



Fuente de luz Sincrotrón



Acelerador Sincrotrón *Diamond* en el Reino Unido
Imagen: www.maxonmotor.es

RESUMEN

- Un acelerador sincrotrón, también conocido como fuente de luz sincrotrón o simplemente sincrotrón, es una máquina circular que se utiliza para acelerar electrones a velocidades cercanas a la de la luz. El proceso produce una luz muy intensa que es usada para estudiar la estructura y propiedades de cualquier objeto.
- El sincrotrón es una poderosa herramienta para investigadores de diversas áreas del conocimiento; biología, química, ingeniería, medicina, física, etcétera, así como empresas que buscan innovar sus productos y procesos.
- Las aplicaciones van desde el diseño de nuevas medicinas o la construcción de procesadores de cómputo más pequeños, hasta ayudar a la descontaminación de desechos de minería.
- Actualmente hay más de 60 máquinas sincrotrón en todo el mundo. Estados Unidos tiene siete mientras que Brasil tiene dos y Canadá uno.
- En México existe interés por construir uno y ya existen recomendaciones positivas de las Comisiones de Ciencia y Tecnología de las dos cámaras del Congreso de la Unión.

¿Qué es un sincrotrón?

Un sincrotrón es un acelerador de partículas, una máquina circular de cientos de metros de diámetro, capaz de acelerar un conjunto de *electrones* a velocidades cercanas a la de la luz (aproximadamente 300 mil km por segundo). Su utilidad es tan amplia que algunas organizaciones que dictan políti-

Glosario

- **Amperio:** Unidad de intensidad de corriente eléctrica.
- **Cristalografía por rayos X:** Técnica experimental para el estudio y análisis de materiales.
- **Celda solar:** Dispositivo que convierte la energía de la luz del Sol en energía eléctrica.
- **Difracción:** Fenómeno causado cuando una onda pasa por una pequeña apertura u obstáculo.
- **Electroimán:** Imán en el que el campo magnético se produce por una corriente eléctrica. Consiste en un gran número de espiras por donde pasa una corriente, generalmente se enrollan alrededor de un material ferromagnético.
- **Electrón:** Partícula fundamental con carga eléctrica negativa.
- **Electronvoltio:** Unidad de energía de un campo eléctrico.
- **Espectro electromagnético:** Conjunto de longitudes de onda de todas las radiaciones electromagnéticas.
- **Frecuencia:** Número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno periódico.
- **Microscopía:** Conjunto de técnicas y métodos para magnificar y hacer visibles objetos pequeños que no pueden ser detectados a simple vista.
- **Morfología (películas delgadas):** Estructura de materiales compuestos de películas delgadas.
- **Ondulador:** Dispositivo magnético utilizado para acelerar partículas con campo magnéticos oscilatorios
- **Películas delgadas:** Son películas (o capas) de material que tienen sólo unos cuantos átomos de grosor.
- **Radiación electromagnética:** Campos electromagnéticos oscilantes. La luz normal es radiación electromagnética y su espectro incluye desde las ondas de radio, microondas, infrarrojo, luz visible, ultravioleta, hasta rayos X y rayos gamma.
- **Radián:** Unidad angular que representa el ángulo central de una circunferencia en el cual la longitud del arco es igual al radio.
- **Tomografía:** Proceso de formación de imágenes por secciones planas usando radiación electromagnética penetrante.
- **Velocidad de la luz:** Constante universal física que define la máxima velocidad a la cual se puede viajar en el vacío, su valor es de 299 792 458 m/s.

cas públicas en ciencia y tecnología en Estados Unidos y Europa han descrito al sincrotrón como una de las innovaciones científicas más importantes de las últimas décadas.¹⁻⁵

Los electrones emiten luz al ser acelerados (radiación electromagnética), llamada *luz de sincrotrón*. La luz de sin-

crotrón tiene propiedades excepcionales, es muy intensa y cubre todo el espectro, pasando por microondas o rayos X. Esto las hace una herramienta única para el desarrollo científico, tecnológico e industrial. Su utilidad es tal que, en torno a un sincrotrón, normalmente se instala un conjunto de laboratorios que utilizan esta luz para realizar investigaciones de manera independiente. Por ejemplo, en un laboratorio podría analizarse la estructura molecular de un chocolate y en otro la de un virus. Por lo tanto, en un sincrotrón trabajan investigadores de muchas áreas del conocimiento, así como empresas que desean entender, mejorar y crear nuevos procesos y productos.

Cuatro generaciones de sincrotrones

El primer acelerador sincrotrón fue desarrollado en la década de los años cuarenta con el objetivo de estudiar la estructura interna de las partículas elementales, es decir, aquellas partículas constituyentes de la materia. Los investigadores deseaban acelerarlas a velocidades cercanas a la de la luz para hacerlas colisionar a muy altas energías y estudiar los resultados. En esa primera generación de sincrotrones descubrieron que los electrones acelerados emitían una gran cantidad de energía luminosa, pero esa luz era desaprovechada.⁶

La segunda generación fue construida en la década de los años setenta con el objetivo de generar y utilizar esta luz para aplicaciones tanto científicas como industriales.^{2,4,7} **Por ejemplo, se han usado para estudiar la estructura de los sólidos y sus superficies, o con rayos X analizar las estructuras atómicas e incrementar la resolución en estudios sobre la estructura de las proteínas.**

La tercera generación de sincrotrones inició en los años noventa y ha seguido evolucionando hasta el día de hoy. En ésta, se introdujeron instrumentos denominados *onduladores* para incrementar la brillantez del haz de luz por un factor de 10,000, en comparación con la generación anterior. Los onduladores hacen que los electrones sigan un camino ondulatorio o sinusoidal, lo cual incrementa la luz producida. La gran mayoría de los sincrotrones operando en el mundo son de tercera generación.^{7,8}

La cuarta generación de sincrotrones promete acelerar electrones a energías mayores y generar luz aún más brillante, con una mayor versatilidad en el tipo de luz producida (con un mayor rango de frecuencias y la posibilidad de generar pulsos ultracortos).⁹

Alternativas al sincrotrón

En estos momentos no existen alternativas tecnológicas de mediano o largo plazo al sincrotrón. Hay una serie de tecnologías emergentes, no probadas, que en 25 años podrían ofrecer algunas opciones de menor calidad a un menor costo.¹⁰

Consideraciones de seguridad

La tubería del anillo donde se produce la luz en el sincrotrón está encapsulada en cuartos blindados, con paredes gruesas de concreto y plomo, por lo que el riesgo de exposición

a la radiación energética es mínimo y éste sólo existe para los técnicos que operan directamente la máquina. Además, el sincrotrón funciona con electricidad, por lo que tiene un sistema de seguridad muy simple; bajando un interruptor se apaga la máquina.

Propiedades de la luz de sincrotrón

Las propiedades más importantes de la luz de sincrotrón son:^{5,7}

- **Brillantez.** Es la cantidad de energía luminosa por unidad de tiempo. La luz de sincrotrón es más de un millón de veces más brillante que la del Sol y más de un millón de millones de veces más brillante que la producida por un aparato de rayos X convencional. A mayor brillantez se pueden estudiar mejor y más rápido las muestras.
- **Colimación.** Se refiere a qué tan paralelos son los rayos de luz producidos. Un haz de luz colimado facilita su manipulación y aprovechamiento.
- **Amplio espectro de frecuencias.** La luz de sincrotrón puede producir diferentes tipos de luz, desde rayos infrarrojos hasta los rayos X, permitiendo hacer varios experimentos y análisis con una sola fuente de luz.
- **Polarización.** Es la orientación del campo electromagnético. La polarización de la luz de sincrotrón es muy útil para estudiar la estructura de las moléculas.
- **Pulsación.** La luz de sincrotrón puede ser producida en destellos intermitentes (de 100 billonésimas de segundo de duración). Esto permite captar con gran detalle el desarrollo temporal de procesos biológicos, químicos o físicos de gran complejidad que pudieran ser demasiado breves o demasiado rápidos para ser estudiados con otros métodos.

Todas estas cualidades permiten alcanzar resultados superiores y en menor tiempo a los obtenidos por otros medios.^{5,11,13}

Aplicaciones

Las aplicaciones de una fuente de luz de sincrotrón son numerosas y variadas. A continuación se enlistan algunos ejemplos:^{4,7,9,14,15-17}

- **Medicina.** Se han desarrollado técnicas de obtención de imágenes y de diagnóstico menos invasivas y más precisas que permiten una menor exposición a los rayos X que las técnicas convencionales, como la *tomografía* de rayos X. Se han realizado pruebas clínicas exitosas con luz de sincrotrón en microhaces de rayos X para tratar tumores que actualmente no son operables.
- **Química.** Permite analizar mejor la estructura molecular de materiales y mejorar los procesos de producción de una gran variedad de compuestos químicos (adhesivos, lubricantes, películas anticorrosivas, etcétera). Usando luz de sincrotrón y avanzadas técnicas de cristalografía macromolecular fue posible desarrollar medicinas como *Tamiflu*, un antigripal, o *Herceptin*, usado para tratar cáncer de mama avanzado.

- **Biología.** La luz de sincrotrón es una poderosa herramienta para estudiar la estructura de los bloques fundamentales de la vida (proteínas y ácidos nucleicos). También proporciona imágenes de células en alta resolución, mucho más detalladas que las ofrecidas por las técnicas convencionales de *microscopía*, a la vez que permite identificar los elementos químicos presentes en las estructuras biológicas.
- **Ciencia ambiental.** El alto brillo permite estudiar sustancias muy diluidas, identificar sustancias o rastrear los contaminantes a medida que se mueven a través del medio ambiente, con una gran resolución. Los sincrotrones se han utilizado para desarrollar técnicas más eficientes para el almacenamiento de hidrógeno y para estudiar la forma en que el uranio empobrecido se dispersa en el medio ambiente local.
- **Ciencia de materiales.** Los sincrotrones permiten realizar análisis de alta precisión para determinar las propiedades de *películas delgadas* y otros materiales. La luz de sincrotrón se utilizó para desarrollar tecnologías que ahora se usan en miles de millones de dispositivos electrónicos en todo el mundo, como dispositivos de memoria de cómputo, sistemas electromecánicos y biosensores.
- **Petroquímica.** La luz de sincrotrón puede ser utilizada para estudiar las propiedades del petróleo crudo o refinado. El conocimiento obtenido se puede aplicar para mejorar la eficiencia de la refinación y transporte.

Sincrotrones en el mundo

Los primeros en construir sincrotrones fueron países tecnificados como Estados Unidos, Alemania, Japón, Inglaterra, Francia, Italia, Canadá, etc. Los avances en ciencia y tecnología logrados con estas máquinas han motivado a países en desarrollo, como Brasil, India, Taiwán, Tailandia y Jordania, a construir sus propias fuentes de luz. Actualmente, existen más de 60 centros de investigación en 19 países, que manejan un sincrotrón y dan servicio a cerca de 30,000 investigadores.¹³ En Latinoamérica, Brasil es el único país que cuenta con uno (de segunda generación) y está construyendo otro (de tercera). Ver recuadro 1.

La iniciativa privada y el sincrotrón

Las empresas utilizan el sincrotrón fundamentalmente de tres formas: pagando directamente por usar un laboratorio durante un tiempo determinado, asociándose con otras empresas para comprar un laboratorio y no tener restricciones en el tiempo de uso o contratando investigadores que sepan trabajar con el haz de luz para realizar la investigación que la empresa requiere.

Desde el año 2000, alrededor de dos mil empresas han realizado más de cuatro mil proyectos de investigación en sincrotrones con el objetivo de entender y mejorar sus productos y procesos (ver recuadros 2 y 3). Muchos de estos proyectos han alcanzado su meta y en algunos casos han generado patentes con el aprendizaje obtenido.²⁰

Recuadro 1. Una experiencia valiosa: el sincrotrón de *Daresbury*.¹⁸

El sincrotrón de *Daresbury*, en Inglaterra, terminó su vida útil en 2007 después de 27 años de operación y sirve como marco de referencia para conocer el impacto que puede tener un complejo de investigación que opere un sincrotrón:^{18,19}

- Lo usaron 11 mil investigadores de 25 países.
- Con la investigación realizada se publicaron cinco mil artículos científicos.
- Sirvió como herramienta para cuatro mil tesis doctorales y dos mil proyectos post-doctorales.
- Atendió a 200 instituciones, entre las que se encuentran académicas, de gobierno, de salud y empresas.
- Debido a restricciones de confidencialidad, se desconoce el impacto económico del sincrotrón de *Daresbury*. Sin embargo, se sabe que 11 de las 25 empresas líderes en investigación y desarrollo a nivel mundial, lo usaron para mejorar o desarrollar nuevos productos y procesos. Estas empresas incluyen a ICI, BP, Shell, GSK, Unilever, AstraZeneca y Pfizer.
- Se crearon siete empresas asociadas directamente al sincrotrón.
- Se hicieron contratos por parte de compañías del Reino Unido con un valor superior a los 400 millones de dólares.
- El personal que operaba el sincrotrón estaba constituido por 325 investigadores de diversas áreas del conocimiento.
- El centro de investigación que albergaba al sincrotrón es actualmente un parque científico, tecnológico y de innovación, donde se realiza investigación en diversas áreas del conocimiento.

La inversión inicial para construir el sincrotrón fue de 867 millones de dólares y al cierre se contó con una derrama económica de aproximadamente 1,445 millones de dólares (1.6 veces lo invertido).¹⁸

Recuadro 2. Aplicaciones del sincrotrón en la industria.

- **Farmacéutica.** Desarrollo de medicamentos como el Tamiflu para tratar la influenza o el *Herceptin* para tratar el cáncer de mama.
- **Tecnológica.** Generación de componentes que mejoran la capacidad de almacenar información en computadoras, tabletas y teléfonos móviles.
- **Agroalimentaria.** Caracterización y análisis muy precisos de ingredientes de una gran cantidad de productos.
- **Sector agropecuario.** Observación a detalle de los procesos que ocurren en plantas y animales o en productos derivados bajo condiciones normales y extremas.
- **Energética.** Análisis de rocas almacenadoras de reservas de petróleo y otros hidrocarburos, así como de nuevos materiales en yacimientos minerales. Diseño de baterías y *celdas solares* más eficientes.
- **Cementera.** Análisis detallado de los procesos químicos para elaborar varios tipos de cemento y lograr diseñar estrategias para obtener cementos más resistentes y ligeros.
- **Cuidado del medio ambiente.** Análisis de materiales contaminantes y monitoreo con alto grado de precisión de partículas presentes en el aire, agua o suelo.
- **Automotriz y aeronáutica.** Pruebas a componentes de vehículos y mediciones precisas de los cambios observados en condiciones cercanas a la realidad.



Infografía El Sincrotrón y usuarios. Imagen: Red Temática Usuarios de Luz Sincrotrón (RedTULS).

Recuadro 3. Caso de éxito: Prevención del brote de grasa blanca en la superficie del chocolate.

Uno de los mayores defectos en la calidad en el chocolate es la aparición de una capa de grasa blanca en su superficie y, aunque esta capa es inofensiva para la salud, causa pérdidas millonarias a la industria alimentaria, ya que los consumidores terminan por no comprar chocolate cuando observan este defecto.

La compañía multinacional Nestlé, con investigadores de la Universidad Tecnológica de Hamburgo, estudió el fenómeno con ayuda del sincrotrón PETRA III en Alemania. Con esta herramienta fue posible observar el proceso por el que se forma la capa de grasa en tiempo real. Observaron que las grasas líquidas (principalmente mantequilla de cacao) migran a la superficie del chocolate, se cristalizan y forman la capa blanca. Para mitigar este problema se desarrollaron procesos para hacer chocolate menos poroso, dificultando y retardando la aparición de la capa.

Iniciativa para construir un sincrotrón en México

La construcción de un sincrotrón en México representaría un proyecto científico y tecnológico de gran envergadura y de

una alta utilidad potencial para nuestro país. Hace algunos años se hizo un proyecto del Fondo Mixto del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT con el Gobierno del Estado de Morelos, para construir un sincrotrón en el país. La propuesta obtuvo un apoyo cercano a los siete millones de pesos para hacer el diseño conceptual de la máquina. En base a experiencias anteriores, el proyecto se dividió en tres etapas (tabla 1).

La propuesta tiene las siguientes características: tercera generación, longitud del anillo de 400 metros, energía de tres giga-electronvoltios y una corriente de 500 mili-amperios (tabla 1). También se sugiere actualizarlo a los 25 años de vida, para seguir vigente por 10 y 15 años adicionales. El centro de investigación deberá ser de calidad mundial, con una vigencia de 30 años aproximadamente.¹² También se considera la creación de un programa de becas para formación de recursos humanos especializados en la construcción, operación y administración del sincrotrón.

En los libros blancos de la Comisión de Ciencia y Tecnología de la LXII Legislatura de la Cámara de Diputados se recomienda apoyar el proyecto del sincrotrón.²¹ En septiembre del año 2015 se presentó el proyecto de construcción en el

Tabla 1. Etapas propuestas para la construcción de un sincrotrón en México.

Etapa	Descripción	Tiempo (años)	Costo aprox. (mdd)
I	Proyecto técnico detallado para el diseño de la máquina (equipo de físicos e ingenieros)	2	15
II	Proyecto arquitectónico y de ingeniería detallado para el diseño del centro de investigación que albergará la máquina (equipo de arquitectos e ingenieros)	2	25
III	Construcción del sincrotrón (máquina y centro de investigación)	5 a 6	460
Total		9 a 10	500

Senado de la República,¹² lo cual derivó en una recomendación por parte del Poder Legislativo para inscribir la construcción del sincrotrón mexicano en el Proyecto de Egresos de la Federación (PEF) 2016. Sin embargo, a la fecha (Febrero 2018) el Gobierno Federal no ha destinado recursos para tal fin.

Tabla 2. Retos por superar y beneficios que traería el proyecto del sincrotrón en México.

Retos a superar	Beneficios potenciales
<ul style="list-style-type: none"> Además de las necesidades de la academia, se deberán atender las de la industria. Se requiere un modelo de negocio para este fin; como se ha hecho en otros países. Desde la fase de diseño hasta su construcción, el proyecto tomaría alrededor de 10 años; los tiempos políticos en México son de seis, por lo que se requiere una voluntad política trans-sexenal, de largo plazo. La inversión total que requeriría el proyecto oscila entre 300 y 500 millones de dólares.¹² Deben generarse mecanismos para que el financiamiento del proyecto esté garantizado y fluya a lo largo de sus 10 años de desarrollo. El costo de operación anual, podría rondar los 40 millones de dólares aproximadamente.¹² Existe poca experiencia de nuestro país en mega-proyectos científicos.²⁵ Se necesitan formar equipos especializados en su construcción, operación, actualización y administración, por lo que se requieren los presupuestos específicos para estos fines. La decisión sobre el proyecto debe tomarse únicamente con base al mérito, impacto, oportunidad y planeación de la iniciativa. 	<ul style="list-style-type: none"> Ampliar la facilidades para investigar y resolver problemas relevantes en México. Impulsar el desarrollo tecnológico y la generación de recursos humanos altamente especializados. Posibilitar el desarrollo de nuevos productos de base tecnológica con procesos competitivos a nivel global. Permitir la investigación científica para la innovación. Se crearán más vínculos entre los sectores empresarial y académico. Incentivar la creación de industrias de muy alta tecnología y valor agregado, trayendo beneficios económicos en ingenierías de alta precisión, tecnologías de alto vacío y bajas temperaturas, así como en el área de detectores electrónicos de alta velocidad. Considerando la experiencia del sincrotrón de <i>Daresbury</i>, el impulso a la ciencia y a la tecnología podría ser muy importante y altamente redituable.

Usuarios mexicanos de sincrotrón

Hay una red temática de usuarios de luz sincrotrón (Red-TULS)²² conformada por más de 120 investigadores²³ que es financiada por el CONACYT, en conjunto con la Universidad de Guanajuato y la Universidad Nacional Autónoma de México. La red temática está vigente y tiene reuniones en diferentes ciudades del país.²⁴

Los investigadores nacionales usan de forma rutinaria los sincrotrones de Estados Unidos, Europa, Brasil y Japón. Asimismo, cinco investigadores mexicanos trabajan permanentemente como parte del personal que opera los sincrotrones de otros países.

Retos y beneficios potenciales del proyecto del sincrotrón en México

Existen varios retos por resolver, pero si se logra construir tendría importantes beneficios. En la tabla 2 se da un resumen de las opiniones expresadas por miembros de la comunidad de ciencia, tecnología e innovación.

Bibliografía

1. Del Rio V (2015). Estudio de Viabilidad para la Construcción de un Sincrotrón en Morelos. Proyecto FOMIX, UNAM, Conacyt, Estado de Morelos, p63
2. Abela, Aghababayan, Altarelli, et al. The European X-Ray Free-Electron Laser Technical design report, 2006. (Disponible aquí).
3. Wilson EJM (1996) Fifty Years of Synchrotrons. European Organization for Nuclear Research (CERN) (Disponible aquí)
4. Nota corta "Synchrotron light" del Instituto de Física de Reino Unido. (Disponible aquí).
5. Información técnica y motivación del sincrotrón australiano. (Disponible aquí).
6. L'Annunziata MF (2016) Radioactivity: Introduction and History, From the Quantum to Quarks, Second Edition, pp 286. Elsevier publishers.
7. Bilderback, DH, Elleaume P & Weckert E, J of Phys B: Atom, Mol and Opt Phys, 38 (9), pp. 773-779.
8. Kunz C., (2001), J of Phys: Cond Matt, 13, pp. 7499-7510.
9. Winick, H., Fourth generation light sources (1997) Menlo Park, CA.
10. Barletta W, Borland M. eds (2010) Basic Energy Sciences Workshop on Compact Light Sources, 4, Mayo 11-12, 2010 - Rockville Hilton, Rockville, MD
11. Preguntas y respuestas en el sitio web del sincrotrón europeo (Disponible aquí)
12. Antillón A, Jiménez J, Valderrama B, et al (2015), México Hacia el Salto Tecnológico y Científico: Sincrotrón. Foro del Senado de la República. (Disponible aquí).
13. Información técnica y motivación del sincrotrón SESAME. (Disponible aquí).
14. Sitio web dedicado al sincrotrón del departamento de física del CINVESTAV (disponible aquí).
15. ElkeBräuer-Krisch et al., (2015), Phys Med, 31 (6), pp. 568-583.
16. C. Pichon y J. Lynch, (2005) Oil & Gas Sci and Tech – Rev., 60 (5), pp. 735-746.
17. Karna RR, Hettiarachchi GM, Newville M, et al (2016), J Environ Qual. 2016 Nov;45(6):1883-1893. doi: 10.2134/jeq2015.12.0616.
18. New Light on Science: The Social & Economic Impact of the Daresbury Synchrotron Radiation Source, (1981-2008) (Disponible aquí)
19. Greaves GN, Catlow CRA, Derbyshire GE, et al (2008) Nat Mater 7, 827 - 830.
20. Torres Oviedo A & Reyes Herrera J. (2015). Aplicaciones industriales de la luz Sincrotrón (-Por el momento no está disponible al público en general-).
21. Félix H. y López T. (editores) (2015) Libros blancos de la Comisión de Ciencia y Tecnología de la LXII Legislatura de la Cámara de Diputados, Cámara de Diputados, Congreso de la Unión.
22. Sitio de Internet de la Red TULS Sincrotrón (Disponible aquí)
23. Sitio de Internet, Integrantes de la Red TULS (Disponible aquí)
24. Sitio de Internet "esloCotidiano" (Disponible aquí)
25. Del Río Bello, V. (2016), En pos del primer Sincrotrón en México, Invest y Des, pp. 1- 6.t