

Nanociencia y nanotecnología en carreras de ingeniería

Sandra M. Mendoza

Facultad Regional Reconquista, CONICET, Universidad Tecnológica Nacional, Reconquista, Argentina. smendoza@frrq.utm.edu.ar

Resumen— La nanociencia y la nanotecnología son campos interdisciplinarios de la ciencia y la tecnología que han tenido un gran impacto en las últimas décadas. Si bien sus aplicaciones aparecen en todas las ramas de la ingeniería, la formación en nanotecnología para ingenieros se suele restringir a cursos de posgrado. Por ello resulta necesario introducir la temática en etapas de formación más tempranas. En consecuencia, este trabajo presenta un diseño curricular para la enseñanza de nanociencia y nanotecnología en carreras de ingeniería, a nivel de grado. La propuesta se puede incorporar en carreras de ingeniería diversas y fue recientemente implementada en el programa de ingeniería electromecánica de la Universidad Tecnológica Nacional.

Palabras Clave— nanociencia; nanotecnología; ingeniería; diseño curricular.

Recibido: 10 de octubre de 2017. Revisado: 12 de diciembre de 2017. Aceptado: 5 de febrero de 2018.

Nanoscience and nanotechnology for engineering education

Abstract— Nanoscience and nanotechnology are interdisciplinary fields of science and technology that have had great impact in recent decades. While applications appear in all branches of engineering, education in nanotechnology for engineers is usually restricted to postgraduate courses. Therefore, it is necessary to introduce the subject at earlier stages of formation. Thus, this paper presents a curricular design for introducing nanoscience and nanotechnology to undergraduate engineers. The proposal can be incorporated into various engineering careers and was recently implemented in the program of Electromechanical Engineering of the Universidad Tecnológica Nacional.

Keywords— nanotechnology; nanoscience; engineering; curricular design.

1. Introducción

La nanociencia y la nanotecnología son campos interdisciplinarios de la ciencia y la tecnología que involucran temáticas tales como química, física, biología, electrónica, medicina e ingeniería. El término “nanociencia” se refiere al estudio de la materia en el rango de 1 a 100 nm, donde un nanómetro es la mil millonésima parte de un metro ($1 \text{ nm} = 10^{-9}$). Su significado se ilustra en la Fig. 1 [1]. La nanociencia es particularmente distintiva de otras disciplinas científicas debido a que, a escala nanométrica, se pueden observar fenómenos que no se perciben a escalas macroscópicas. Estos fenómenos muchas veces no se pueden explicar mediante las leyes de la física clásica, sino que se estudian mediante la mecánica cuántica [2]. Los nanomateriales y las superficies nanoestructuradas presentan una relación superficie/volumen

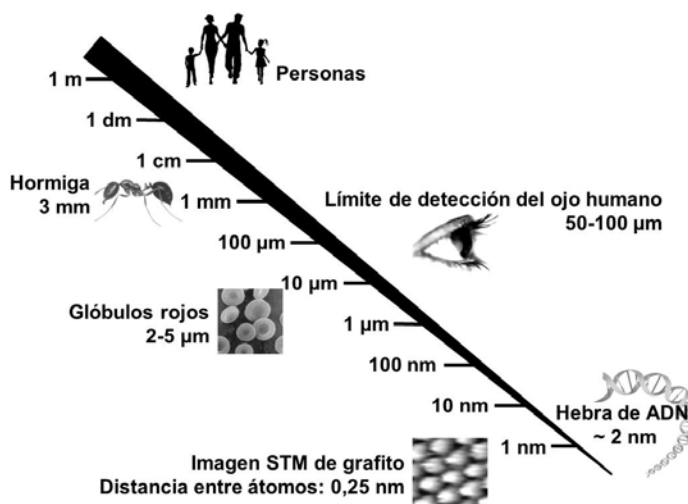


Figura 1. Un nanómetro es la mil millonésima parte de un metro. Fuente: La autora.

muy alta, es decir que los átomos de la superficie se encuentran en cantidades significativas, por lo que dominan las propiedades del material.

El término “nanotecnología” se refiere a la manipulación y control de la materia a escala nano, para influir sobre propiedades que tienen aplicaciones a escala macroscópicas, e involucra el dominio de las técnicas empleadas para tal fin [3]. La National Nanotechnology Initiative (NNI) de Estados Unidos la define como ciencia, ingeniería y tecnología llevada a cabo en la nanoescala, la cual se considera entre alrededor de 1 a 100 nm [4]. Esta última definición, que es más amplia y actual, menciona el término “ingeniería”, destacando su importancia en la temática.

Estos campos de la ciencia y la tecnología comenzaron a tener un gran auge en los últimos años gracias al desarrollo de nuevas herramientas para estudiar la materia a escala atómica y molecular. El microscopio de efecto túnel (STM, por su sigla en inglés) fue sin dudas un disparador en tal sentido.

La construcción de nanodispositivos es un desafío para la nanotecnología, pero en los últimos años se han logrado avances que prometen un sin fin de aplicaciones [5-7]. Aunque muchas de ellas están aún en fase de investigación, otras ya impactan en el sector productivo como por ejemplo para

Como citar este artículo: Mendoza, S.M., Nanociencia y nanotecnología en carreras de ingeniería. Educación en Ingeniería, 13(25), pp. 117-122, Febrero, 2018.

almacenamiento de información, biotecnología, medicina, cosmética, electrónica y energía [8]. Hay muchos productos en el mercado que contienen nanomateriales [9] y son cada vez más los entes gubernamentales e internacionales que promueven el avance de la ciencia y el progreso de la tecnología en este rubro [10]. Latinoamérica no es ajena a esta realidad y son varias las iniciativas en la misma dirección [11,12]. La visibilidad de las innovaciones latinoamericanas en el rubro se pone de manifiesto en el número de patentes [13].

Las carreras de ingeniería generalmente no contemplan la formación en nanotecnología durante sus cursos de grado. Este tipo de formación se suele impartir en cursos de posgrado. Pero hay excepciones [10,14-17] e incluso algunas instituciones proponen incluir la nanotecnología ya en la educación primaria, de manera similar a la enseñanza del cálculo, la geometría o la biología [10,18]. Incorporar conceptos de nanotecnología en carreras de grado contribuye a que los futuros ingenieros cuenten con herramientas para llevar a la práctica los rápidos avances científicos. En Latinoamérica existe un gran potencial para desarrollar nuevos espacios formativos.

A continuación se describen los lineamientos del plan curricular propuesto para carreras de ingeniería de la Universidad Tecnológica Nacional. El espacio formativo fue recientemente implementado en la carrera de Ingeniería Electromecánica, aunque no se limita a ésta. La propuesta que aquí se expone sirve de base para ser adaptada a cualquier carrera de ingeniería.

2. Objetivos: brindar herramientas de nanotecnología para futuros ingenieros

El plan curricular corresponde a un espacio formativo destinado a complementar y actualizar carreras de grado en ingeniería. El conocimiento ganado será particularmente relevante para ingenieros que tengan que trabajar en la selección y aplicación de materiales. Como el empleo de materiales – y nanomateriales – es transversal a todas las áreas tecnológicas, el contenido se puede adaptar a cualquier carrera de grado relacionada con las ciencias exactas y naturales. Este es el caso de los ingenieros en materiales, químicos, civiles, mecánicos, eléctricos o bioingenieros, por citar algunos ejemplos. En otras palabras, la enseñanza de la nanotecnología resulta de interés para todas las carreras de ingeniería.

Además de impartir contenidos teóricos, el espacio formativo debe proporcionar herramientas para que los alumnos conozcan el lenguaje técnico de la disciplina, lo que contribuirá a mejorar la comunicación del ingeniero tanto con los científicos como con la sociedad. Así, el ingeniero será una vez más el puente conector entre la ciencia y las demandas tecnológicas. Se pretende que los alumnos sean capaces de seleccionar y aplicar el conocimiento científico para poder brindar soluciones a los desafíos tecnológicos del siglo XXI. Se destaca la importancia de permanecer actualizados con respecto a los avances en el desarrollo de nuevos materiales. Esto implica discutir temas tales como propiedad intelectual, publicaciones científicas y transferencia de tecnología.

El nivel de complejidad con que se aborde cada tema depende de los conocimientos previos de los alumnos. Está

adaptado a una audiencia de estudiantes de ingeniería que hayan completado los cursos universitarios de matemáticas, física, química, termodinámica, estadística e inglés como idioma extranjero. En general, la bibliografía disponible existe en forma de publicaciones científicas y textos preparada para cursos altamente especializados o de posgrado. Es así que la implementación del plan curricular requiere seleccionar y producir bibliografía adaptada a los conocimientos previos y el perfil del futuro profesional.

Brindar herramientas de nanotecnología para futuros ingenieros ha sido el objetivo en la Universidad Tecnológica Nacional, a través de la experiencia que se comenta en la sección 4. Pero, como se ha mencionado antes, es válido para complementar y actualizar otras carreras de grado en ingeniería.

3. Contenidos principales. Fundamentos

En este trabajo se propone abordar la enseñanza de la nanociencia y la nanotecnología a través de un curso de grado organizado en cuatro ejes temáticos, que están íntimamente relacionados entre sí a la hora de comprenderlos y llevarlos a la práctica, como si fueran piezas de un rompecabezas (Fig. 2):

- 1) Introducción a la nanoquímica y a la nanofísica
- 2) Técnicas de miniaturización y manufactura
- 3) Técnicas de caracterización de nanomateriales y superficies
- 4) Dispositivos nanométricos y máquinas moleculares.

En los siguientes párrafos se detallan los contenidos mínimos de cada sección y los fundamentos que justifican su importancia. Cabe notar que los contenidos específicos se pueden adaptar a los intereses de la audiencia y de la carrera de ingeniería.

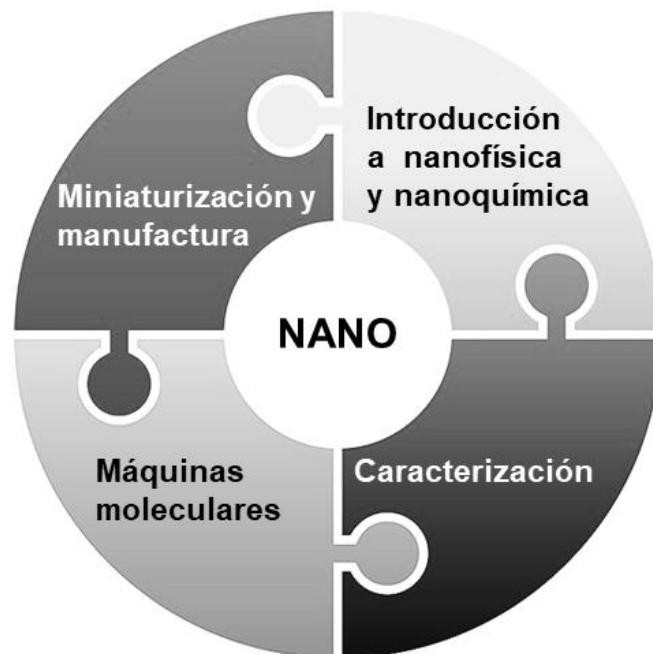


Figura 2. Ejes temáticos para la enseñanza de nanociencias y nanotecnología en carreras de ingeniería.
Fuente: La autora.

3.1. *Introducción a la nanoquímica y a la nanofísica*

El curso comienza con una introducción sobre el significado y los alcances de la nanociencia y la nanotecnología, enfatizando su importancia en aplicaciones ingenieriles y el trabajo interdisciplinario entre diversos grupos de investigación. Para ello se analiza la diferencia entre ciencia y tecnología. También se debate sobre el significado de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i). El vínculo entre estos tres conceptos se pone de manifiesto mostrando casos de éxito donde la evolución de una idea o descubrimiento resulta en una nueva tecnología o un producto en el mercado.

Para comprender fenómenos que ocurren en la nanoescala, es necesario revisar conceptos de física y química, como ser estructura cristalina de superficies, rugosidad, hidrofobicidad, espectro electromagnético, cuantización de la energía, fenómenos de adsorción y emisión de radiación, conductividad eléctrica por efecto túnel, fuerzas electrostáticas entre átomos y moléculas, reacciones químicas en superficies, y autoensamblado de moléculas. Aquí resulta indispensable explicar y hacer uso de conceptos que derivan de la física cuántica, aunque sin profundizar en formalismos matemáticos, los que se podrán desarrollar en cursos de postgrado.

Como el comportamiento de los nanomateriales depende de las propiedades de átomos de la superficie, en esta etapa del curso se llevan a cabo ejercicios matemáticos que contribuyan a comparar la relación superficie/volumen a macro- y nanoescalas, y evidenciar su influencia en las propiedades de los materiales. También se presentan los nanomateriales más estudiados en los últimos años y se debate sobre sus aplicaciones. Algunos ejemplos son fullerenos, nanotubos de carbono, grafeno, nanopartículas, puntos cuánticos y dendrímeros.

3.2. *Técnicas de miniaturización y manufactura*

Gracias a los avances en técnicas de manufactura es posible crear estructuras cada vez más pequeñas. Los denominados métodos “top-down” permiten crear nanomateriales y nanoestructuras a partir de un bloque de material más grande. Es posible por ejemplo gastar y grabar formas diminutas en una planchuela de silicio para hacer chips, los que luego se utilizan en dispositivos electrónicos. Las mejoras en tecnología informática de los últimos 60 años ocurrieron gracias a la miniaturización. Las limitaciones que presentan las técnicas top-down son una de las principales razones por las cuales muchos científicos están investigando cómo fabricar a escala nano mediante aproximaciones del tipo “bottom-up”, que significa unir átomos y moléculas individuales de manera controlada para formar estructuras más grandes. Para idear nuevos métodos de producción, ellos exploran los principios de la biología, las reacciones químicas y las fuerzas físicas, que son las técnicas de manufactura que utiliza la naturaleza.

Esta sección del curso está dedicada a describir algunas de las técnicas y tecnologías más representativas. Un grupo de técnicas de tipo top-down muy difundido es la litografía, donde las nanolitografías y la fotolitografía se utilizan ampliamente en la industria de los semiconductores. Entre los métodos de tipo

bottom-up más difundidos a escala industrial se encuentran los de deposición química y física en fase vapor (CVP y PVD, por sus siglas en inglés). A escala de laboratorio, el auto-ensamblaje ofrece gran potencial. En el método de auto-ensamblaje, nano-objetos elementales, tales como moléculas y nanopartículas, se unen espontáneamente para formar estructuras más grandes, sin la intervención directa del hombre.

Los instrumentos utilizados para la caracterización y manipulación de nanomateriales con frecuencia hacen uso de condiciones de vacío, y a veces ultra alto vacío (UHV). Se utiliza UHV para preparar películas delgadas por medio de CVD o PVD, así como también en equipos que hacen uso de haces de iones o electrones. Las condiciones de UHV son necesarias cuando se requiere que el camino libre medio de las partículas (iones, electrones, átomos o moléculas) sea mayor a las dimensiones del equipo, para evitar colisiones y pérdidas de energía. Este requisito generalmente se satisface con presiones del orden de 10^{-6} Torr, que se considera un rango de vacío medio. Algunas veces un vacío medio resulta insuficiente. Por ejemplo, cuando se desea analizar nanomateriales o películas ultra delgadas, es necesario que la superficie esté limpia a nivel atómico. Es decir que se necesitan condiciones de vacío que eviten la acumulación de contaminación a niveles despreciable, al menos durante el lapso de tiempo para realizar el experimento. Este requisito se logra trabajando en condiciones de vacío aún más rigurosas, que en la práctica se consiguen con presiones bases del orden de 10^{-10} Torr, valor que cae en el régimen de UHV.

Por lo antes mencionado, en el curso también se discute sobre tecnologías de UHV y se muestra su importancia para la síntesis, la caracterización y la manipulación de nanomateriales. Se tratan temas tales como definición de vacío, rangos operativos de presiones, tipos de bombas de vacío, beneficios, desventajas y aplicaciones.

3.3. *Técnicas de caracterización de materiales y superficies*

La caracterización de materiales a escala nanométrica se vale de técnicas espectroscópicas, de difracción y de diversos tipos de microscopías. Por ello, esta etapa del curso está destinada a explicar los principios de funcionamiento de las técnicas más utilizadas.

Las técnicas espectroscópicas son indispensables para el estudio y caracterización de superficies y nanomateriales, ya que proveen información cuali- y cuantitativa acerca de la composición química, las propiedades electrónicas y las interacciones intra- e intermoleculares. Existen muchas técnicas que permiten analizar los materiales a nanoescala y son selectivas a las primeras capas atómicas de la superficie [19]. Algunos ejemplos son la espectroscopia de fotoelectrones emitidos por rayos X (XPS), la espectroscopía de rayos X por energía dispersiva (EDX) y la espectroscopía de fotoelectrones Auger. La aplicación de este conjunto de técnicas para el análisis de superficies tuvo sus inicios a partir de los avances en física atómica, hace ya más de un siglo. El XPS se originó a partir del descubrimiento del efecto fotoeléctrico por parte de Henrich Hertz en 1887 [20]. A partir de allí se sucedieron varios avances hasta que después de la Segunda Guerra Mundial, Kai

Siegbahn y su grupo en Upsala (Suecia) lograron mejoras instrumentales que permitieron registrar recién en 1954 el primer espectro de XPS de alta resolución de cloruro de sodio. Este logro reveló el potencial de XPS y la utilidad de la técnica [21]. En 1969, Hewlett-Packard, en Estados Unidos, produjo el primer instrumento comercial XPS monocromático. Siegbahn recibió el Premio Nobel en 1981 por sus amplios esfuerzos para desarrollar XPS en una herramienta analítica útil.

Complementariamente, las técnicas de microscopía brindan información topográfica tridimensional y en algunos casos, información sobre las propiedades físicas y electrónicas de la superficie de un material. En términos simples, un microscopio es un instrumento que sirve para ver objetos más pequeños que los que se pueden observar a simple vista. Los microscopios ópticos existen desde hace varios siglos. Su resolución está limitada por la longitud de onda de la luz visible, esto significa que no podemos ver objetos más pequeños que $0.2 \mu\text{m}$ aproximadamente. Para acceder a la nanoescala y estudiar estructuras a nivel atómico es necesario contar con una fuente de luz de menor longitud de onda – como en el caso del microscopio electrónico de barrido (MEB) y el microscopio electrónico de transmisión (TEM) –. También se puede recurrir a otro tipo de estrategia de detección, como es el caso de los microscopios de sonda, donde los principales ejemplos son el STM y el microscopio de fuerza atómica (AFM).

Los avances en microscopía electrónica tuvieron lugar a partir de un descubrimiento fundamental de la mecánica cuántica: la luz exhibe propiedades de onda y de partícula. En 1927 C. J. Davison y L. H. Germer confirmaron experimentalmente la naturaleza ondulatoria del electrón y también encontraron que los electrones de mayor energía tenían una menor longitud de onda que aquellos de baja energía. El logro condujo a la invención del microscopio electrónico por E. Ruska y M. Knoll en 1931 [22,23]. Este tipo de instrumentos utiliza un haz de electrones en condiciones de vacío, que se acelera y focaliza sobre una muestra, la que lo absorbe o dispersa para formar una imagen sobre una placa fotográfica sensible a los electrones.

Los microscopios de sonda se valen de una sonda en forma de aguja afilada que recorre la superficie de un material y va colectando información que luego se procesa para originar una imagen. El STM, inventado por Gerd Binnig y Heinrich Rohrer en 1981 [24], permite obtener imágenes tridimensionales de la superficie de un sólido con resolución atómica. El principio de funcionamiento del STM se basa en el control de la corriente túnel, la cual tiene lugar entre la sonda y la superficie. Las variaciones electrónicas por efecto túnel permiten generar una imagen. En esta técnica es un requisito que la muestra sea eléctricamente conductora. En el caso del AFM, la sonda colecta información referida a fuerzas interatómicas que tienen lugar entre ésta y la superficie de la muestra a analizar (fuerzas de Van der Waals, electrostáticas, etc.). La imagen es el resultado de las variaciones de las fuerzas entre el material de la sonda y de la superficie. AFM permite observar muestras conductoras y no conductoras, aunque con menor resolución que el STM.

3.4. Dispositivos nanométricos y máquinas moleculares

Los aparatos y máquinas de tamaño nanométrico se definen por analogía con sus pares macroscópicos [1]. Un ‘dispositivo

molecular’ es un ensamblaje de un número discreto de moléculas, diseñado para cumplir una función específica [25]. Una ‘máquina molecular’ es una clase especial de aparato molecular que, ante la influencia de un factor externo (por ejemplo luz, calor, campo eléctrico o magnético), puede mover las partes que la componen para realizar un trabajo [26].

Los dispositivos moleculares sintéticos están inspirados en la naturaleza y en los objetos macroscópicos que utilizamos en nuestra vida cotidiana. La naturaleza utiliza máquinas moleculares para transportar sustancias dentro de las células y para llevar a cabo funciones tales como la replicación de ADN y la síntesis de ATP [27]. Las proteínas kinesina y dineína se mueven a lo largo de microtúbulos para inducir el transporte direccionado de organelos, cromosomas y ARN [28]. La síntesis de F1F0-ATP utiliza un motor biológico rotacional que se ubica en las membranas mitocondriales, bacterianas y de cloroplastos, que son responsables de la generación de ATP [29]. Los científicos han desarrollado una interesante “caja de nano-herramientas”, llena de nano-objetos tales como nanotubos [30], nanoalambres [31], trasladadores moleculares [32], conmutadores moleculares [33] y motores [34], los que fueron diseñados para cumplir funciones muy diversas. En esta sección del curso los alumnos indagarán sobre los principales ejemplares.

4. Ejemplo de caso: implementación en la carrera de Ingeniería Electromecánica

En la Universidad Tecnológica Nacional (Argentina), desde el año 2015 se implementó un nuevo espacio formativo con las características antes descritas. Este espacio formativo adoptó la forma de una asignatura electiva que se denomina “Materiales Avanzados y Nanotecnología”. La asignatura está destinada a alumnos de los últimos años de la carrera Ingeniería Electromecánica. A modo de ejemplo, se ofrece como información suplementaria a este trabajo el plan de desarrollo de la asignatura. En este caso en particular, el contenido incluye los ejes temáticos antes descriptos. Pero además contempla un espacio destinado a comentar a los estudiantes sobre la labor científica, ya que la generación de conocimientos es un posible ámbito de desarrollo profesional para un ingeniero. También se muestra cómo es el trabajo en el marco de proyectos I+D+i, se debate sobre innovación y propiedad intelectual. Estos temas resultan de utilidad ya que los estudiantes no los abordan en cursos anteriores y están íntimamente relacionados con la nanotecnología y el desarrollo tecnológico en general.

El interés en este tipo de cursos se pone de manifiesto a través de los resultados positivos obtenidos en encuestas realizadas a los estudiantes al finalizar el ciclo lectivo. En las encuestas se preguntó a los estudiantes acerca del desarrollo de contenidos, la relación de los contenidos con otras asignaturas, la relación entre la teoría y la práctica profesional, la metodología de enseñanza, los recursos didácticos, la evaluación, entre otros. También se preguntó a los estudiantes si llegaron a comprender los temas que se desarrollan, si el docente relacionó los contenidos con otras asignaturas de la carrera y si el estudiante logró estudiar la asignatura en forma regular y continua. Cada aspecto de la encuesta se cuantificó en

una escala de 0 a 4, donde 4 es la máxima puntuación. La misma encuesta se realizó al final de cada ciclo lectivo en todas las asignaturas de la carrera. Como resultado, los estudiantes manifestaron un alto grado de conformidad con la asignatura Materiales Avanzados y Nanotecnología, con valores promedio en cada aspecto encuestado superiores a 3, que para la mayoría de los aspectos encuestados resultó superior al promedio de las asignaturas de la carrera.

La satisfactoria incorporación y articulación de conocimientos se pone de manifiesto en el alto rendimiento académico, en donde 73% de los estudiantes aprobaron la asignatura mediante promoción directa, con calificaciones superiores a 8, en escala de 1 a 10. El 27% restante alcanzó la condición de alumno regular, es decir que se encuentran en condiciones de aprobar la asignatura mediante un examen que se lleva a cabo en alguna de las fechas preestablecidas para tal fin.

5. Conclusiones

La nanociencia y la nanotecnología son disciplinas emergentes que resultan transversales a todas las ramas de la ingeniería. La nanotecnología aparece como una alternativa de solución a muchos de los desafíos ingenieriles del siglo XXI. Sin embargo, la educación formal en ingeniería a menudo no incluye esta temática en sus planes de estudio. La misma se suele desarrollar recién en trayectos de formación de posgrado.

Este trabajo aborda una propuesta de cátedra destinada a complementar y actualizar la educación formal en ingeniería en el campo de la nanociencia y la nanotecnología. Se exponen los lineamientos a tener en cuenta en el diseño de un espacio formativo de grado. Como ejemplo, se muestra el caso recientemente implementado en la Universidad Tecnológica Nacional (Argentina). Se ofrece un resumen de los temas incluidos y se destaca su importancia. La propuesta tiene como objetivo proporcionar a los futuros ingenieros las herramientas para resolver desafíos tecnológicos aplicando el conocimiento científico del campo de la nanociencia. En otras palabras, se espera que este tipo de formación contribuya a que los futuros ingenieros se transformen en el nexo que lleve la nanociencia a la práctica en beneficio de la sociedad.

Agradecimientos

Este trabajo se realizó mediante el apoyo de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) y del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

Referencias

- [1] Mendoza, S.M., Exploiting molecular machines on surfaces, PhD Thesis, Zernike Institute for Advanced Materials, Groningen, The Netherlands, 2007.
- [2] Fahrner, W.R., W.R. (Ed.), Nanotechnology and nanoelectronics, Berlin Heidelberg. Springer-Verlag, 2005.
- [3] Bhushan Ed., Handbook of nanotechnology, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2004.
- [4] National Nanotechnology Initiative, [Online]. Available at: <http://nano.gov/nanotech-101/what/definition>
- [5] Balzani, V., Credi, A. and Venturini, M., Molecular devices and machines. *Nano Today*, 2(2), pp. 18-25, 2007.
- [6] Heerema, S.J. and Dekker, C., Graphene nanodevices for DNA sequencing, *Nature Nanotechnology*, 11, pp. 127-136, 2016. DOI: 10.1038/nnano.2015.307
- [7] Kim, K. et al., Man-made rotary nanomotors: A review of recent developments, *nanoscale*, 8, pp. 10471-10490, 2016.
- [8] Vance, M.E. et al., Nanotechnology in the real world: Redeveloping the nonmaterial consumer products inventory, *Beilstein J. Nanotechnol.* 6, pp. 1769-1780. 2015.
- [9] Wijnhoven, S.W.P. et al., Nanomaterials in consumer products. Update of products on the European market in 2010. National Institute for Public Health and the Environment, RIVM Report 340370003. Bilthoven, The Netherlands, 2011.
- [10] Bhushan, B., Introduction to nanotechnology: History, status, and importance of nanoscience and nanotechnology education. Springer, 2016.
- [11] Foladori, G., Políticas públicas en nanotecnología en América Latina., *Revista Problemas del Desarrollo*, 186(47), pp. 59-81, 2016.
- [12] Listado de redes de nanotecnología en Latinoamérica y el mundo ver "Redes de Nanotecnología en el mundo". Red Nanoandes, [en línea]. Disponible en: <http://www.nanoandes.org/redes.html>
- [13] Pastrana, H.F., Ávila, A. y Moreno, G., Nanotecnología, patentes y la situación en América Latina., *Mundo Nano*, 5(9), pp. 57-67, 2012.
- [14] Rizkalla, M.E., Integration of knowledge in engineering/science via nanotechnology programs, 118th ASEE Annual Conference and Exposition, 2011.
- [15] Barakat, N. and Jiao, H., Proposed strategies for teaching ethics of nanotechnology., *Nano Ethics*, 4(3), pp. 221-228, 2010.
- [16] Malsch, I., Nano-education from a European perspective, *Journal of Physics: Conference Series*. 100(3), article number 032001, 2008.
- [17] Hersam, M.C. et al. Implementation of interdisciplinary group learning and peer assessment in a nano-technology engineering course, *Journal of Engineering Education*, 93(1), pp. 49-57, 2004.
- [18] Kroto, H.W. and Roco, M.C., Nanoscale science and engineering education. Edited by Aldrin E. Swee-ney and Sudipta Seal, University of Central Florida, 2008.
- [19] Briggs, D. and Seah, M.P., Practical surface analysis by Auger and X-ray photoelectron spectroscopy, John Wiley & Sons, Norwich, 1983.
- [20] Jenkin, J.G. et al., The development of X-ray photoelectron spectroscopy: 1900-1960. *J. Electron Spectrosc.* 12, pp. 1-35, 1977.
- [21] Seigbahn, K. et al., ESCA-atomic, molecular and solid state structure studied by means of electron spectroscopy. *Nova Acta Reg. Soc. Sci. Upsaliensis*, Ser. IV(20), 1, 1967.
- [22] Knoll, M. and Ruska, E., Das Elektronenmikroskop, *Z. Physik*, v. 78, pp. 318-339, 1932.
- [23] Ruska, E. and Knoll, M., Die magnetische Sammelspule für schnelle Elektronenstrahlen., *Techn. Phys.-sik.* 12, pp. 389-400, 1931.
- [24] Binnig, G. et al., Tunneling through a controllable vacuum gap, *Appl. Phys. Lett.* 40, pp. 178-180, 1982.
- [25] Balzani, V. et al., Molecular-level devices and machines. *Angew. Chem. Int. Ed.* 39, pp. 3348-3391, 2000.
- [26] Key, E.R. et al., Synthetic molecular motors and mechanical machines. *Angew. Chem. Int. Ed.* 46, pp. 72-191, 2007.
- [27] Schliwa, M., Ed., Molecular motors, Wiley-VCH, Weinheim, 2003.
- [28] Grigoriev, D. et al., Encyclopedia of nanoscience and nanotechnology, edited by Hari Singh Nalwa, American Scientific Publishers, Indiana, v. 1, 361 P, 2004.
- [29] Noji, H. and Yoshida, M., The rotary machine in the cell, ATP synthase, *J. Biol. Chem.* 276(3), pp. 1665-1668, 2001.
- [30] Iijima, S., Helical microtubules of graphitic carbon, *Nature*, 354, pp. 56-5, 1991.
- [31] Okawa, Y. and Aono, M., Creation of conjugated polymer nanowires through controlled chain polymerization. *e-J. Surf. Sci. Nanotech.* 2, pp. 99-101, 2004.

- [32] Perez, E.M. et al., A generic basis for some simple light-operated mechanical molecular machines., *J. Am. Chem. Soc.* 126(39), pp. 12210-12211, 2004.
- [33] Feringa, B.L. (Ed.) *Molecular switches*, Wiley-VCH, Weinheim, 2001.
- [34] Leigh, D.A. et al., Unidirectional rotation in a mechanically interlocked molecular rotor, *Nature*, 424(6945), pp. 174-9, 2003.

S.M. Mendoza, recibió el título de Lic. en Química de la Universidad Nacional del Litoral, Argentina, en 2002. Luego, trabajó en el Zernike Institute for Advanced Materials de la Universidad de Groningen, Holanda, donde se avocó al estudio de máquinas moleculares en superficies. Allí obtuvo su PhD en 2007. Posteriormente y hasta el 2010 trabajó para TNO (Holanda) como líder de proyectos, logrando innovaciones en tecnología de materiales lignocelulósicos. Actualmente se desempeña como investigadora del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y como profesora de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) en carreras de ingeniería, con sede en la ciudad de Reconquista, Argentina. Sus temas de interés son el estudio de materiales avanzados y nanotecnológicos, con énfasis en la caracterización de superficies.
ORCID: 0000-0003-1691-0052.