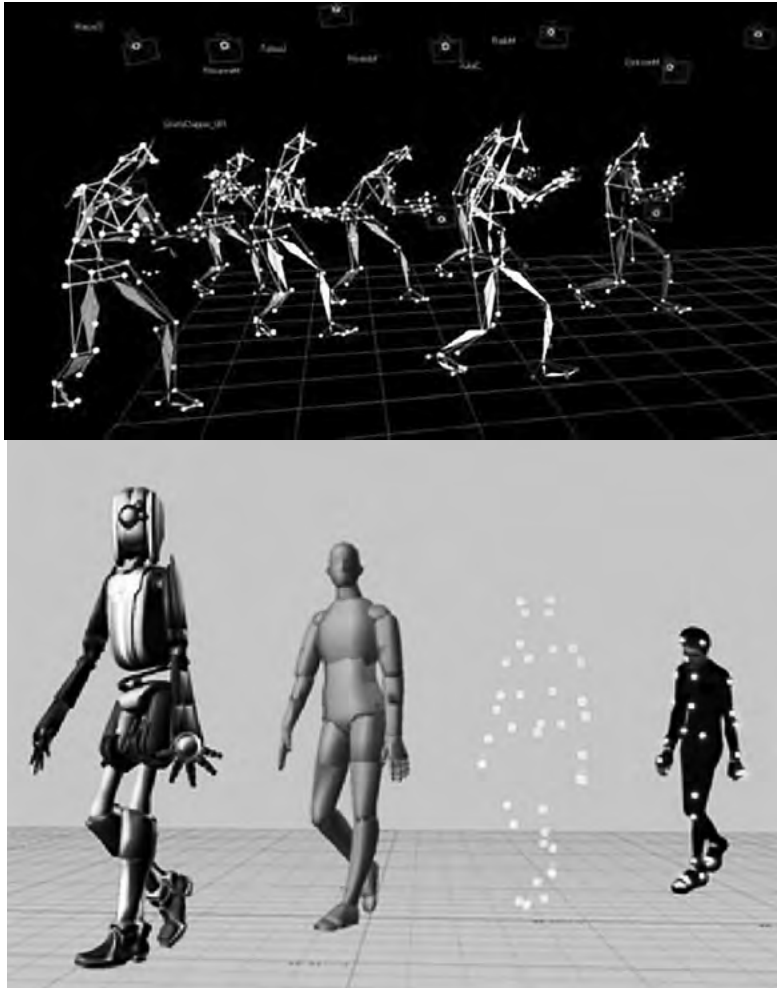
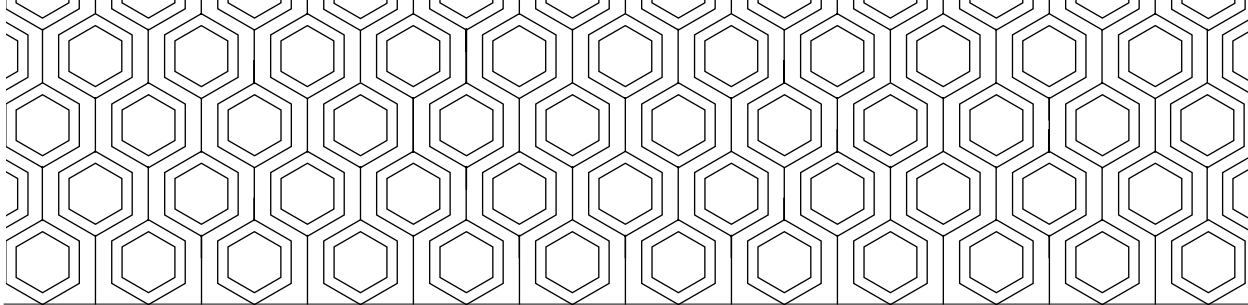


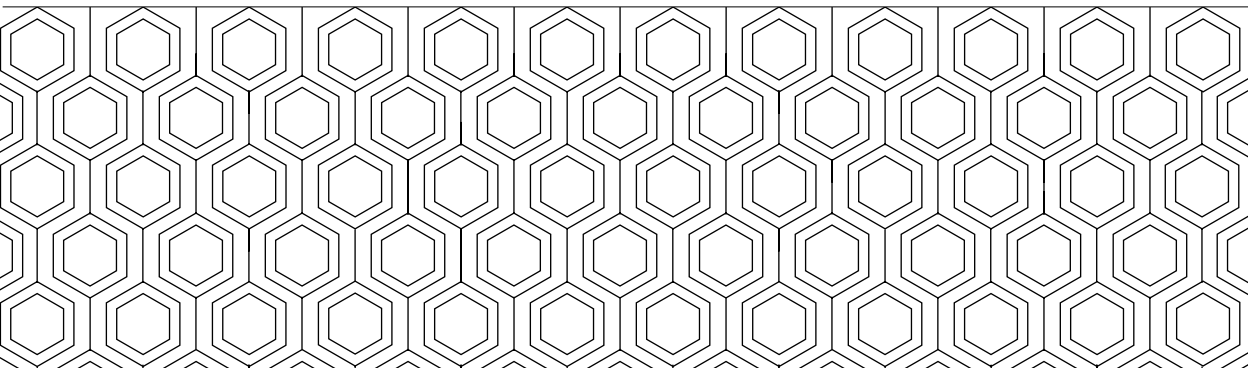
Figura 11. Ejemplos de aplicaciones del análisis del movimiento en videojuegos.

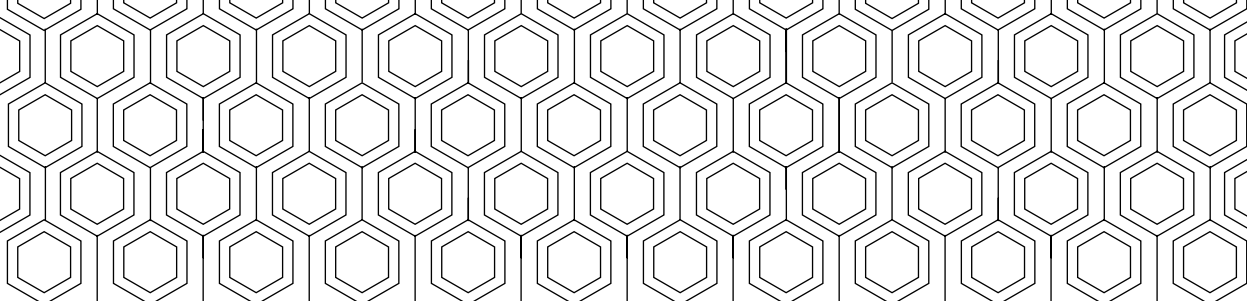
Referencias

- [1] M. Izquierdo, *Biomecánica y bases neuromusculares de la actividad física y el deporte*. Madrid: Editorial Médica Panamericana, 2008.
- [2] “Biografías y vidas. Pierre Jules César Janssen,” 2014. [Online.] Disponible en: <http://www.biografiasyvidas.com/biografia/j/janssen.htm>. Consultado en septiembre de 2014.
- [3] “Fotonostra. Étienne Jules Marey,” 2014. [Online.] Disponible en: <http://www.fotonostra.com/biografias/marey.htm>. Consultado en septiembre de 2014.
- [4] Laboratorio de Análisis de Movimiento, “Cerebro.” [Online.] Disponible en: <http://www.clinicacerebro.com.mx/>. Consultado en septiembre de 2014.



Epílogo





La danza de dos agujeros negros. El problema de dos cuerpos en relatividad general

JUAN CARLOS DEGOLLADO DAZA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS COMPUTACIONALES,
CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍAS,
UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

El problema más sencillo en la gravitación newtoniana es el de dos partículas (masas puntuales) que interactúan bajo su atracción gravitacional. Este problema, llamado el problema de los dos cuerpos, fue abordado y resuelto por el propio Newton en su libro *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, publicado en 1687. En su libro, Newton estableció una relación cuantitativa de la fuerza con la que se atraen dos cuerpos con masa. Mostró que la fuerza con la que se atraen los cuerpos depende únicamente de su masa y del cuadrado de la distancia que los separa.

Según la visión moderna de Einstein de la gravitación, expresada en la teoría de la relatividad general, las interacciones gravitacionales son manifestaciones de la curvatura del espacio-tiempo. El problema más sencillo sigue siendo el de dos partículas que interactúan. De forma sorprendente, los objetos más simples que existen en la teoría de Einstein son los agujeros

negros, y el problema de dos cuerpos es justo el de la interacción de dos agujeros negros.

El sistema es mucho más complicado que su contra parte newtoniana porque no es un sistema cerrado, es decir, hay disipación de energía. Esta disipación se propaga en forma de perturbaciones en el entramado del espacio-tiempo, y como consecuencia los agujeros negros se fusionan para formar uno solo. Modelar la dinámica de dos agujeros negros es un problema muy complejo porque involucra resolver ecuaciones diferenciales no lineales acopladas —las ecuaciones de Einstein—. Resolver esas ecuaciones de forma analítica es simplemente imposible. Por supuesto las ecuaciones de Einstein tienen soluciones muy conocidas. Sin embargo estas soluciones están restringidas a problemas con un alto grado de simetría. Simetría que el problema de dos cuerpos no tiene.

Para resolver las ecuaciones se recurrió al uso de computadoras, lo cual llevó al nacimiento de una nueva rama de la física a la que se le llamó relatividad numérica.

El objetivo de la relatividad numérica es desarrollar códigos de simulación y relacionar herramientas de cómputo para resolver problemas de relatividad general y astrofísica relativista. El concepto "relatividad numérica" es usado para las simulaciones que involucran evoluciones dinámicas del espacio-tiempo en las cuales no se pueden simplificar la ecuaciones de Einstein.

La relatividad numérica nació en los años sesenta del siglo pasado con los trabajos de Susan Hahn y Richard Lindquist. Ellos hicieron sus cálculos en una computadora IBM 7090 perteneciente a la segunda generación de los transistores, con una capacidad de memoria aproximada a 32 kilobytes y con 50,000 transistores (en un Core i7 980x se tienen 1,170 millones). Cada simulación les tomó alrededor de cuatro horas y su conclusión fue que la evolución de las ecuaciones de Einstein no presentaba dificultades esenciales y quedaban pendientes estudios sobre la estabilidad de los métodos numéricos y sobre la elección de coordenadas y por supuesto más poder de cálculo.

Los autores estaban optimistas, les parecía que el único impedimento era resolver la falta de poder de cómputo y quizá también la de recursos, pues el costo de una computadora de este tipo oscilaba en los tres millones de dólares y su uso estaba bastante restringido.

Gracias al enorme progreso en el desarrollo de las computadoras se resolvieron algunos problemas con agujeros negros de relevancia. Sin em-

bargo, transcurría la década de los noventa y la solución de la colisión de dos agujeros negros seguía sin lograrse. En la década de los noventa se hicieron grandes avances en el desarrollo de herramientas matemáticas para reescribir las ecuaciones de Einstein de forma que pudieran resolverse numéricamente, así como en la comprensión de la física del problema. La simulación esperada seguía sin llegar.

En 2005, Frans Pretorius, un investigador del California Institute of Technology, publicó un artículo en la prestigiosa revista *Physical Review letters* en el cual mostraba la evolución de dos agujeros negros en colisión y la correspondiente emisión de radiación gravitacional. Como era de esperarse, durante los primeros años el artículo logró más de 100 citas. La comunidad en torno a la relatividad numérica estaba ansiosa de descubrir cuál era el ingrediente que utilizó Pretorius y se había pasado por alto con anteriormente. La respuesta no fue tan fácil porque él utilizó herramientas que no aplicaba la mayoría, así como una formulación de las ecuaciones con la que no todos estaban familiarizados. En 2006, casi simultáneamente, dos grupos de investigación, uno en el Gravitational Astrophysics Laboratory del NASA Goddard Space Flight Center y otro en la Universidad de Brownsville, Texas, publicaron simulaciones de la evolución de dos agujeros negros en las que utilizaron las herramientas que a la mayoría le eran familiares. Con esto el problema de dos cuerpos en relatividad general se daba por resuelto.

La historia, sin embargo, se continuó escribiendo. En 2007, haciendo simulaciones con diferentes parámetros y agujeros negros más generales —aquellos que giran sobre su propio eje— se encontró que para ciertas configuraciones el agujero negro final salía disparado a grandes velocidades. Esto fue una agradable sorpresa porque el fenómeno había sido predicho con anterioridad, pero no había captado la atención de una gran cantidad de investigadores. Hoy en día constituye uno de los problemas no resueltos más interesantes en el campo, determinar si los agujeros negros después de chocar producen un agujero negro que salga disparado. Probablemente hay factores que no se están considerando y que evitan que en el universo haya agujeros negros moviéndose por todas partes.

En años recientes, los trabajos sobre colisiones de agujeros negros están enfocados en estudiar diferentes configuraciones de los parámetros que produzcan distintas formas de ondas gravitacionales. Las ondas gravitacionales son las perturbaciones en el espacio-tiempo que se propagan a la velocidad

de la luz. Cualquier objeto con una forma irregular radía ondas gravitacionales, sólo que la amplitud es tan pequeña que no la podemos detectar. Los agujeros negros, al ser objetos tan extremos, se convirtieron en el modelo predilecto para producir formas de ondas gravitacionales.

La detección de ondas gravitacionales es uno de los problemas abiertos de la física contemporánea más desafiantes. Una vez que se detecten las ondas gravitacionales seguramente se obtendrá otro premio Nobel de Física por estudios del campo de gravitación.

El problema de la interacción de dos agujeros negros sufrió otro giro inesperado. Esta vez vino de una rama diferente a la astrofísica, la física de partículas.

La física cuántica se encarga de describir los fenómenos que ocurren a escalas microscópicas. A estas escalas, la relatividad general deja de ser válida porque aún no se conocen las partículas que transmiten su interacción. En otras palabras, no existe una teoría cuántica de la gravitación. La física gravitacional a escalas pequeñas se desconoce.

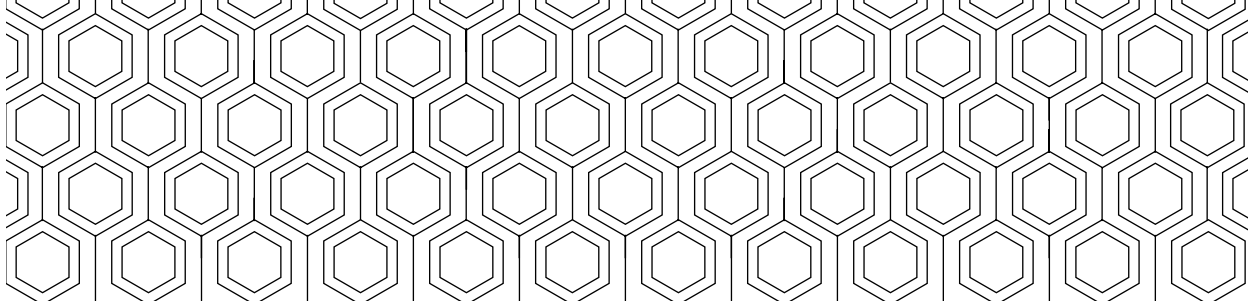
Cuando se hacen chocar dos partículas microscópicas hay una enorme liberación de energía y se producen también muchas otras partículas. Para provocar choque de dos partículas se necesita darles inicialmente mucha velocidad, lo que nos lleva a escalas de energía muy grande. Esta interacción puede describirse por medio de la colisión de dos agujeros negros.

El argumento es como sigue:

En un proceso de dispersión o colisión de partículas, las partículas que colisionan tienen inicialmente mucha más energía de movimiento —energía cinética para ser mas precisos— que su energía en reposo, aquella dada por la famosa fórmula de Einstein ($E=mc^2$). A grandes energías se espera que la interacción gravitacional será insensible a la estructura interna de las partículas, lo que implica que el proceso de colisión de dos partículas puede ser descrito de manera formal por la dispersión de dos agujeros negros. A este fenómeno, descrito a finales de la década de los noventa se le llamó poéticamente *matter does not matter* ('la materia no importa'). En esta frase, se captura de manera clara la idea central. El resultado de la colisión de dos objetos a muy grandes velocidades es independiente de la estructura interna de los objetos iniciales.

Esto abrió un nuevo campo de aplicación para la relatividad numérica. Una vez que se involucran escalas de energía tan grandes, entran en juego

teorías alternativas a la relatividad general. En particular existe la posibilidad de que vivamos en un universo de más de cuatro dimensiones (las tres espaciales y el tiempo). Esta posibilidad abre la puerta para el estudio de la física en un número arbitrario de dimensiones d . El resto de las cuales ($d-4$) permanece oculto debido a que muchos de los fenómenos a los que estamos acostumbrados ocurren a bajas energías. Los estudios teóricos sobre interacciones gravitacionales en más dimensiones han mostrado tener una estructura mucho más rica y por lo tanto es de esperarse que estas teorías puedan verificarse o descartarse de forma más o menos directa. La conclusión es que los experimentos indicarán cuál es la dimensión correcta. Trabajos en conjunto con las colaboraciones de los grandes aceleradores de partículas y la comunidad relativista han comenzado a surgir y se espera que den resultados fructíferos.



¿Existe la energía oscura?

LUZ MARINA REYES BARRERA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS COMPUTACIONALES,
CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍAS,
UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

Uno de los más grandes desafíos en la cosmología moderna es conocer físicamente qué es la energía oscura. La energía oscura es el nombre que se le ha dado al agente que causa la expansión acelerada actual del universo. Se le llama energía porque no está localizada en una región limitada del espacio —como sí lo hace la materia—, y en cambio, está distribuida en todo el universo y constituye 74% del total de la materia-energía del universo; y se le adjetiva como oscura porque no la podemos ver, no emite luz. Algunas de sus propiedades que se infieren de las observaciones son que tiene presión negativa (o antigravitatoria) y no forma grumos, como sí lo hace la materia bariónica o la materia que conocemos. El descubrimiento de la energía oscura mereció a sus descubridores el premio Nobel en 2011.

Hace 20 años aún no se conocía el problema de la existencia de la energía oscura. La creencia era que el universo se estaba expandiendo desaceleradamente de manera uniforme. Es decir, cada punto del universo se expande de manera uniforme, como lo harían unos puntos pintados en un globo que se está inflando; y dado que la fuerza de gravedad es atractiva, la velocidad de expansión debería ser cada vez menor. La desaceleración quedaría determinada por la cantidad de materia en el universo. Entre mayor cantidad de masa, mayor fuerza de gravedad y mayor desaceleración. Aún en 1994 el dilema de los cosmólogos era saber si la cantidad de masa en el

universo era la suficiente para detener su crecimiento y hacerlo recolapsar hasta producirse el Gran Colapso (*Big Crunch*) o si, por el contrario, el universo crecería para siempre.

Uno de los resultados más sorprendentes en los últimos años ha sido la observación de que nuestro universo no sólo está creciendo sino que lo hace de una forma acelerada. Este hallazgo se determinó en 1998, gracias a que los grupos Supernova Cosmology Project y High-*z* Supernova Search, liderados por Saul Perlmutter y Brian Schmidt junto a Adam Riess, dieron a conocer independientemente sus resultados de las observaciones hechas a supernovas tipo Ia (SNIa). A partir de las observaciones se determinó que el brillo de las SNIa era mas tenue de lo esperado y que su espectro luminoso tenía un corrimiento al rojo (zona de bajas energías), lo que significaba que el universo no estaba frenando su expansión (como se esperaba debido a la gravedad) sino que se estaba expandiendo a una tasa acelerada [1]. Las SNIa son un tipo especial de explosiones producidas por estrellas enanas degeneradas con CNO, es la clase de supernovas más brillante y más homogénea, con un espectro pobre en hidrógeno, razón por la cual son también conocidas como candelas estándar.

Otro tipo de observaciones que muestra un universo en etapa de expansión acelerada es la radiación del fondo cósmico de microondas (CMB), el cual es la imagen del universo cuando tenía 380,000 años de edad, época en que el universo primordial empezó a enfriarse después de la gran explosión (Big-Bang), y se iluminó debido a la formación de materia neutra, hecho que permitió a los fotones desacoplarse y propagarse libremente por primera vez [2].

El problema de la energía oscura es delicado porque la hipótesis que mejor se ajusta a los datos observacionales, conocida como Λ CDM, aún espera una interpretación física correcta y completa. En el modelo Λ CDM, el universo es espacialmente plano, homogéneo e isotrópico a gran escala, está compuesto sobre todo de materia oscura fría (CDM 21%), energía oscura en forma de una constante cosmológica (Λ 74%), además de los ingredientes electromagnéticos y bariónicos estándar. En este modelo, la energía oscura es descrita como un fluido perfecto, con una ecuación de estado lineal $p = \omega\rho$, con $\omega \approx -1$ constante. Siendo p y ρ la presión y la densidad de Λ respectivamente. Los dos problemas principales de Λ CDM son conocidos como el problema de la constante cosmológica, el primero, y el problema de

coincidencia cósmica, el último. El problema de la constante cosmológica se deriva del hecho de asociar Δ físicamente a las fluctuaciones cuánticas de vacío. Así, el valor de la densidad de Δ obtenido de las observaciones, $\rho \sim 10^{-10}$ erg/cm³, al ser comparado con la densidad de vacío teórico ρ_{vac} de las diferentes teorías cuánticas, tiene una discrepancia que va desde 10^{46} con la teoría cromodinámica cuántica QCD ($\rho_{\text{vac}} \approx 10^{36}$ erg/cm³), hasta 10^{120} con la teoría de Planck ($\rho_{\text{vac}} \approx 10^{110}$ erg/cm³) [3]. El segundo problema de Δ_{CDM} se puede resumir en la pregunta: ¿por qué la densidad de energía de materia oscura fría (la cual en ausencia de interacciones su corrimiento al rojo es $z = a^{-3}$, donde $a(t)$ es el factor de escala de una métrica homogénea e isotrópica espacialmente) y la densidad de energía asociada a Δ son del mismo orden precisamente ahora? Para que esto ocurra se debería haber tenido ciertas condiciones iniciales específicas justo después de la época de la primera expansión del universo o inflacionaria ($\sim 10^{-33}$ seg después del Big-Bang) [4].

Muchos esfuerzos se están haciendo para esclarecer la ecuación de la energía oscura, intentando fortalecer sus limitaciones con nuevos datos astronómicos. Aunque las actuales observaciones de SNia, CMB y oscilaciones acústicas de bariones (BAO) tienen una precisión muy alta y se complementan entre sí, el problema de la ecuación de la energía oscura continúa sin resolverse. Lo único que hasta el momento nos dicen las observaciones es que el parámetro de la ecuación de estado para la energía oscura es el intervalo $-1.039 \leq \omega \leq -0.894$ [5], pero no es claro si ω es constante o varía lentamente en el tiempo.

Se han hecho varias propuestas para explicar la expansión acelerada actual, pero hasta el momento el problema continúa abierto. La mayoría de los modelos cosmológicos se basan en la teoría de relatividad general y sus modificaciones, incluyendo las teorías en dimensiones extra. Entre las primeras opciones se encuentran los modelos de quintaesencia, donde la energía oscura es modelada por un campo escalar que puede o no interactuar con la materia [6, 7]; los modelos de campos escalares con términos no cinéticos, conocidos como modelos de k-esencia [8]; modelos en los que la energía oscura y la materia oscura son unificados en forma de un simple fluido oscuro, debido a que la evidencia de ambas es puramente gravitatoria [9]. Sin embargo, otra opción bastante respetable es recurrir a la idea de que tal vez no existe ni una quintaesencia ni una energía oscura generando la aceleración en la expansión; sino que puede tratarse de un efecto puramente

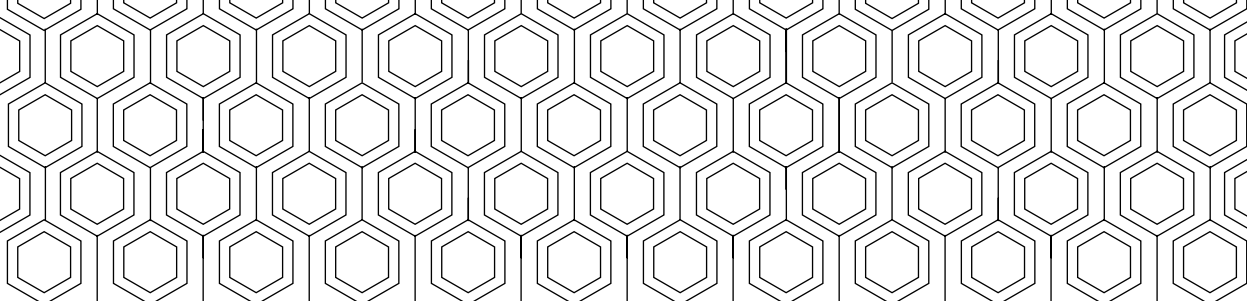
gravitatorio debido a desviaciones a la gravedad newtoniana, es decir, a teorías modificadas de la gravedad. Entre estas teorías se encuentran las teorías $f(R)$ [10], las teorías de branas inspiradas en la fenomenología de las teorías de cuerdas y en el problema de jerarquía [11], entre otras.

A pesar de haber tantas teorías intentando explicar la expansión acelerada actual del universo, la pregunta continúa abierta, ¿existe una energía oscura con presión negativa que produce la aceleración en la expansión?, o por el contrario, ¿la teoría gravitatoria que se está utilizando es la correcta? Por el momento hasta que no haya más evidencia observacional o experimentos que permitan decirnos más sobre la detección de la energía oscura, tanto los cosmólogos observacionales como los teóricos seguiremos buscando opciones a la expansión acelerada actual del universo.

Referencias

- [1] Adam G. Riess *et al.*, “Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant,” *Astron. J.*, no. 116, pp. 1009-1038, 1998; S. Perlmutter *et al.*, “Discovery of a supernova explosion at half the age of the Universe and its cosmological implications,” *Nature*, no. 391, pp. 51-54, 1998.
- [2] D. N. Spergel *et al.*, “Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP), three year results: implications for cosmology,” *Astrophys. J. Suppl.*, no. 170, p. 377, 2007; E. Komatsu *et al.*, “Seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP). Observations: cosmological interpretation,” *Astrophys. J. Suppl.*, no. 192, p. 18, 2011.
- [3] Steven Weinberg, “The cosmological constant problem,” *Rev. Mod. Phys.*, no. 61, pp. 1-23, January 1989.
- [4] Edmund J. Copeland, M. Sami, and Shinji Tsujikawa, “Dynamics of dark energy,” *Int. J. Mod. Phys.*, no. D15, pp. 1753-1936, 2006.
- [5] D. Larson, J. Dunkley, G. Hinshaw, E. Komatsu, M. R. Nolta, *et al.*, “Seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP). Observations: Power Spectra and WMAP-derived parameters,” *Astrophys. J. Suppl.*, no. 192, p. 16, 2011.
- [6] Eric V. Linder, “The dynamics of quintessence, the quintessence of dynamics,” *Gen. Rel. Grav.*, no. 40, pp. 329-356, 2008; Bharat Ratra and P. J.

- E. Peebles, "Cosmological consequences of a rolling homogeneous scalar field," *Phys. Rev.*, no. D37, p. 3406, 1988.
- [7] Winfried Zimdahl and Diego Pavon, "Interacting quintessence," *Phys. Lett.*, no. B521, pp. 133-138, 2001; Luis P. Chimento, Alejandro S. Jakubi, Diego Pavon, and Winfried Zim-dahl, "Interacting quintessence solution to the coincidence problem," *Phys. Rev.*, no. D67, p. 083513, 2003; L. M. Reyes and Jose Edgar Madriz Aguilar, "Quintessence interacting dark energy and a scalar dark fluid from 5d vacuum," *Classical and Quantum Gravity*, vol. 28, no. 21, p. 215007, 2011.
- [8] C. Armendariz-Picon, Viatcheslav F. Mukhanov, and Paul J. Steinhardt, "Essentials of k-essence," *Phys. Rev.*, no. D63, p. 103510, 2001.
- [9] Martin Kunz, Andrew R. Liddle, David Parkinson, and Changjun Gao, "Constraining the dark fluid," *Phys. Rev.*, no. D80, p. 083533, 2009; Luz M. Reyes, Jose Edgar Madriz Aguilar, and L. Arturo Urena-Lopez, "Cosmological dark fluid from five-dimensional vacuum," *Phys. Rev.*, no. D84, p. 027503, 2011.
- [10] Thomas P. Sotiriou and Valerio Faraoni, "f(r) theories of gravity," *Rev. Mod. Phys.*, no. 82, pp. 451-497, Mar 2010.
- [11] Roy Maartens, "Brane world gravity," *t*, no. 7, p. 7, 2004.



La mujer en la ingeniería durante los últimos veinte años

REBECA DEL CARMEN ROMO VÁZQUEZ

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS COMPUTACIONALES,
CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍAS,
UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

AVENILDE ROMO VÁZQUEZ

CICATA UNIDAD LEGARÍA,
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

*“Existe un principio bueno que creó el orden,
la luz y el hombre, y un principio malo que creó el caos,
la oscuridad y la mujer”.*
Pitágoras, 582-507 a.C.

Introducción

Este artículo tiene por objetivo mostrar un panorama de la presencia de las mujeres en la ingeniería y la ciencia durante los últimos 20 años. Primero, se muestra una visión cuantitativa basada en estadísticas que ilustran la inclusión de las mujeres en dichas áreas, y posteriormente se presenta una visión cualitativa a partir de semblanzas de mujeres destacadas en la ciencia y en la ingeniería. Por último, se plantean algunas reflexiones basadas en los

reportes de la Unión Europea que muestran que estas áreas requieren de un trabajo social para ser cubiertas por jóvenes talentosas.

Nivel educativo de las mujeres y sus áreas de desarrollo

En los últimos años el rezago de las mujeres en lo que a educación se refiere ha ido disminuyendo. Sin embargo, ciertas áreas del conocimiento parecen mostrar diferencias muy marcadas entre la presencia de hombres y mujeres. Particularmente, el área de las ingenierías parecería todavía ser de un dominio masculino, muy rezagado en lo que a inclusión de las mujeres se refiere.

Según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en lo que a la educación superior se refiere y para la población de 25 años y más con al menos un grado aprobado en estos niveles, la diferencia por sexo se amplía en desventaja de las mujeres. Aunque esta distancia se ha reducido, ya que mientras en el año 2000 la brecha fue de cerca de cinco puntos porcentuales, disminuyó a la mitad en 2010, lo que indica 2.5 puntos de diferencia. La figura 1 muestra el porcentaje de la población de 25 años y más con educación superior según sexo en los años 2000 y 2010 [1].

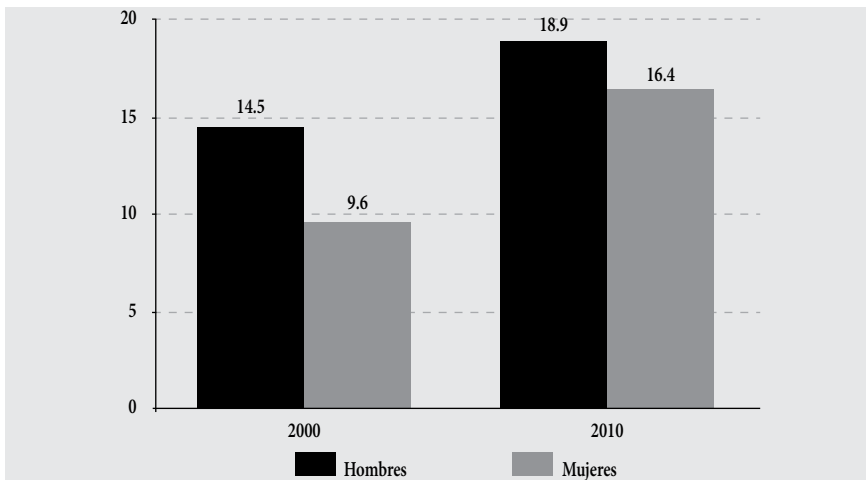


Figura 1. Porcentaje de la población de 25 años y más con educación superior según sexo, 2000 y 2010. Fuente: INEGI, XII Censo General de Población y Vivienda 2000, tabulados básicos; Censo de Población y Vivienda 2010, tabulados del cuestionario básico.

Observando la figura 1 puede concluirse que en los últimos años las mujeres han logrado tener un mayor acceso a la educación a nivel superior. La cuestión que surge tras esta conclusión es conocer en qué áreas del conocimiento se desempeñan las mujeres.

El INEGI reporta que en 2010 las mujeres de 18 años y más tienen mayor participación porcentual en el campo de las ciencias sociales, administración y derecho (44%); seguido del campo de la educación (17.2%). También los hombres se insertan en las ciencias sociales, administrativas y de derecho (37.5%), pero en menor medida que las mujeres; la siguiente área es la de ingeniería, manufactura y construcción (29.8%) [1]. En la figura 2 se puede observar la gráfica correspondiente a la distribución porcentual de la población de 18 años y más con educación superior según campos de formación académica y sexo, 2010.

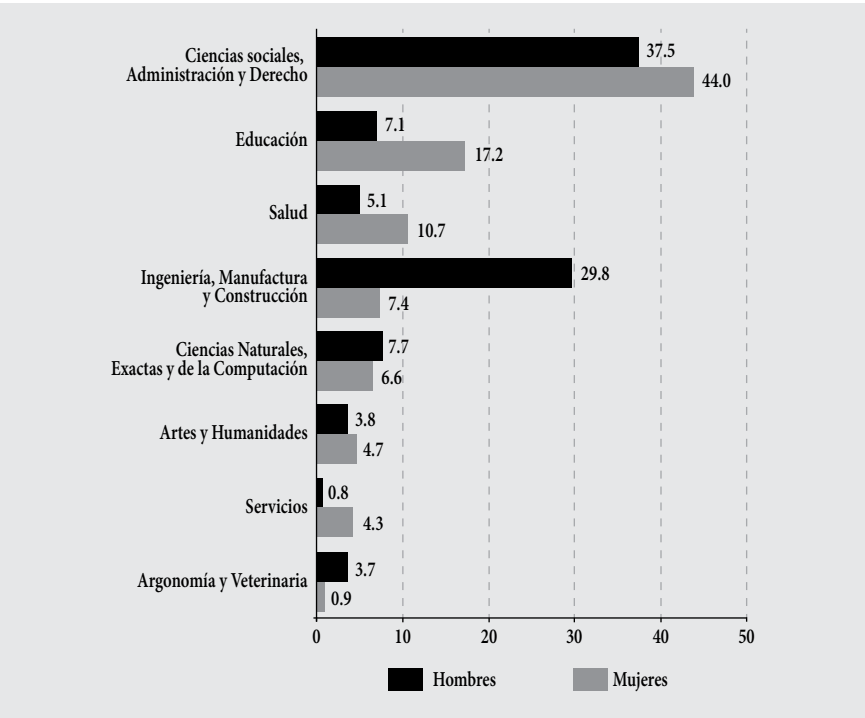


Figura 2. Distribución porcentual de la población de 18 años y más con educación superior según campos de formación académica y sexo 2010. Fuente: INEGI, Censo de Población y Vivienda 2010.

Las mismas tendencias se ven reflejadas en los miembros del Sistema Nacional de Investigadores (SNI). El registro del Foro Consultivo Científico y Tecnológico (FCCYT) [2] en 2013, indica que hoy en día 34% de los integrantes del SNI en México son mujeres. De las cuales sólo 20% se encuentran en el área de ingenierías (figura 3).

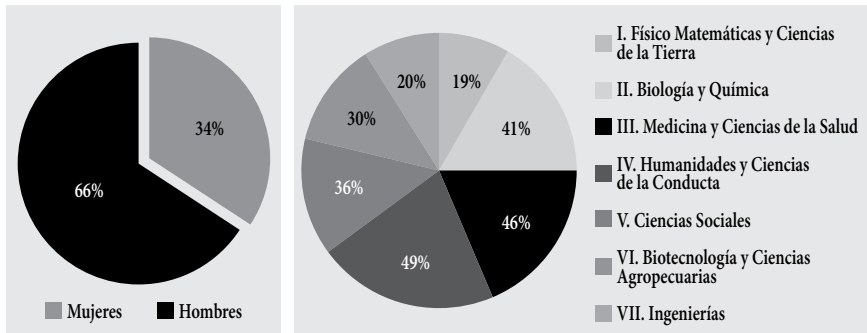


Figura 3. Mujeres integrantes del SNI por área.

Ser ingeniera y tener éxito en un mundo de hombres

Al observar en las estadísticas que las mujeres son una minoría en el área de la ingeniería a nivel mundial, surge la inquietud de saber si se puede tener éxito en un área dominada casi completamente por los hombres. Con la finalidad de responder dicha pregunta se presentan algunas semblanzas de mujeres que han sobresalido exitosamente en su profesión de ingenieras. Inicialmente se presenta la semblanza de dos ingenieras destacadas de otros países.



Bárbara Crawford Johnson

Formación: Fue la primera mujer en graduarse de ingeniería general en la Universidad de Illinois.

Trayectoria: Después de graduarse entró en el campo de la ingeniería aeroespacial de Rockwell Internacional. Es la única mujer que ha trabajado en el equipo de ingenieros de la NASA; por haberse encargado del

aterrizaje en la luna, Bárbara Johnson ocupa un lugar en la historia de la exploración espacial.

Distinciones: Recibió el premio “Dick Brewer”, de la Sociedad Astronáutica Americana. Recibió el premio al mérito del avance de la ingeniería.



Ada Yonath

Estudio: Química en la Universidad Hebrea de Jerusalén; maestría en bioquímica y doctorado en cristalografía en el Instituto Weizmann de Ciencias.

Es reconocida por sus trabajos pioneros en la estructura de los ribosomas. En 1970 estableció el único laboratorio de cristalografía de proteínas en Israel. Entre 1986 y 2004 dirigió las Unidades de Investigación

Max Planck de Estructura Molecular Genética en Hamburgo, Alemania.

Dirige desde 1988 el Centro Helen & Milton Kimmelman de Estructura Biomolecular del Instituto Weizmann de Ciencias. Ha sido docente en varias Universidades de Israel y ha trabajado, además en Estados Unidos, en Alemania y Francia.

Ingenieras mexicanas destacadas

En México existen ingenieras destacadas, pero siguen siendo una gran minoría. Podemos encontrar las ingenieras que se desarrollan dentro del campo laboral propio de la ingeniería y las ingenieras investigadoras. Presentamos la semblanza de dos ingenieras mexicanas destacadas.



Sonia Elda Ruiz Gómez

Primera mujer egresada de la Escuela de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Guadalajara, doctora en Ingeniería (Estructuras) por la UNAM.

Trayectoria: Es investigadora del Instituto de Ingeniería y profesora de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Ha dirigido 76 tesis (licenciatura, maestría y doctorado).

Fue Presidenta de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, A. C. Coordinadora de Investigación y Desarrollo Tecnológico de

la Academia de Ingeniería, A. C. Actualmente es Presidenta de la Comisión de Especialidad de Ingeniería Civil de esta Academia.

Distinciones: Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores Nivel II. Recibió el Premio *Nabor Carrillo Flores* a la Investigación 2010, que otorga el Colegio de Ingenieros Civiles de México (CICM) A.C. Recibió el premio Montblanc como Mujer Montblanc que Abrió Camino (2006). Obtuvo el Premio José A. Cuevas por el mejor artículo de Ingeniería Civil (2003-2004).



Verónica Medina Bañuelos

Formación: Grado en Ingeniería Biomédica por la UAM. Maestría en Ingeniería Biomédica UAM. Doctorado en Ingeniería Biomédica en la Université de Technologie de Compiègne (UTC), Francia.

Trayectoria: Actualmente es profesora-investigadora en el Departamento de Ingeniería Eléctrica UAM. Directora de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería de la UAM de 2006 a Abril de 2010. Coordinadora de la Licenciatura en Ingeniería Biomédica (1985-1988). Jefa del Área de Procesamiento Digital de Señales e Imágenes Biomédicas (1993-1998), Coordinadora del Posgrado en Ingeniería Biomédica (1999-2002).

Ingenieras destacadas en la División de Electrónica y Computación del CUCEI

La presencia de ingenieras investigadoras en la DIVEC del CUCEI cumple las estadísticas mostradas y es muy pobre. Sin embargo, se cuenta con destacadas ingenieras que han sido reconocidas con importantes distinciones. Se presenta la semblanza de la Dra. Alanis, quien a pesar de ser una joven investigadora cuenta con una destacada trayectoria.



Alma Alanís

Formación: Ingeniería Eléctrica, Instituto Tecnológico de Durango. Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, CINVESTAV Unidad Guadalajara, Doctorado en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, CINVESTAV Unidad Guadalajara.

Trayectoria: Destacada investigadora en modelado y control inteligente y su aplicación a sistemas Auto-

máticos de Control. Editor asociado del “Journal of the Franklin Institute”, Franklin Institute, Estados Unidos. Vocal de la Asociación de México de Control Automático AMCA.

Distinciones: Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores - Nivel I. Nominación al mejor artículo estudiantil en el ISIC 2006 de la IEEE Control Systems Society Alemania, IEEE. 2002 Medalla al merito académico: Ing. José Gutiérrez Osornio 2002 ITD México, INSTITUTO TECNOLÓGICO DE DURANGO. 2001 Reconocimiento al mérito académico 2001 Senador Ismael Hernández FORO DE PROFESIONALES Y TÉCNICOS. 2013 Beca para las Mujeres en la Ciencia L’Oréal-UNESCO AMC.

Por qué las jóvenes talentosas no eligen como profesión la ingeniería

Existen distintos reportes que indican que en varios países alrededor del mundo pocos estudiantes —particularmente mujeres— eligen estudiar carreras universitarias relacionadas con ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas [3-5].

Atraer a más jóvenes hacia este tipo de carreras científicas es una preocupación generalizada, debido al importante rol que estas áreas tienen en el desarrollo de las sociedades modernas; además, existe un interés particular en involucrar a las mujeres en este tipo de carreras, para así tratar de producir una fuerza de trabajo científica balanceada y diversa en términos de género.

Consideramos que este escrito permite mostrar a las jóvenes talentosas que decidirse por estas carreras puede llevarlas a tener una vida profesional llena de satisfacciones.

Referencias

- [1] Instituto Nacional de Estadística y Geografía, *Mujeres y hombres en México 2011*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía/Instituto Nacional de las Mujeres, 2012. [En línea.] Disponible en: www.inegi.org.mx.
- [2] Foro Consultivo Científico y Tecnológico, A.C., 2014. [En línea.] disponible en: <http://www.foroconsultivo.org.mx>.
- [3] J. S. Eccles, "Where are all the women? Gender differences in participation in physical science and engineering," in *Why Aren't More Women in Science? - Top Researchers Debate the Evidence*, S. J. Ceci y W. M. Williams (Eds.). Washington, D.C.: American Psychological Association, 2007, pp. 199-210.
- [4] European Commission, *She Figures 2012. Gender in Research and Innovation. Statistics and Indicators*. Bruselas: Author, 2012. [Online.] Available: <http://goo.gl/wAenA>.
- [5] D. D. Stine and C. M. Matthews, "The U.S. Science and Technology Workforce," Washington, D. C., Congressional Research Service, 2009. [Online.] Available: <http://www.fas.org/sgp/crs/misc/RL34539.pdf>.

Autores

ALONSO CASTILLO PÉREZ

Egresó de Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica y de la Maestría en Ingeniería Eléctrica, de la Universidad de Guadalajara. Ha sido profesor de primaria, en la Normal Superior, en las escuelas de Ingeniería y Ciencias, en diversas maestrías y en un doctorado de ingeniería. Es autor de libros de texto de matemáticas, historia de la educación en México e ingeniería eléctrica. Se ha desempeñado como Director de la Facultad de Ciencias y de diferentes Divisiones relacionadas con la ciencia y la tecnología en la Universidad de Guadalajara.

MÓNICA JUDITH DURÓN GONZÁLEZ

Egresó de Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica y de la Maestría en la Enseñanza del Inglés como Lengua Extranjera, de la Universidad de Guadalajara. Su experiencia docente incluye la impartición de cursos en inglés como lengua extranjera para estudiantes de niveles de educación básica, media superior y superior, así como materias en el campo de los sistemas digitales. Se ha desempeñado como coordinador de carrera y actualmente ocupa el cargo de Secretario de la División de Electrónica y Computación, en el Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, de la Universidad de Guadalajara.

EDWIN CHRISTIAN BECERRA ALVAREZ

Recibió el grado de Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica de la Universidad de Guadalajara, México en 2004, el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica del CINVESTAV, México en 2006 y el grado de Doctor en Microelectrónica de la Universidad de Sevilla, España en 2010. Desde 2010 ha estado trabajando en la Universidad de Guadalajara, donde su línea de investigación se centra en los circuitos CMOS de radio frecuencia.

MARÍA SUSANA RUÍZ PALACIOS

Ha realizado estancias en la Universidad de las Baleares y en el Centro de Diseño de Telecomunicaciones (ITESM). Es Doctor en Ingeniería, su investigación la realiza en el área de RF, microondas y antenas. Fue distinguida como ingeniero del año en 1999 por el IEEE. Ha publicado 3 libros en su área, ha publicado más de 20 artículos científicos y ha sido responsable de diferentes proyectos con el sector productivo.

MARTÍN JAVIER MARTÍNEZ SILVA

Es profesor del Centro Universitario Ciencias Exactas e Ingenierías de la Universidad de Guadalajara. Su experiencia docente incluye cursos en electrónica, antenas y circuitos de alta frecuencia en licenciatura y posgrado. Ha participado en diversos proyectos de investigación cuyos resultados han sido publicados y se encuentran disponibles en bases de datos internacionales. Su área de investigación está en el diseño de circuitos pasivos y activos de radiofrecuencia y microondas, así como antenas.

HORACIO SOTO ORTIZ

Es Doctor en Ciencias con especialidad en optoelectrónica de la Escuela Nacional Superior de Telecomunicaciones de París y nivel II del SNI. Cuenta con más de 80 publicaciones y 450 citas a sus trabajos. Actualmente es Investigador Titular del CICESE, donde funge como responsable del grupo de Funciones Optoelectrónicas y del Laboratorio de Redes Fotónicas.

STEWART RENÉ SANTOS ARCE

Obtuvo el grado de Doctor en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Eléctrica del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del I.P.N., Unidad Guadalajara. Actualmente se desempeña como Profesor-Investigador en el Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería (CUCEI) de la Universidad de Guadalajara. Sus principales intereses de investigación se enfocan en computación neuronal paralela para señales digitales en tiempo real aplicados al procesamiento, análisis y extracción de características de imágenes de percepción remota.

ALONSO CASTILLO RAMÍREZ

Egresó de la Licenciatura en Matemáticas de la Universidad de Guadalajara, y de la Maestría y el Doctorado en Matemáticas del *Imperial College London*. Ha hecho estancias posdoctorales en la Universidad de Zaragoza y la Universidad de Durham. Sus líneas de investigación son teoría de grupos, álgebras no asociativas y computación teórica. Es miembro nivel I del SNI.

AURORA ESPINOZA VALDEZ

Recibió el grado de Licenciada en Matemáticas Aplicadas en la Universidad Autónoma de Baja California, el grado de Maestra en Ciencias Aplicadas en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y el grado de Doctora en Ciencias

en el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI). Su interés de investigación es el modelamiento matemático de sistemas biológicos y sistemas dinámicos.

GUILLERMO OBREGÓN PULIDO

Egresó de la Universidad de Guadalajara de la Carrera de Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica en el año de 1997. Realizó una maestría en Ingeniería Eléctrica y un Doctorado en la misma especialidad, los cuales terminó en los años de 1999 y 2003 respectivamente. Actualmente se desarrolla como profesor investigador del departamento de Electrónica de la Universidad de Guadalajara, siendo autor de varios artículos en revista indexada, así como autor en varios congresos de nivel nacional e internacional.

ALMA YOLANDA ALANÍS GARCÍA

Es Doctor en ciencias por el Centro de investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV), Unidad Guadalajara, México, desde 2007. Actualmente trabaja como Profesor-Investigador en el Departamento de Ciencias Computacionales del Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías de la Universidad de Guadalajara. Es miembro nivel I del SNI y cuenta con el reconocimiento perfil PRODEP. Tiene la distinción “Senior Member” de la IEEE. Ha realizado diversas publicaciones en casas editoriales de reconocido prestigio internacional, incluyendo dos libros. Actualmente es editor asociado del “Journal of Franklin Institute” (elsevier) y del “Intelligent Automation & Soft Computing” (Taylor and Francis), ambas revistas indexadas en el JCR. Sus intereses de investigación son: modelado y control neuronal (“backstepping”, control por bloques, control óptimo inverso), entre otros, así como su aplicación a sistemas Automáticos de Control.

EDGAR NELSON SÁNCHEZ CAMPEROS

Se tituló de Ingeniero Electricista en la Universidad Industrial de Santander (UIS), Bucaramanga, Colombia in 1971; obtuvo el título de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en el CINVESTAV-IPN, México, D.F. en 1974 y el Doctorado en Ingeniería en el “Institut Nationale Polytechnique de Grenoble”, France en 1980. Actualmente es profesor investigador del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Ciencias Computacionales del CINVESTAV-IPN, Unidad Guadalajara. Sus actividades de investigación están relacionadas con control inteligente, en

particular utilización de redes neuronales y lógica difusa a sistemas de control automático aplicados a energía renovable, salud y medio ambiente.

NANCY ARANA DANIEL

Recibió el grado de Maestro en Ciencias Computacionales en 2003 y el grado de Doctor en Ciencias Computacionales en 2007, ambos en el Centro de investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV), Unidad Guadalajara, México. Actualmente es profesor investigador en el Departamento de Ciencias Computacionales de la Universidad de Guadalajara, donde además trabaja con otro grupo de investigadores en el área de sistemas inteligentes. Sus líneas de investigación se enfocan al álgebra geométrica, machine learning, visión computacional, reconocimiento de patrones y navegación de robots visualmente guiada.

LUIS ALBERTO CASILLAS SANTILLÁN

Licenciado en Informática y Maestro en Sistemas de Información (UdeG), Máster, Diploma de Estudios Avanzados y Doctor en Sociedad de la Información y el Conocimiento (UOC). Tiene más de 20 años dedicándose a la docencia. Ha publicado de varios trabajos científicos relacionados a la gestión y representación del conocimiento. Es revisor de publicaciones científicas en las mismas áreas de conocimiento, para diferentes journals, congresos (nacionales e internacionales) y libros científicos.

ALFREDO GUTIÉRREZ HERNÁNDEZ

Es Doctor en Ingeniería de Proyectos y Sistemas por la Universidad Politécnica de Cataluña, explotando la línea de Innovación en Internet. Es profesor de Tiempo Completo en el Departamento de Ciencias Computacionales del CUCEI - Universidad de Guadalajara. Lideró el proyecto de Educación Virtual en la Secretaría de Educación Jalisco, y formó parte del proyecto TARIFA, en la Fundación I2Cat en Barcelona, enfocado en temas de Internet del Futuro.

CARLOS ALBERTO LÓPEZ FRANCO

Obtuvo su grado de doctor por el CINVESTAV del Instituto Politécnico Nacional en 2007. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores de México (SNI nivel 1). Es *Senior Member* de la IEEE. Perteneció al Cuerpo Académico de Sistemas Inteligentes, nivel Consolidado. Sus áreas de interés actuales incluyen la

visión computacional y la robótica, así como su aplicación a robots de búsqueda y rescate.

EDUARDO GERARDO MENDIZABAL RUIZ

Recibió el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones en 2003 por el ITESO. En 2007 recibió el grado de Maestro en Computación y Matemáticas Industriales por el CIMAT y en 2012 obtuvo el grado de Doctor en Ciencias con especialidad en Computación por la Universidad de Houston. Actualmente es profesor investigador de la Universidad de Guadalajara. Líneas de investigación: visión computacional, realidad virtual y aumentada, el análisis de DNA, la generación de metabolismos artificiales y la combinación de música, matemáticas y computación.

EMMANUEL NUÑO ORTEGA

Obtuvo el grado de Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica, por la Universidad de Guadalajara, en el 2002. En el 2005, obtuvo el Diploma de Estudios Avanzados en el área de Ingeniería de Sistemas y Automática y, en el 2008, culminó su Doctorado en Ciencias de la Automatización Avanzada y Robótica, ambos por la Universidad Politécnica de Cataluña. Desde el 2009 es Profesor Investigador en el Departamento de Ciencias Computacionales del CUCEI, UdeG. Actualmente, es miembro del SNI Nivel 1, cuenta con el perfil PRODEP y pertenece al Cuerpo Académico Consolidado “Sistemas Inteligentes”.

ADRIANA PEÑA PÉREZ NEGRÓN

Recibió el grado de Doctora en Ingeniería de la Informática por la Universidad Politécnica de Madrid, haciendo una estancia de investigación en el Centro de Realidad Virtual de la Universidad de Salford del Reino Unido para obtener la mención de “Doctor Europeo”. Su interés está en el área de la realidad virtual multiusuario, particularmente la interacción entre usuarios.

ISRAEL ROMÁN GODÍNEZ

Ingeniero en Sistemas por el Instituto Tecnológico de Zacatepec (2004). Maestro en Ciencias de la Computación por el Centro de Investigación en Computación del Instituto Politécnico Nacional (CIC-IPN) (2007). Doctor en Ciencias de la Computación por el CIC-IPN (2011). Actualmente es Profesor Investigador Titular del Departamento de Ciencias Computacionales de la Universidad de

Guadalajara. Líneas de Investigación: Machine Learning, Reconocimiento de Patrones, Bioinformática.

SULEMA TORRES RAMOS

Licenciada en Informática por la Universidad Autónoma de Sinaloa (2004). Maestra en Ciencias de la Computación por el Centro de Investigación en Computación del Instituto Politécnico Nacional (CIC-IPN) (2006). Doctora en Ciencias de la Computación por el CIC-IPN (2010). Líneas de Investigación: Lingüística Computacional, Procesamiento Automático de Textos, Machine Learning. Actualmente es Profesora Investigadora de la Universidad de Guadalajara y miembro del Sistema Nacional de Investigadores (Nivel C).

SILVIA MORA LEE

Es Química Farmacéutica Biológica por la Universidad Veracruzana, México, Maestra en Farmacia por la Universidad de Guadalajara, México; DEA (Diploma de Estudios Avanzados en Biomedicina Experimental por la Universidad de Castilla La Mancha, España; Doctora en Ciencias Orientación en Terapia Celular en Neurociencias por la Universidad de Navarra España. Profesor-Investigador de Tiempo completo en la Universidad de Guadalajara, México. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel I. Líneas de Investigación Terapia Celular, Enfermedades Crónicas-degenerativas, Aplicaciones de Nanotecnologías y Neurobiopsicología.

PAOLA BEATRIZ CASTRO GARCÍA

Es Profesor-Investigador en la Universidad de Guadalajara/CUCEI/Departamento de Ciencias Computacionales (Laboratorio de Terapia celular e Innovación Biotecnológica, Jalisco. México). Posdoctoral en la Universidad de Hokkaido, Japón. Division of Stem Cell Biology (Institute for Genetic Medicine). Doctorado Europeo en Biomedicina Experimental por La UCLM, Centro Regional de Investigaciones Biomédicas(CRIB). Castilla-La Mancha. España.

JOSÉ ALEJANDRO MORALES VALENCIA

Es investigador fundamentalmente interdisciplinario, comenzó como Médico y posteriormente se doctoró en el área de Genética Humana. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores desde 2008 y desde que comenzó su trabajo científico ha participado en foros de Medicina, Genética, Biología, Química,

Ingeniería, Electrónica, Computación, Matemáticas, Neurociencias, Psicología y Filosofía. Es especialista en las áreas de Biología Teórica, Sistemas en Biología y Biología Sintética.

HUGO ABRAHAM VÉLEZ PÉREZ

Es Ingeniero en Biónica, egresado de la UPIITA-IPN. Graduado como Maestro en Ciencias por parte de la Sección de Bioelectrónica, del CINVESTAV-IPN. El grado de Doctor en Ciencias lo obtuvo en la Universidad de Lorraine en Nancy, Francia. Actualmente se desempeña como profesor-investigador del Departamento de Ciencias Computacionales en el CUCEI-UDG. Sus líneas de investigación se inscriben en el Procesamiento de Señales Electrofisiológicas y Genómicas así como en la Biomecánica.

JUAN CARLOS DEGOLLADO DAZA

Obtuvo su doctorado en Ciencias (Física) por la Universidad Nacional Autónoma de México en 2010. Es experto en Relatividad Numérica y sus líneas de investigación involucran: física fundamental de agujeros negros, ondas gravitacionales, métodos numéricos de alta precisión, cómputo de alto rendimiento y visualización científica. A la fecha se desempeña como profesor-investigador en el Departamento de Ciencias Computacionales del Centro de Ciencias Exactas e Ingenierías de la Universidad de Guadalajara.

LUZ MARINA REYES BARRERA

Ingeniera Electrónica, Universidad de Pamplona, Colombia. Especialista en Teleinformática, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Magister Scientiae en Física Fundamental, Universidad de los Andes, Venezuela. Doctor en Física, Universidad de Guanajuato, México. Miembro SNI Nivel I. Perfil deseable PROMEP. Líneas de investigación: Modelos teóricos cosmológicos para explicar la expansión acelerada actual del Universo. Modelos biofísicos utilizando sistemas complejos.

REBECA DEL CARMEN ROMO VÁZQUEZ

Egresó de la Licenciatura en Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica, Universidad de Guadalajara, en 2002. Egresó de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, Centro de Investigación y Estudios avanzados del I.P.N., México, D.F., en 2005. Obtuvo el Doctorado en Ciencias Especialidad Automática y

Tratamiento de Señal, Institut National Polytechnique de Lorraine, Meurthe Et Moselle, Francia, en 2010 y el Postdoctorado de Investigación, Institut National Polytechnique de Lorraine, Meurthe Et Moselle, Francia, en 2010. Es miembro SNI, Nivel 1 y tiene el Perfil Deseable PROMEP. Líneas de Investigación: procesamiento digital de señales biomédicas y, en lo particular, en el pre-tratamiento de registros de electroencefalografía (EEG).

AVENILDE ROMO VÁZQUEZ

Egresó de la Licenciatura en Matemáticas de la Universidad de Guadalajara, de la Maestría del CINVESTAV y del Doctorado en Didáctica de las Matemáticas de la Universidad Denis Diderot - París 7. Labora en CICATA-IPN. Es miembro del equipo editorial de la revista Educación Matemática. Una de sus líneas de investigación es el desarrollo profesional de profesores de matemáticas. Es miembro nivel I del SNI.

Coordinación editorial
Sol Ortega Ruelas

Diseño y diagramación
Paola Enedina Vázquez Murillo

***La electrónica y las ciencias computacionales en los
últimos veinte años***

se terminó de editar en octubre de 2015
en las oficinas de Hipertexto – Netizen Digital Solutions
proyectos.mexico@hipertexto.com.co
+52 (55) 7827 7068

En la formación de este libro se utilizaron familias
tipográficas Minion Pro, diseñada por Robert Slimbach,
y Ronnia, diseñada por Veronika Burian y José Scaglione.