

## Aspectos epistemológicos e históricos de la precisión en las mediciones en física

*Víctor Rodríguez \**, *Pedro W. Lamberti †*

Este trabajo pretende focalizarse en la dinámica de las mediciones de alta precisión en el ámbito de la metrología contemporánea y de la física experimental. El enfoque se realiza bajo la hipótesis de que la evolución de las mismas conlleva un conjunto de cuestiones conceptuales y de prácticas experimentales que ofrecen un amplio abanico de temas de interés para la consideración epistemológica. Como ha sido dicho con frecuencia, con mejores instrumentos para medir, uno puede ver donde nadie ha visto, es decir, esta acción lleva el germen de nuevos conocimientos. Lo interesante, desde nuestro punto de vista, es que las prácticas de medir enriquecen la epistemología de la experimentación con matices propios de la vida de los laboratorios. En particular, entendemos que actualmente se asiste a un despliegue artesanal extraordinario en el ámbito de los laboratorios especializados alrededor del mundo. Ello constituye un arma de doble filo. Por un lado, refuerza claramente la presencia de la tecnología en las investigaciones y aplicaciones, pero por otra parte, contribuye a ocultar el alcance filosófico de las nuevas maneras de caracterizar algunos fenómenos físicos y químicos a la luz de estas prácticas y de estos nuevos instrumentos. En ellos, la creatividad al servicio de la artesanía y la invención en el campo de la medición eclipsan un modo tradicional de interpretar los procedimientos de medir.

Por razones de la extensión del trabajo, se eligen para este artículo solamente las mediciones del tiempo o, dicho de otro modo, de las frecuencias, entendiendo que ellas constituyen actualmente el ejemplo más significativo de las mediciones de alta precisión. Como es sabido, dadas las cualidades comparativas de medir frecuencias, se ha considerado conveniente a nivel de la comunidad metrología internacional transformar otras cantidades, como el voltaje o la longitud, en frecuencias. Al respecto, Hänsch (2006) cita a un colega diciendo a sus estudiantes; “no midan otra cosa que frecuencias”. Una de las razones de este protagonismo es que medir frecuencias es contar números de ciclos dado un intervalo temporal y esa operación de contar es en muchos casos más operativa y fácil de realizar que otras operaciones físicas, como por ejemplo, desplazar algo. Por otra parte, este proceso digital es más inmune a muchas fuentes de ruido. El campo mencionado, como varios ámbitos de la física experimental en este dominio, es de bastante difícil acceso, fundamentalmente debido a la jerga especializada de términos técnicos que ha ido generando y a la sutileza de las prácticas involucradas. Sin embargo, en la siguiente sección, haremos un rápido repaso de la evolución de la medición del tiempo en los últimos 60 años. Veremos allí el caso de la atto-física, que se refiere, en el sector de mediciones temporales, a mediciones en el dominio de  $10^{-18}$  segundos. Estas fracciones están demasiado

\* Universidad Nacional de Córdoba

† Universidad Nacional de Córdoba y CONICET

lejos de nuestra vida cotidiana como para poder establecer comparaciones razonables. Pero hay que recordar que  $10^{-3}$  segundos es una milésima de segundo y aún esa medición se halla en los límites de nuestra experiencia cotidiana. El salto hasta  $10^{-15}$  o  $10^{-18}$  es gigantesco, y sin embargo es alcanzado por algunas tecnologías de frontera. La imagen científica del mundo no sólo está formada por interpretaciones de teorías especulativas, sino también por prácticas estrafalarias en el seno de los laboratorios. A modo de ejemplo, vale destacar el campo de las constantes naturales consideradas importantes en nuestra descripción del mundo físico. Allí, cada nuevo dígito obtenido puede significar una nueva física. La precisión de las mediciones puede permitir obtener mayor estabilidad en los procesos o visualizar la presencia de ligeros cambios en los mismos. Más allá de las teorías altamente competentes de la física, vivimos en ella gracias a una suerte de esqueleto óseo provisto por el valor de ciertas constantes. Ellas son las que permiten ajustar ciertas estrategias comparativas a valores numéricos dentro del arte de medir.

Cuando se leen los trabajos actuales en el campo de la física mencionada, primero, impresiona el alto nivel técnico involucrado; segundo, el lenguaje especializado, que no es de acceso directo; tercero, el manejo de la óptica no lineal; cuarto, la materia y su interacción con la radiación en varias longitudes de onda juegan un rol protagónico principal; quinto, el láser es la niña mimada de la metrología aplicada en este nivel. Naturalmente, podrían agregarse varias caracterizaciones adicionales.

Un segundo recorte que se hace aquí, es la focalización en la zona correspondiente a la transición entre la femto física y la atto física. Esto es, entre  $10^{-15}$  segundos y  $10^{-18}$  segundos. La razón principal para ello es que en la primera región existe una física considerablemente asentada y robusta, mientras que en la segunda, todavía se observa un panorama exploratorio de gran investigación experimental, pero en sus comienzos. Hay que recordar que hace alrededor de tres décadas que se logran producir pulsos de láser muy intensos del orden del femto segundo. Esta situación cambió el perfil del arte de medir y también influyó sobre el esquema conceptual asociado a él. La aparición de fenómenos no lineales fue quizás una de sus principales consecuencias.

Considerando la transición mencionada desde la femto-física a la atto-física, siguiendo a uno de los principales referentes sobre el tema, Corkum (2007), la estrategia consistió en lanzar pulsos de femto-segundos sobre un gas, originándose armónicos altos de la frecuencia láser. Aquí se consideraron varios procesos: la ionización por efecto túnel, la aceleración del grupo electrónico y la re-colisión de electrones e iones. En el primer caso, el electrón, gracias al efecto túnel, cruza la barrera de potencial producida por la carga del ión, conjuntamente con el campo eléctrico del láser. El efecto túnel da la probabilidad de ionización en un ciclo de la oscilación. Es de señalar que este último concepto es relevante aquí porque estamos interesados en las mediciones de frecuencias. En el segundo caso, el grupo de electrones gana energía cinética del campo eléctrico. Una cantidad de energía cinética dará otra relacionada con la energía de los fotones en el pulso emitido de estos últimos en atto-segundos. En el tercer caso, el de la re-colisión, la energía cinética, la amplitud y la fase del grupo electrónico pasan al pulso del fotón. Aquí lo que sucede es que, al controlar la fase del pulso óptico de femto-segundos, puede

controlarse la fase, la energía cinética y la amplitud del pulso producido en atto-segundos. Hasta donde es posible apreciar esta artesanía, al conocimiento de los fenómenos en femto-segundos, se suma un conjunto particular de condiciones especiales, producto de ensayos exploratorios, de invenciones de diseños de experimentos, o simplemente de una dosis de creatividad, para dar lugar a la aparición y detección de fenómenos más pequeños. Esta dinámica es extraordinaria, tanto desde el punto de vista teórico como desde los laboratorios, construyendo una dinámica de acceso al nano-mundo que habilita para hacer ejercicios conceptuales de reduccionismo. Un ejemplo de esto es la posibilidad de analizar los movimientos de los electrones en moléculas, con el consiguiente cambio en la noción de representación asociada con ellos. Por otra parte, también se ha producido un cambio de perspectiva en relación con la tecnología involucrada. Se trata de algo muy diferente a lo que se obtiene en el ámbito de los femto-segundos, en donde, por amplificación de luz coherente y técnicas no-lineales asociadas con el láser, la metrología y las prácticas experimentales brindaron un abanico de posibilidades para el desarrollo de tecnologías. Aquí hay un cierto consenso sobre una diferencia actual entre femto-física y atto-física, ya que no parece fácil obtener fuentes estables de atto-pulsos.

A esta altura de la aproximación que intentamos realizar al tema, es conveniente dedicar un párrafo a la evolución del láser. No se pretende intentar reiterar aquí la descripción de este tópico, ya que sobran los libros dedicados al tema. Simplemente, cabe destacar que desde hace varias décadas se vienen obteniendo resultados que son producto de nuevas estrategias, las que a su vez se transformaron en mojonos para desarrollos posteriores. Según cuenta F. Major (1998), en la primera conferencia internacional, en 1959, en la que se presentaron trabajos sobre máseres ópticos, el tópico principal no fue el láser, sino el método del bombeo óptico para observar resonancia magnética en átomos libres. Lo curioso es que la sesión dedicada a los láseres fue una sesión de misceláneas. El contraste con la época actual no puede ser mayor. Entre estos extremos, la técnica de acoplamiento de pulsos, que permite sintonizar las fases de los modos de la cavidad láser, permitió el acceso a pulsos en el rango de los pico-segundos ( $10^{-12}$ ) y luego de femto-segundos; posteriormente, con láseres de estado sólido, se obtuvieron pulsos muy estables de algunos femto-segundos. Conviene detenerse aquí por un momento para ponderar esta dinámica. Lo llamativo de todos estos procesos es que parecen dejar en claro hasta dónde se puede llegar usándolos; esto es, asumir la evidencia de límites fundamentales para una metodología y practica dadas. Hasta ahora, esta historia sugiere que cada nuevo avance es consecuencia de un nuevo ejercicio de imaginación en el entorno de los procesos físicos que están presentes. Por ejemplo, el modo de producir pulsos más cortos (y por lo tanto, de una mayor frecuencia) impulsó la necesidad de construir fuentes de longitudes de onda más cortas y ello condujo al tratamiento en los límites de los procesos no lineales. Así apareció lo que se ha llamado la generación de armónicos altos; dicho sea de paso, por un mecanismo similar al mencionado arriba, asociado con Corkum.

A modo de síntesis, consideramos que el párrafo siguiente enuncia con total claridad este ámbito de fenómenos<sup>1</sup>:

*“la tecnología de los atto-segundos es un distanciamiento radical de toda la tecnología óptica (y de colisión) que la precedió. Funde la óptica física con la física de colisiones. La tecnología abre problemas importantes en cada área de la ciencia para el estudio por medio de métodos previamente inaccesibles. Subyacente a la tecnología de los atto-segundos está un campo intenso [de radiación] láser. Este extrae un electrón de un átomo o molécula ... El electrón es tirado afuera de su ión asociado, y conducido hacia atrás luego de que el campo se revierte. El electrón puede entonces re-colisionar con su ión asociado. Debido a que el electrón re-colisionante tiene una longitud de onda de aproximadamente un Angström, podemos medir las dimensiones espaciales al Angström. Debido a que el campo fuerte dependiente del tiempo del pulso de luz direcciona al electrón con precisión de un subciclo, podemos controlar y medir fenómenos en atto-segundos”* (Levesque – Corkum, 2006).

Algunos hitos en la medición precisa del tiempo:

Los relojes atómicos fueron inventados a mediados del siglo pasado. La disponibilidad de este tipo de dispositivos permitió la redefinición del *segundo* en término de la frecuencia hiperfina del átomo de Cesio (Cs). El *metro*, introducido en 1793 como la diez millonésima parte del largo del cuadrante sobre el meridiano que pasa por Paris, sufrió varias redefiniciones a la luz de la accesibilidad a nuevas tecnologías. Finalmente, como ya fue dicho, el metro terminó siendo una unidad derivada. El principal desarrollo tecnológico asociado con este cambio de rol del metro, fue el láser. Se observó que los láseres podían estabilizarse sobre ciertas transiciones moleculares de modo de lograr una estabilidad en frecuencia, por encima de 1 parte en  $10^{10}$ . En los años 70 del siglo pasado se desarrollaron métodos para comparar la frecuencia de un láser con la frecuencia de reloj atómico. Esto permitió medir la velocidad de la luz ( $c$ ) con muy alta precisión: multiplicando la frecuencia por la longitud de onda del láser, se obtiene el valor de la velocidad de la luz. Las características espectrales de la radiación usada, impusieron limitaciones en la precisión en  $c$  a 4 partes en  $10^9$ . No solo las asimetrías en el espectro ponen límite a este modo de medir  $c$ , sino también las limitaciones ópticas en la realización experimental del metro (límite de difracción). De las tres cantidades, el metro, el segundo y la velocidad de la luz, sólo dos pueden definirse de manera independiente. En la elección, se optó por tomar al metro como la cantidad derivada. Así fue que en 1983 se decretó que la velocidad de la luz es igual a 299.792.458 m/s. Y el metro se tomo como la fracción de distancia que la luz recorre en un segundo. Con esta nueva definición el modo más preciso de encontrar la longitud de onda  $\lambda$  de la luz proveniente de un láser, es medir su frecuencia  $f$  y usar la expresión  $\lambda = c/f$ . La dificultad en este esquema radica entonces en medir la frecuencia con alta precisión. La solución a este problema provino de un dispositivo conocido como *peine de frecuencia*. Sin entrar en demasiados detalles un peine de frecuencias consiste en un láser, que funciona como un oscilador local, en resonancia con una transición atómica. Una señal correctiva es derivada de la espectroscopia atómica, la cual es retro-alimentada al láser. Un sintetizador que trabaja a frecuencia óptica - peine óptico de frecuencia - es usado para dividir la frecuencia óptica a señales cuantificables en el rango de micro-ondas o radio frecuencias. El trabajar con frecuencias ópticas, permite lograr dos aspectos fundamentales de un buen

reloj: estabilidad e incertidumbre. Para entender mejor estas características, reconsideremos el elemento temporizador en un reloj atómico: la frecuencia de una transición entre niveles de energía de un átomo o un ión. La precisión de la medición del reloj es proporcional al tamaño de la frecuencia de transición, suponiendo que la capacidad para medir la frecuencia se mantiene. Debido a que las frecuencias ópticas son más altas que las frecuencias de microondas por un factor de  $10^5$ , los relojes ópticos tienen el potencial de ser enormemente más precisos que los relojes de Cs.

### **Consideraciones finales**

El disponer de relojes cada vez más precisos y estables conlleva a nuevos problemas e implicancias fundamentales. Uno de estos problemas tiene que ver con la idea de sincronización de relojes. El acceder a este nivel de precisión introduce una variedad de efectos a ser tenidos en cuenta. Recientemente dos grupos de trabajo, uno encabezado por T. Rosenband (2008) y otro a cargo de A.D. Ludlow (2008) compararon dos relojes (uno que usaba iones de Al y el otro iones de Hg) y midieron la relación de frecuencias de los dos relojes a una incerteza de  $5,2 \times 10^{-17}$ . Esta es una de las mediciones más precisas realizada en física hasta la fecha. Al realizar estas mediciones nos aproximamos tanto como se puede a las limitaciones que impone la mecánica cuántica. Cuando se logra tal nivel de precisión, se debe tomar en cuenta efectos cada vez más sutiles. Por ejemplo se deben considerar pequeñas contribuciones de  $1 \times 10^{-18}$  debidas a la incerteza en el potencial gravitatorio de los dos relojes (claramente debido a efectos relativistas).

Aun cuando hemos considerado solamente un tipo de medición, no escapa a la consideración general que los avances en la metrología están produciendo nuevas aproximaciones conceptuales en el desarrollo de la física. Desde nuestro punto de vista, también hemos podido detectar que esta dinámica incide sobre aspectos básicos, como por ejemplo el estudio de la constancia de las constantes de la naturaleza. Otro ámbito espectacular es el relacionado con las mediciones precisas en Electrodinámica Cuántica (QED). Los átomos son sistemas esencialmente descritos por la QED. En particular, debido a sus espectros simples, ciertos átomos han sido eficientemente usados para la medición precisa de cantidades muy significativas dentro de la física, como el factor giro-magnético del electrón, o la constante de estructura fina, entre otras.

Las consideraciones anteriores nos permiten concluir que la metrología es un campo extremadamente rico para la reflexión epistemológica. En él, muchas veces sucede que los términos teóricos de la física, al igual que las olas frente a la arena y las rocas de ciertas costas marítimas, deben detener su marcha y acusar la metamorfosis que les produce el arte de medir.

---

### **Notas**

1. La traducción del inglés es nuestra

## **Bibliografia**

- CORKUM P., KRAUSZ F. (2007): Attosecond science. *Nature Physics Vol. 3, June, 381-387.*
- HÄNSCH T. (2006): Nobel Lecture: Passion for precision. *Reviews of Modern Physics, Vol 78, Oct.-Dec., 1297-1309.*
- HENTSCHEL M. ET AL (2001): Attosecond metrology. *Nature Vol. 414, 29 Nov., 509-513.*
- LEVESQUE J., CORKUM P. (2006): Attosecond science and technology. *Can. J. Phys. 84; 1-18.*
- LUDLOW A.D. ET. AL. (2008): Sr Lattice Clock at  $1 \times 10^{-16}$  Fractional Uncertainty by Remote Optical Evaluation with a Ca Clock . *Science 319, 1805-1808.*
- MAJOR F. G. (1998): *The Quantum Beat. The Physical Principles of Atomic Clocks.* Springer-Verlag, New York.
- ROSEN BAND T. ET. AL. (2008): Frequency Ratio of  $\text{Al}^+$  and  $\text{Hg}^+$  Single-Ion Optical Clocks; Metrology at the 17th Decimal Place. *Science 319, 1808-1812.*

# **Filosofía e Historia de la Ciencia en el Cono Sur**

Selección de trabajos del IX Encuentro y las XXV Jornadas  
de Epistemología e Historia de la Ciencia

José V. Ahumada  
A. Nicolás Venturelli  
Silvio Seno Chibeni

Editores

Asociación de Filosofía e Historia de la Ciencia del Cono Sur,  
Área Lógico–Epistemológica de la Escuela de Filosofía y  
Centro de Investigaciones de la Facultad de Filosofía y Humanidades  
Universidad Nacional de Córdoba

Ahumada, José – Venturelli, Nicolás – Chibeni, Silvio Seno (Editores)  
Filosofía e Historia de la Ciencia en el Cono Sur. Selección de trabajos del IX Congreso y  
las XXV Jornadas de Epistemología e Historia de la Ciencia.

Edición técnica: Natalia Rojo  
Diseño de tapa: Manuela Eguía

---

Ahumada, José

Filosofía e historia de la ciencia en el Cono Sur : selección Selección de trabajos del IX  
Encuentro y las XXV Jornadas de Epistemología e Historia de la Ciencia / José Ahumada;  
Nicolás Venturelli; Silvio Seno Chibeni; compilado por José Ahumada; Nicolás Venturelli;  
Silvio Seno Chibeni; editado por José Ahumada; Nicolás Venturelli; Silvio Seno Chibeni.-  
1a ed . - Córdoba : Editorial de la UNC, 2015.

716 p. ; 21 x 17 cm.

ISBN 978-987-707-026-2

1. Filosofía de la Ciencia. 2. Historia. 3. Epistemología. I. Ahumada, José, comp. II.  
Venturelli, Nicolás, comp. III. Seno Chibeni, Silvio, comp. IV. Ahumada, José, ed. V.  
Venturelli, Nicolás, ed. Seno Chibeni, Silvio, ed. VI.

CDD 501

---

Correo electrónico:  
ejorn@ffyh.unc.edu.ar

Internet: <http://www.ffyh.unc.edu.ar/ejorn/>  
<http://www.afhic.com/>

<b>Análisis histórico y filosófico del privilegio de los genes en los principales programas de investigación de la biología del comportamiento .....</b>	<b>515</b>
Nahuel Pallitto, Christian Francese	
<b>As investigações de Edith Rebecca Saunders sobre a hereditariedade: 1902-1908 .....</b>	<b>525</b>
Ana Paula de Oliveira Pereira de Morais Brito, Lilian Al-Chueyr Pereira Martins	
<b>Weismann e a transmissão de caracteres adquiridos: os cientistas podem mudar de ideia .....</b>	<b>533</b>
Lilian Al-Chueyr Pereira Martins	
<b>Una lectura sobre interacciones entre modelos y algoritmos en el emerger de la química computacional.....</b>	<b>541</b>
Silvia Polzella, Penelope Lodeyro	
<b>T-teoricidad en el contenido aplicativo: una lectura estructuralista a Kuhn para responder a una crítica realista de Boyd.....</b>	<b>549</b>
Jorge Prado Carvajal	
<b>Una aproximación astronómica al primer motor inmóvil.....</b>	<b>557</b>
Gonzalo Luis Recio	
<b>El discurso de la sincronización en el Observatorio de Córdoba. Ciencia, sociedad y Estado en la Argentina del siglo XIX .....</b>	<b>567</b>
Marina Rieznik	
<b>Aspectos epistemológicos e históricos de la precisión en las mediciones en física.....</b>	<b>575</b>
Víctor Rodríguez, Pedro W. Lamberti	
<b>La deriva genética como fuerza evolutiva .....</b>	<b>581</b>
Ariel Jonathan Roffé	
<b>La inconmensurabilidad entre las teorías planetarias de Ptolomeo y Copérnico: dos enfoques contemporáneos .....</b>	<b>591</b>
Ariel Jonathan Roffé	
<b>Cero o No Ser: Genealogía del cero.....</b>	<b>603</b>
Leila Gisela Rosset Luna	