



Paneles
fotovoltaicos

Julio C Durán**Juan Pla**

Departamento Energía Solar, CNEA

Marcelo Álvarez

Cámara Argentina de Energías Renovables

Roque Pedace

Facultad de Ingeniería, UBA

Energía solar fotovoltaica

El uso de fuentes renovables de energía continúa creciendo a un ritmo sostenido, aun en un contexto de fuerte descenso en los precios del petróleo. Se considera fuente de energía renovable a todo recurso natural inagotable en la escala humana o que se regenera más rápidamente de lo que se consume. Una de sus características es que es ambientalmente benigna ya que produce muy bajas emisiones de gases de efecto invernadero, como dióxido de carbono (CO₂).

Las fuentes renovables representaron alrededor del 59% de la nueva potencia instalada en 2014. A fin de dicho año, cubrían aproximadamente el 27,7% de la potencia total instalada en el mundo y generaban alrededor del 22,8% del consumo eléctrico global (compuesto por 16,6% de energía hidráulica, 3,1% eólica, 1,8% biocombustibles, 0,9% fotovoltaica y 0,4% de otras fuentes). Por otra parte, las renovables intermitentes están alcanzando un grado de penetración importante en los sistemas eléctricos en varios países, lo que hace necesarias transforma-

ciones en la infraestructura de transmisión y distribución, así como el manejo inteligente de las redes eléctricas.

En 2014 la potencia total instalada de origen renovable fue de 1712GW, 8,5% más que en 2013: 1055GW correspondieron a hidroelectricidad, con un crecimiento del 3,6% con respecto a 2013, y 657GW al resto de las renovables (incluidos 370GW eólicos y 177GW fotovoltaicos), con un crecimiento del 17,3%. La energía solar fotovoltaica es, en orden de importancia, la tercera fuente renovable en la matriz eléctrica global, después de la hidroeléctrica y la eólica.

En la Argentina, el avance de las energías renovables es aún incipiente: en 2014 aportó el 1,5% de la generación eléctrica. Existen, sin embargo, políticas nacionales y provinciales que apuntan a lograr una mayor participación de energías renovables en la matriz eléctrica. Cabe mencionar que las leyes 26.190 y 27.191 sobre energía de fuentes renovables no consideran en esa categoría a las centrales hidroeléctricas de potencia mayor a 30MW.

¿DE QUÉ SE TRATA?

Características y perspectivas de una forma de energía de fuente renovable.

Algunas fuentes renovables han alcanzado costos competitivos con las convencionales en varias regiones del mundo, pero su crecimiento se ve parcialmente frenado por subsidios a los combustibles fósiles y la energía nuclear, especialmente en países en vías de desarrollo. Varias alternativas renovables ya no necesitan incentivos económicos, pero en cambio sí requieren políticas de largo plazo que garanticen un mercado previsible y confiable.

Energía solar fotovoltaica en el mundo

Un generador fotovoltaico convierte la radiación solar directamente en electricidad en un dispositivo semiconductor denominado *celda solar* o *fotovoltaica*, que aprovecha un proceso denominado *efecto fotovoltaico*, descubierto por el físico francés Edmond Becquerel (1820-1891) en 1839. Dichas celdas se conectan en serie para formar módulos fotovoltaicos, cuya eficiencia en la conversión se encuentra por lo común entre el 10% y el 20%, dependiendo de la tecnología.

Los sistemas fotovoltaicos pueden clasificarse en dos categorías: (i) sistemas aislados, típicamente ubicados en áreas rurales sin acceso al servicio eléctrico de red, y (ii) sistemas conectados a la red eléctrica pública, sea instalados sobre el suelo en forma concentrada, constituyendo centrales de potencia, o colocados en forma distribuida en techos o fachadas de edificios. El mercado fotovoltaico experimentó un importante crecimiento en los últimos años, como se aprecia en la figura 1, debido esencialmente a la instalación de numerosos sistemas conectados a red en diversos países desarrollados y en China, impulsado por activas políticas de promoción. En el período 2000-2014, la tasa media de crecimiento anual de la capacidad instalada fue superior al 40%, mucho mayor que la del resto de las energías renovables. Ese crecimiento explosivo dio lugar a una continua reducción de los costos de producción como consecuencia de economías de escala y avances tecnológicos.

En 2014, el mercado fotovoltaico global tuvo un crecimiento record, con cerca de 40GW_p de potencia instalada en el año, lo que llevó la capacidad total instalada en el mundo a aproximadamente 177GW_p. El subíndice p en las unidades —que en lo sucesivo omitiremos— indica que se trata de la potencia pico medida en condiciones normalizadas: radiación solar de 1kW/m² y temperatura de los módulos fotovoltaicos de 25°C. Hasta 2011, el fuerte crecimiento del mercado tuvo lugar sobre todo en países europeos (Alemania en forma ininterrumpida, España hasta 2008, Italia más recientemente). Actualmente, se observa una retracción en

los mercados europeos (con excepción del Reino Unido). El liderazgo del crecimiento, a partir de 2013, pasó a países asiáticos (esencialmente, China y Japón) y a los Estados Unidos, que probablemente dominarán el mercado global en los próximos años. La figura 2 muestra los diez países con mayor potencia fotovoltaica instalada a fines de 2014.

Ese año, el 1% de la generación eléctrica mundial fue de origen fotovoltaico. En diecinueve países la energía solar fotovoltaica proveyó por lo menos 1% del consumo eléctrico, y de ellos Italia (7,9%), Grecia (7,6%) y Alemania (7%) exhibieron la mayor participación de esa fuente en su matriz eléctrica.

En Latinoamérica, el mercado fotovoltaico está creciendo aceleradamente. Seis países instalaron durante 2014 más de 50MW de potencia fotovoltaica: Chile (308MW), México (97MW), Honduras (72MW), Ecuador (64MW), Uruguay (59MW) y Brasil (51MW).

Un tema a considerar en los casos de alta participación fotovoltaica en la matriz eléctrica es la variabilidad del recurso solar, el cual, sin embargo, es el más previsible de los recursos variables, lo que permite adecuar el sistema eléctrico a fluctuaciones indicadas por pronósticos meteorológicos de gran confiabilidad. Las fluctuaciones bruscas producidas, por ejemplo, por tormentas, pueden compensarse con redes inteligentes de transmisión y distribución, y mediante la capacidad de almacenamiento del sistema. La última puede estar en el medio urbano, asociada con sistemas de generación distribuida, una opción tecnológica que también permite optimizar el autoconsumo y disminuir las inversiones en el sistema de distribución.

Un componente importante de una política de fomento de la generación fotovoltaica distribuida es su incorporación a nuevas viviendas, por ejemplo en los planes de vivienda social, ya que su integración desde el inicio permite mejor planificación y disminución de los costos.

Asimismo, el uso de sistemas fotovoltaicos con acumulación o combinados con la generación solar térmica con almacenamiento (ver el artículo ‘Sistemas de almacenamiento de electricidad’ en este mismo número) permite aportar energía a la red eléctrica por períodos más prolongados que el de la radiación solar. También se ha planteado la conveniencia de asociar la generación fotovoltaica con represas hidroeléctricas para compensar las fluctuaciones del nivel del agua en estas y su caída en épocas de sequía. En el más largo plazo, la variación estacional de generación puede ser compensada con el manejo de demanda estacional, como ocurre con el riego, y con la obtención de agua potable por desalinización. Incluso, en países como Alemania, de irradiación solar media o baja, se comienzan a aprovechar los excedentes de energía solar fotovoltaica para producir hidrógeno y usarlo como combustible o para producir con él otros combustibles, entre ellos metano.

Energía fotovoltaica en la Argentina

Hasta 2009, la capacidad fotovoltaica instalada en la Argentina estaba mayormente ubicada en áreas rurales alejadas de las redes eléctricas. A partir de 2010, como consecuencia de políticas nacionales y provinciales de promoción que favorecieron la instalación de centrales de potencia basadas en fuentes renovables, esa capacidad creció sustancialmente. El primer hito en dicha dirección fue la puesta en operación en 2011 de una planta de 1,2MW de potencia en Ullum, San Juan, como parte del programa Solar San Juan de ese estado provincial. En el marco del programa de generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables de la Secretaría de Energía de la Nación, entre 2012 y 2013 se instalaron 7MW en Cañada Honda, también en San Juan. En 2014 se inauguró una planta de 1MW en San Luis, financiada por el gobierno provincial, y al momento de escribir el presente artículo se encuentra en construcción una central de 1MW en San Lorenzo, Santa Fe.

Las centrales fotovoltaicas operan desde hace años con un marco regulatorio que habilita su conexión al sistema interconectado nacional, y se ven favorecidas por políticas de promoción basadas en el pago de una tarifa subsidiada para la energía que entregan. Pero hasta 2013 no se disponía de un marco legal que permitiera la instalación de sistemas fotovoltaicos distribuidos conectados a las redes de baja tensión. En 2011 la Comisión Nacional de Energía Atómica y la Universidad Nacional de San Martín decidieron impulsar un proyecto orientado a la interconexión de sistemas fotovoltaicos a la red eléctrica en ambientes urbanos (ver recuadro 'El proyecto Iresud').

Los costos de instalación de sistemas fotovoltaicos dependen fuertemente de la escala. Mientras los de las plantas de más de 10MW, montadas sobre el suelo, están por debajo de los 2 dólares por watt de potencia instalada, los de sistemas de menos de 5kW conectados a la red eléctrica de baja tensión ascienden a prácticamente

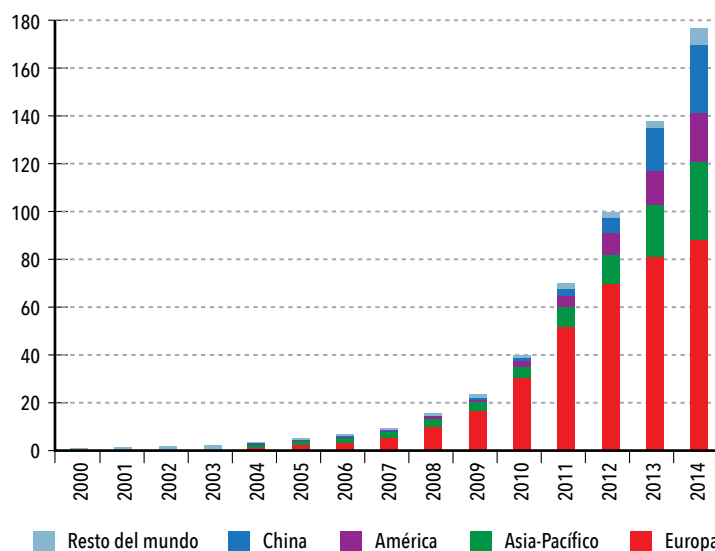


Figura 1. Crecimiento entre 2000 y 2014 de la capacidad fotovoltaica instalada en el mundo. Las unidades del eje vertical son gigawatts (GW).

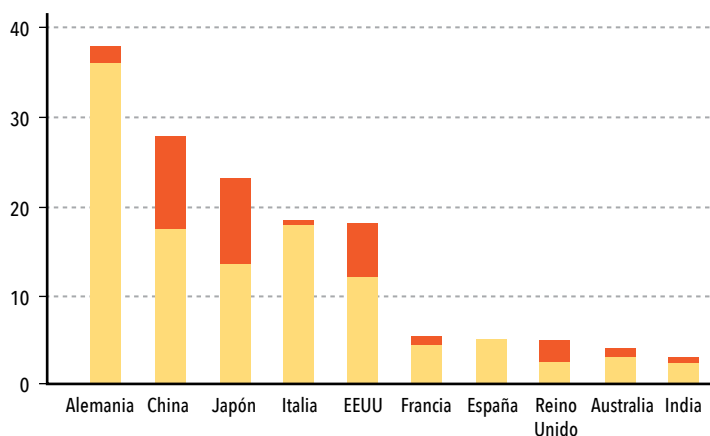


Figura 2. Los diez países con mayor capacidad fotovoltaica instalada a fines de 2014. La parte clara de las barras indica la situación a fines de 2013; la oscura, la porción agregada en 2014, año en que la capacidad fotovoltaica de los países creció como sigue: China 10,6%, Japón 9,7%, Estados Unidos 6,2%, Reino Unido 2,4%, Alemania 1,9%, Francia 0,9%, Australia 0,9%, India 0,7% e Italia 0,4%, mientras que la de España no creció ese año. Las unidades del eje vertical son gigawatts (GW).

EL PROYECTO IRESUD

Un consorcio público-privado formado por la Comisión Nacional de Energía Atómica y la Universidad Nacional de San Martín más cinco empresas privadas trabaja desde principios de 2012 en la interconexión de sistemas fotovoltaicos a la red eléctrica en ambientes urbanos. El proyecto está parcialmente subsidiado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva (por los Fondos Argentinos Sectoriales) y tiene el apoyo del Ente Nacional Regulador de la Electricidad, la Secretaría de Energía de la Nación y organismos de diversas provincias; también participan varias universidades nacionales.

Su objetivo principal es impulsar la generación de electricidad con sistemas fotovoltaicos de baja potencia (entre 2 y 50kW) instalados en edificios y conectados a la red eléctrica de baja tensión. Entre otras actividades, impulsó el desarrollo de la normativa correspondiente y, al final del proyecto, habrá instalado alrededor de cincuenta sistemas piloto, con una potencia total cercana a 200kW, en Buenos Aires y en ciudades de quince provincias. Las fotografías de página 48 muestran, a modo de ejemplo, una pérgola de 5kW montada en el Centro Atómico Constituyentes de la CNEA y el sistema de 2kW instalado en la base antártica Vicecomodoro Marambio. Se puede obtener más información sobre el proyecto en <http://iresud.com.ar/>.

el doble, un costo que solo se reducirá con la constitución de un mercado consolidado.

En cuanto a la producción de módulos fotovoltaicos en el país, hasta principios de 2014 existía una única planta de ensamblado de módulos de baja potencia (hasta 100W) a partir de celdas solares importadas, en la provincia de La Rioja. En 2014 se puso en funcionamiento en San Luis la primera fábrica de ensamblado de módulos de las potencias típicas en sistemas de conexión a red (240W), y existen iniciativas similares en otras provincias. Por su parte, San Juan tiene en marcha un proyecto de instalación de una planta integrada, que incluye las etapas de fabricación de lingotes de silicio cristalino, celdas solares y módulos fotovoltaicos, con una capacidad de producción anual de 70MW. Las actividades de investigación y desarrollo en el tema son relativamente escasas y están centradas en unos pocos organismos del sistema científico-tecnológico nacional.

La Argentina tiene la mayor parte de su consumo eléctrico concentrado en los centros urbanos. Así, el área metropolitana de Buenos Aires utilizó en 2014 el 38% de la electricidad generada. Si a esto se suma la gran extensión territorial del país, se concluye que el empleo masivo de generación fotovoltaica distribuida en áreas urbanas y periurbanas contribuiría al uso eficiente de la energía por reducción de las pérdidas por transporte, además de la mengua en la emisión de gases de efecto

invernadero por menor quemado de combustibles fósiles en centrales térmicas.

Para lograr este propósito se requieren tanto políticas de promoción como un marco regulatorio eficiente que abarque los aspectos técnicos, comerciales, económicos, fiscales y administrativos. Errores en cualquiera de ellos retrasarían innecesariamente el proceso o lo harían insostenible, como sucedió en España (donde se subsidió de modo excesivo la tarifa), Canadá (donde los procesos de habilitación de las instalaciones fueron demasiado complejos) o los Estados Unidos (donde hubo protecciones redundantes que elevaron innecesariamente los costos).

En el orden nacional, la Secretaría de Energía y el Ente Nacional Regulador de la Electricidad están preparando normas que habiliten la conexión a la red eléctrica pública de sistemas de generación distribuida basados en fuentes renovables. Asimismo, se han presentado en el Congreso Nacional diversos proyectos de ley con el mismo fin, y la Asociación Electrotécnica Argentina ha establecido pautas técnicas para el diseño de sistemas fotovoltaicos conectados a la red de baja tensión.

También varias provincias tienen en estudio normas que autoricen la generación distribuida de electricidad de fuentes renovables y su entrega a la red pública, mientras Santa Fe, Buenos Aires, Salta y Mendoza ya han promulgado leyes o emitido resoluciones que autorizan y reglamentan dichas actividades.

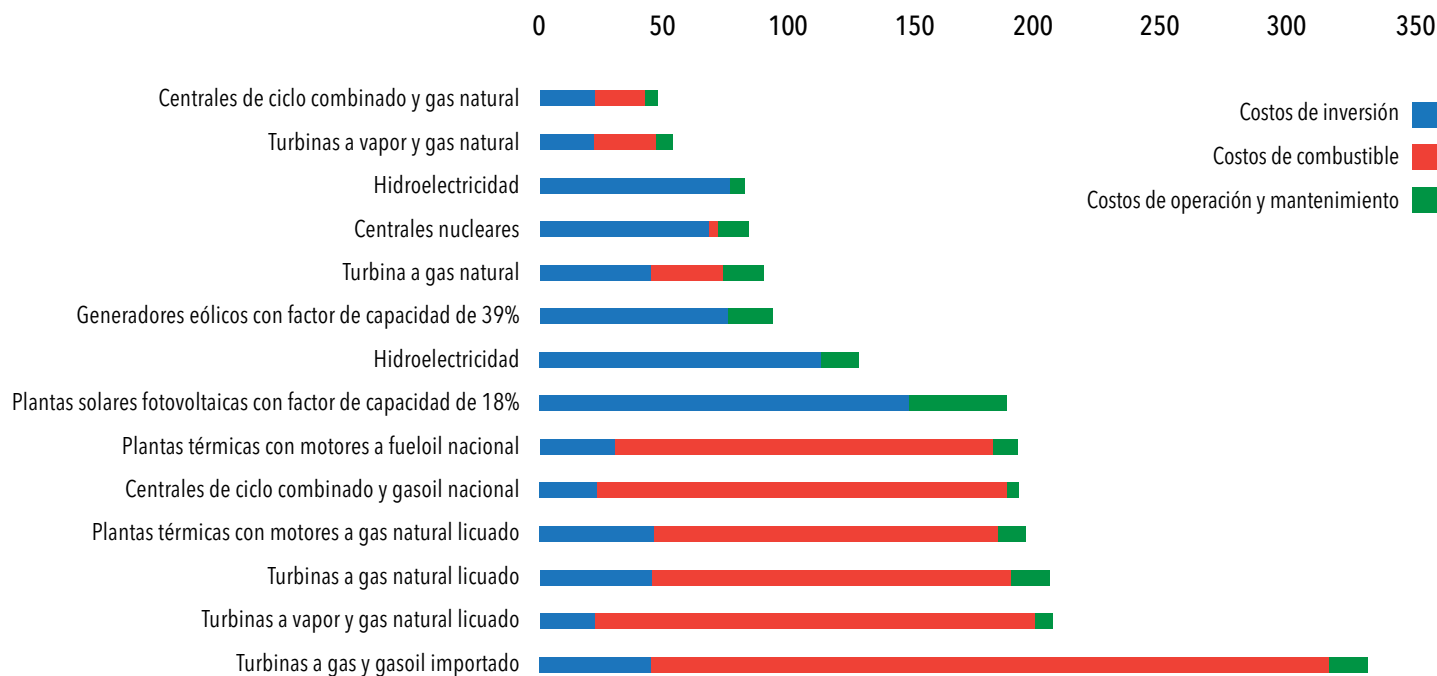


Figura 3. Costo de la electricidad en la Argentina según diferentes formas de generación, expresados en dólares por MWh. El gráfico se confeccionó con información publicada en el segundo semestre de 2015 por la Cámara Argentina de Energías Renovables. Las centrales hidroeléctricas figuran dos veces para reflejar la situación de aprovechamientos con diferentes factores de capacidad y costos de inversión inicial. El factor de capacidad indicado para los generadores eólicos y fotovoltaicos es la relación entre la energía efectivamente generada y la que hubiera producido si el dispositivo hubiese estado funcionando continuamente a su potencia nominal.



Central fotovoltaica Cañada Honda, situada a unos 60km de la ciudad de San Juan. Con 33.500 paneles fabricados en España, colocados en filas separadas por 10,5m e inclinados 28° con respecto a la horizontal para estar en la mejor posición de recibir el sol, tiene una potencia de generación de 7MW.

Economía de la generación fotovoltaica

Los países pioneros en promover la generación fotovoltaica distribuida conectada a la red eléctrica pública –Alemania, España, Italia y Japón– adoptaron el pago de una tarifa más alta para la energía eléctrica de origen renovable entregada a la red que para la consumida de ella, sistema conocido como FIT (*feed in tariff*). Tal sistema tarifario, que requiere la instalación de dos medidores en cada unidad que sea a la vez productora y consumidora de electricidad, permite establecer, por ejemplo, diferencias tarifarias variables en función del tamaño o la tipología de los sistemas, y decrecientes en función del tiempo, de manera de reflejar la disminución de costos esperables de la generación distribuida por el crecimiento y la madurez del mercado. Asimismo, en diversos países se han dado mayores incentivos a las instalaciones realizadas en edificios o sobre techos. El sistema FIT permitió un crecimiento exponencial del mercado, que en algunos casos, como España o Italia, no resultó sostenible y, sumado a las crisis financieras de los últimos años, terminó creando perjuicios a las industrias y las empresas de servicios públicos.

El otro modelo tarifario utilizado es el conteo neto (*net metering*), consistente en medir la energía neta consumida de la red eléctrica, es decir, la diferencia entre la electricidad que una vivienda, industria o comercio toma de la red de distribución y la que entrega a ella generada por su propia instalación fotovoltaica. Este sistema, por el que un solo medidor registra el flujo de electricidad en ambos sentidos y arroja un resultado neto, no admite tarifas diferenciadas. Comenzó a ser utilizado en países como Uruguay, Chile y México, pero hasta el momento no ha dado lugar a un desarrollo significativo del mercado de generación distribuida.

En la Argentina, la medición neta, como se está proponiendo en diversas provincias y en proyectos de ley en el Congreso Nacional, no resultaba un incentivo en el contexto de tarifas fuertemente subsidiadas para la energía eléctrica convencional (vigente cuando se escribió esta nota). A fin de cuantificar la magnitud de los subsidios en danza, la figura 3 presenta valores estimados de los tres componentes del costo de generación eléctrica para diferentes fuentes de energía y tecnologías: costos de capital, de combustible y de operación y mantenimiento, según datos de la Cámara Argentina de Energías Renovables.

Tanto los precios del mercado eléctrico mayorista como las tarifas eléctricas cobradas al usuario por las em-



Paneles fotovoltaicos instalados en forma de alero en un edificio del Centro Atómico Constituyentes, de la CNEA.



Paneles fotovoltaicos instalados en el techo de un edificio de la base antártica Vicecomodoro Marambio, a 64° de latitud, a escasa distancia al norte del círculo polar.

LECTURAS SUGERIDAS

AGENCIA INTERNACIONAL DE LA ENERGÍA, 2014, *Technology Roadmap. Solar Photovoltaic Energy*, OCDE, París. Accesible en https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy_2014edition.pdf.

REN 21, 2015, *The First Decade 2004-2014. 10 Years of Renewable Energy Progress*, accesible en http://www.ren21.net/Portals/0/documents/activities/Topical%20Reports/REN21_10yr.pdf.

presas distribuidoras son sustancialmente menores que los costos de generación con la mayoría de las fuentes de energía y la mayoría de las tecnologías. Las tarifas residenciales varían en un rango muy amplio, típicamente entre 9 y 70 dólares por MWh, dependiendo de la región del país y de los subsidios del Estado Nacional.

En otras palabras, la utilización de sistema de medición neta implicaría hacer competir la generación fotovoltaica, sin subsidio, con energía eléctrica convencional comercializada a precios muy inferiores a su costo de generación por los mencionados subsidios. Por ello una tarifa diferencial resultaría mucho más efectiva para el desarrollo del mercado de la generación fotovoltaica distribuida, un sistema que ya se utiliza en la generación concentrada a partir de fuentes renovables, de conformidad con la resolución 108/2011 de la Secretaría de Energía. El caso alemán es un buen modelo a seguir, teniendo en cuenta las características del mercado local y su desarrollo tecnológico. **CH**



Julio C Durán

Doctor en física, Universidad Autónoma de Madrid.
Investigador de la CNEA.
Profesor asociado, UNSAM.
duan@tandar.cnea.gov.ar



Juan Pla

Doctor en física, UBA.
Investigador independiente del Conicet.
jpla@tandar.cnea.gov.ar



Marcelo Álvarez

Presidente de la Cámara Argentina de Energías Renovables.



Roque Pedace

Licenciado en biología, UBA.
Magister en política y gestión de la ciencia y la tecnología, UBA.
Profesor adjunto, UBA