



TRACKS

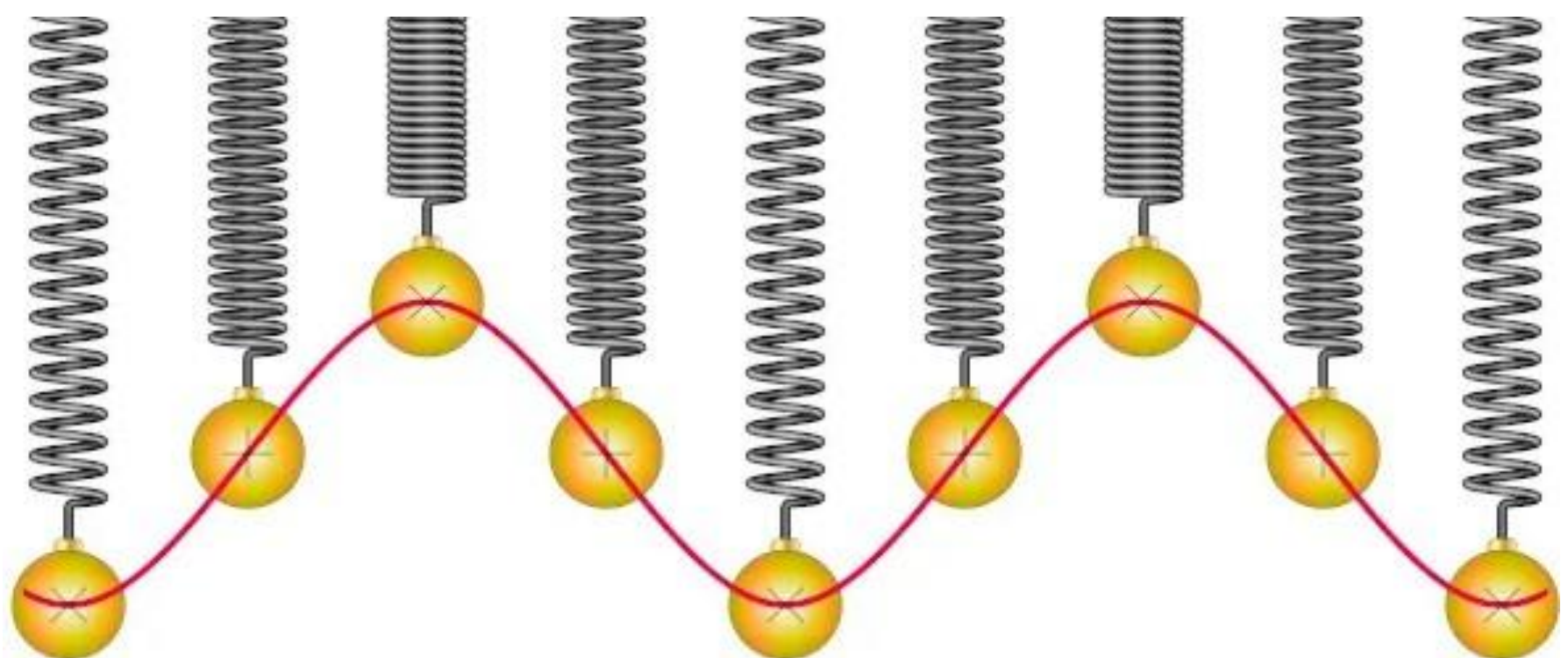
Innovation for Social Welfare

We are pleased to present this new edition of Tracks: Innovation for Social Welfare, in which we highlight a fascinating research project led by Dr. Jonatan Peña Ramírez, expert in the field of mechanical oscillator synchronization. This project, which explores the fundamental principles of spontaneous synchronization in coupled systems, has opened new doors to understanding natural phenomena in physics. Through pioneering experiments such as the Huygens pendulum clocks and mechanical metronomes, it has been possible to discover how systems can be synchronised naturally without external intervention, Providing valuable knowledge ranging from robotics to understanding biological rhythms in living beings.

PUENTES

Innovación para el Bienestar Social

Nos complace presentar esta nueva edición de Puentes: Innovación para el Bienestar Social, en la que destacamos un fascinante proyecto de investigación liderado por el Dr. Jonatan Peña Ramírez, experto en el campo de la sincronización de osciladores mecánicos. Este proyecto, explora los principios fundamentales de la sincronización espontánea en sistemas acoplados, ha abierto nuevas puertas para comprender fenómenos naturales en la física. A través de experimentos pioneros como los de los relojes de péndulo de Huygens y los metrónomos mecánicos, se ha logrado descubrir cómo los sistemas pueden sincronizarse de manera natural sin intervención externa, proporcionando valiosos conocimientos aplicados a disciplinas que van desde la robótica hasta la comprensión de los ritmos biológicos en seres vivos.



This innovative project reflects the interconnectedness between basic science and its potential application in technological areas. Contributing significantly to international collaboration and the development of new technologies. This could transform the future of dynamic cooperative systems.

Este proyecto innovador refleja la interconexión entre la ciencia básica y su potencial aplicación en áreas tecnológicas, contribuyendo significativamente a la colaboración internacional y al desarrollo de nuevas tecnologías que podrían transformar el futuro de los sistemas dinámicos cooperativos.

We hope you find the articles in this edition engaging and we invite you to share your comments with us at:
cooperacionpba@sre.gob.mx.

Esperamos que los artículos de esta edición le resulten interesantes y le invitamos a compartir sus comentarios con nosotros en:
cooperacionpba@sre.gob.mx.



“Synchronization: the symphony of rhythms in México, Netherlands, and the Universe”

“Sincronización: La sinfonía de ritmos en México, Países Bajos y el Universo”

Oscillations are the hallmark of motion in the Universe. In fact, our planet itself is full of oscillatory rhythms, being them natural or artificial. Think for example on the day and night cycle, the weather, the tides, an earthquake, the ups and downs in the economy, the electric current that powers industrial processes and residential areas, and many other examples that we can bring to mind. The natural world also offers countless examples: the birds, bats, and many insects flap their wings in an oscillatory fashion, fireflies blink to attract mates, fishes swim in a graceful undulatory pattern, just to mention a few. Our body also contains a whole oscillatory symphony: circadian rhythms regulate the processes in our organism, many cells like pacemakers, neurons, and beta cells have a firing activity, which is key for the proper functioning of the heart, brain, and pancreas, respectively.

Las oscilaciones son el sello del movimiento en el Universo. De hecho, nuestro planeta está lleno de ritmos oscilatorios, sean naturales o artificiales. Piense, por ejemplo, en el ciclo del día y la noche, el clima, las mareas, un terremoto, los altibajos de la economía, la corriente eléctrica que alimenta los procesos industriales y las zonas residenciales, y muchos otros ejemplos que podemos recordar. El mundo natural también ofrece innumerables ejemplos: los pájaros, los murciélagos y muchos insectos que mueven sus alas de manera oscilante, las luciérnagas parpadean para atraer a sus parejas, los peces nadan en un patrón ondulado y armonioso, por mencionar solo algunos. Nuestro cuerpo también contiene una sinfonía oscilante entera: los ritmos circadianos regulan los procesos en nuestro organismo, muchas células como marcapasos, neuronas y células beta tienen una actividad de disparo, que es clave para el buen funcionamiento del corazón, cerebro y páncreas, respectivamente.



When two or more oscillatory systems interact with each other, an exciting and fantastic phenomenon may occur seemingly without any external intervention: their rhythms are eventually adjusted to a common rhythm, just like in an orchestra all the musicians play at the tempo dictated by the conductor. This phenomenon is called synchronization (Pena Ramirez & Nijmeijer, 2020).

Due to this phenomenon, we can observe birds flapping their wings in synchrony, fireflies blinking at the same time, fishes grouping together in a shoal and swimming as a single entity, pacemakers cells firing in unison in a healthy heart or synchronized neural activity inside the brain.

Cuando dos o más oscilaciones interactúan una con la otra, un fenómeno emocionante y fantástico puede ocurrir aparentemente sin ninguna intervención externa: los ritmos eventualmente se ajustan en un ritmo común, como en una orquesta, los músicos tocan al tempo dictado por el director. Este fenómeno se denomina sincronización (Pena Ramirez & Nijmeijer, 2020).

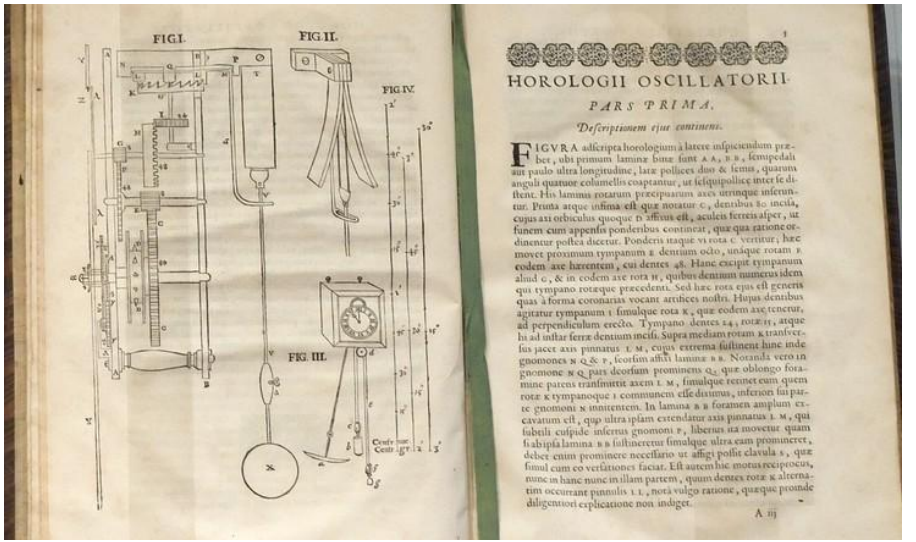
Debido a este fenómeno, podemos observar pájaros aleteando sus alas en sincronía, luciérnagas parpadeando al mismo tiempo, peces agrupados nadando como una sola identidad, las células de los marcapasos disparan al unísono en un corazón sano o actividad neuronal sincronizada dentro del cerebro.



Surprisingly, synchronization also occurs in inert systems, as discovered by the great Dutch scientist Christiaan Huygens, one of the most prominent scientists of the 17th century. He observed that two of his recently invented pendulum clocks attached to a wooden bar, were synchronized: the pendulums oscillated in opposite directions but at the same pace. He referred to this phenomenon, almost poetically, as *the sympathy of two clocks* (Pena Ramirez et al., 2013).



At this point, it is unavoidable to formulate the following questions. Why oscillatory systems have a tendency to synchronize their rhythms? Can any pair of identical systems just spontaneously synchronize? What are the required conditions for the onset of this phenomenon? Can we identify the “secret” behind the outbreak of synchronized behavior in live and inert systems?



Sorprendentemente, la sincronización también ocurre en sistemas inertes, como lo descubrió el gran científico neerlandés Christiaan Huygens, uno de los científicos más prominentes del siglo XVII. Observó que dos de sus relojes de péndulo recientemente inventados, unidos a una barra de madera, estaban sincronizados: los péndulos oscilaban en direcciones opuestas pero al mismo ritmo. El se refirió a este fenómeno, casi poéticamente, como *la simpatía de dos relojes* (Pena Ramirez et al., 2013).

A este punto, es inevitable formular las siguiente preguntas.

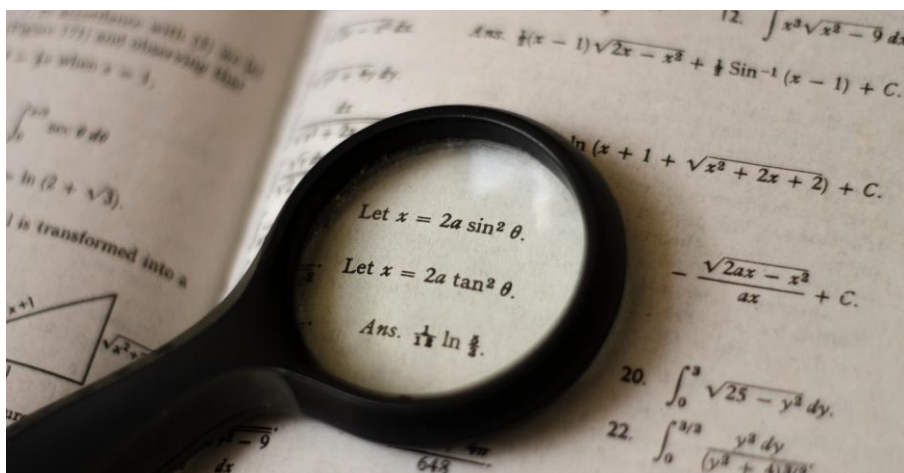
¿Por qué los sistemas oscilantes tienen tendencia a sincronizar sus ritmos? ¿Puede cualquier par de sistemas idénticos sincronizarse espontáneamente?

¿Cuáles son las condiciones requeridas para el inicio de este fenómeno? ¿Podemos identificar el “secreto” detrás de la aparición de un comportamiento sincronizado en sistemas vivos e inertes?



We ourselves have been attracted by these questions for many years and we have conducted synchronized (or rather cooperative/collaborative) research in order to find answers from a scientific perspective.

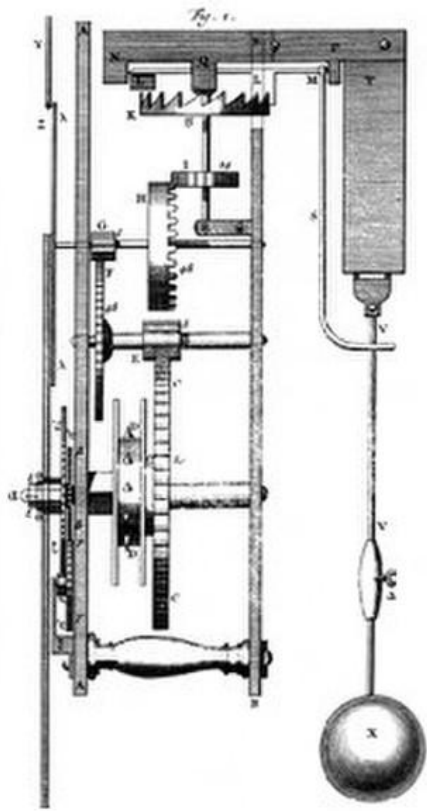
One of our representative works in this exciting area is related to the synchronization of mechanical oscillators—like for example, pendulum clocks or metronomes—interacting via dynamic coupling. In this regard, we have developed mathematical models that have been instrumental in identifying the cause of the synchronized motion and also for determining all the possible types of synchronization that may exist in the coupled systems, like for example, in-phase synchronization, where the amplitude, frequency and phase of the oscillators match completely; anti-phase synchronization, where only amplitude and frequency have a perfect agreement but the motion is in opposite directions (Pena Ramirez & Nijmeijer, 2019).



Nosotros mismos hemos estado atraídos por estas preguntas durante muchos años y hemos llevado a cabo investigaciones sincronizadas (o más bien cooperativas/colaborativas) con el fin de encontrar respuestas desde una perspectiva científica.

Uno de nuestros trabajos representativos en este campo emocionante está relacionado con la sincronización de osciladores mecánicos—como por ejemplo, relojes de péndulo o metrónomos—interactuando a través de acoplamiento dinámico. En este sentido, hemos desarrollado modelos matemáticos que han sido instrumentales para identificar la causa del movimiento sincronizado y también para determinar todos los tipos posibles de sincronización que pueden existir en los sistemas acoplados, como por ejemplo, la sincronización en fase, donde la amplitud, frecuencia y fase de los osciladores coinciden completamente; sincronización antifase, donde solo la amplitud y la frecuencia tienen una perfecta coincidencia pero el movimiento es en direcciones opuestas (Pena Ramirez & Nijmeijer, 2019).

Additionally, we have developed a mathematical framework for analyzing the existence and stability of synchronous solutions in weakly nonlinear oscillators with dynamic interactions. This framework allows predicting the amplitude, frequency and phase of the synchronous solutions and also gives conditions for the stability of such solutions (Pena Ramirez & Nijmeijer, 2016).



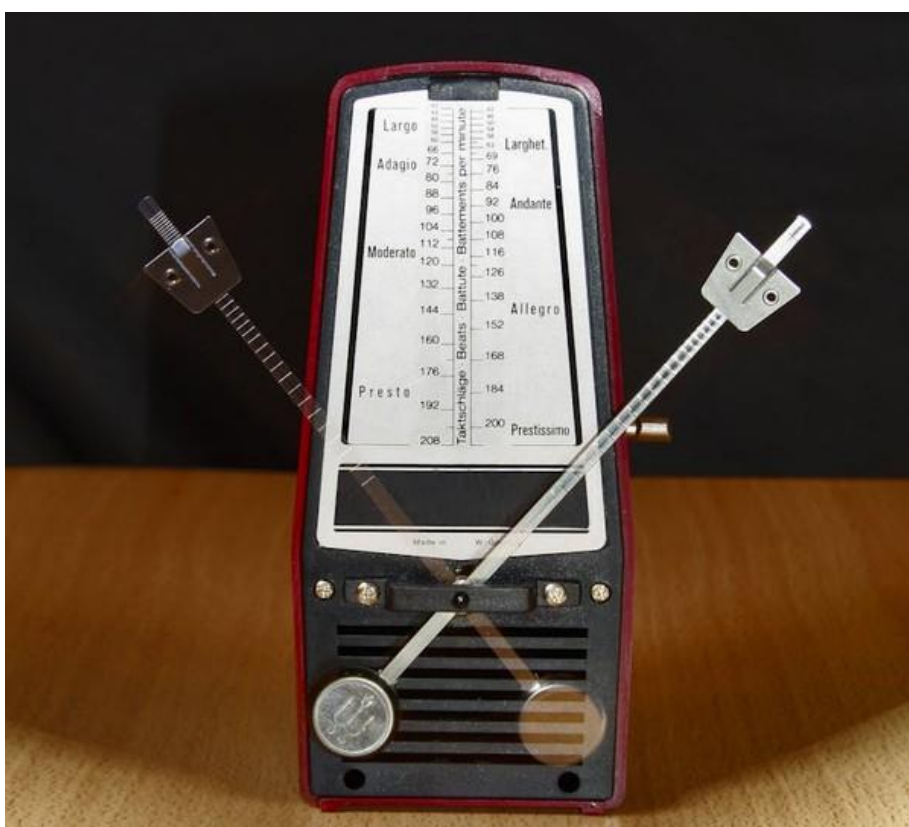
Besides mathematical models, we have also constructed experimental platforms for demonstrating the existence of spontaneous or rather natural synchronization in inert systems. One of these platforms consists in a pair of mechanical metronomes coupled through a suspended rigid bar. With the aid of this experimental setup, we have found that the mass of the rigid bar determines the type of synchronization that is observed in the metronomes: a light bar ("small" mass) will favor in-phase synchronization, whereas a heavy bar ("large" mass) yields anti-phase synchronization of the metronomes.

Adicionalmente, hemos desarrollado un marco matemático para analizar la existencia y la estabilidad de soluciones síncronas en osciladores débilmente no lineales con interacciones dinámicas. Este marco permite predecir la amplitud, frecuencia y fase de las soluciones síncronas y también da soluciones para la estabilidad de dichas soluciones (Pena Ramirez & Nijmeijer, 2016).

Además de los modelos matemáticos, también hemos construido plataformas experimentales para demostrar la existencia de la sincronización espontánea o más bien natural de los sistemas inertes. Una de estas plataformas consiste en un par de metrónomos mecánicos acoplados a través de una barra rígida suspendida. Con la ayuda de esta configuración experimental, hemos encontrado que la masa de la barra rígida determina el tipo de sincronización que se observa en los metrónomos: una barra ligera ("pequeña" masa) favorecerá la sincronización en fase, mientras que una barra pesada ("grande" masa) da lugar a una sincronización antifase de los metrónomos.



It has to be noted that the synchronization of metronomes is so attractive for almost everyone, in part because it does not require any effort to appreciate the synchronous behavior, since the harmony of rhythms not only can be seen but also it can be heard. This fact brought our experiment on synchronization of metronomes to be broadcasted by the Dutch television during a TV Science Quiz (*De Nationale Wetenschapsquiz 2012 | NPO Start*).



Back in 2016, we also constructed a modern version of Huygens' experiment on synchronization of pendulum clocks. For this, we collaborated with the Mexican company "Relojes Centenario" one of the first monumental clocks factories in Latin America, which is located in the magical town of Zacatlán, Puebla, México.

Hay que señalar que la sincronización de los metrónomos es tan atractiva para casi todos, en parte porque no requiere ningún esfuerzo para apreciar el comportamiento síncrono, ya que la armonía de los ritmos no solo puede ser vista sino también escuchada. Este hecho ha llevado a nuestro experimento sobre la sincronización de los metrónomos a que se difunda en la televisión neerlandesa durante un concurso científico (*De Nationale Wetenschapsquiz 2012 | NPO Start*).

En 2016, también construimos una *versión moderna* del experimento de Huygens sobre la sincronización de los relojes de péndulo. Para ello hicimos colaboración con la empresa mexicana "Relojes Centenario" una de las primeras fábricas de relojes monumentales en América Latina, ubicada en la mágica ciudad de Zacatlán, Puebla, México.





Following our advice and enthusiasm, they constructed a pair of weight-driven pendulum clocks as identical as possible, which later were placed on an ad hoc designed wooden structure. In this experimental setup, we discovered that, opposite to Huygens' observations, the pendulums synchronized in-phase.

More interestingly, we discovered something that Huygens' apparently missed: when the clocks are running synchronously, they become unreliable timekeepers because they slow down such that they loss about 1000 seconds per day. Our experimental findings were further explained by a detailed mathematical model (Pena Ramirez et al., 2016).

Siguiendo nuestro consejo y entusiasmo, construyeron un par de relojes de péndulo con impulsión de peso lo más idénticos posible, que luego se colocaron en una estructura de madera diseñada ad hoc. En esta configuración experimental, descubrimos que, al contrario de las observaciones de Huygens, los péndulos se sincronizaron en fase.

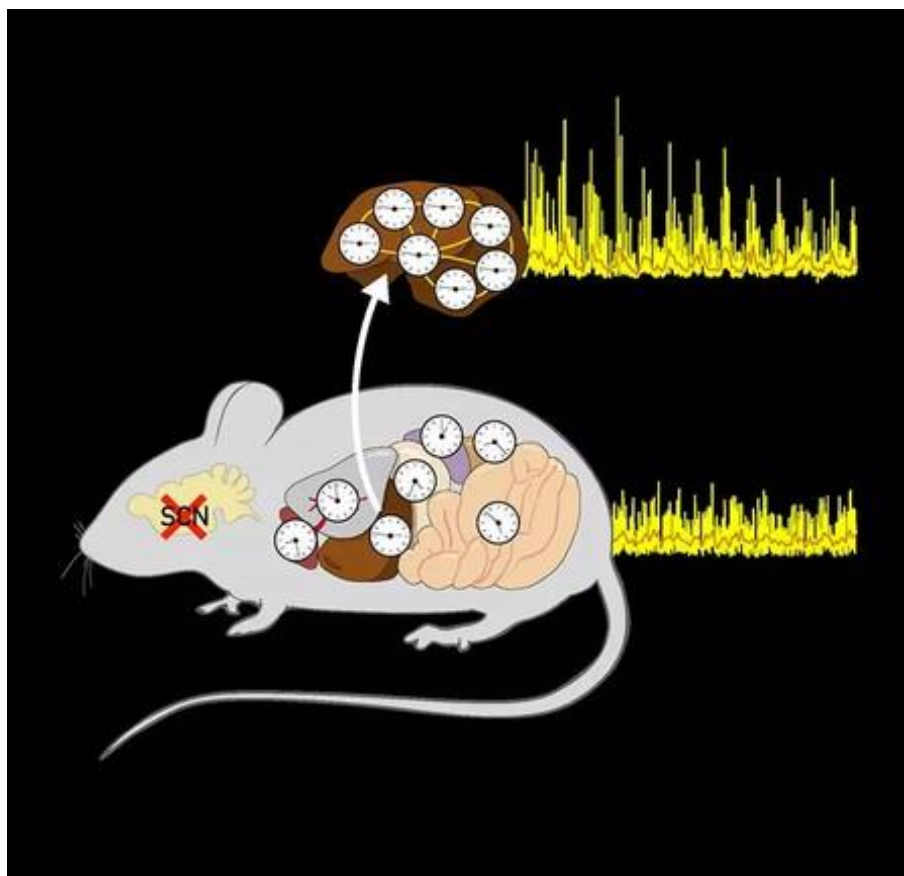
Más interesante, descubrimos algo que aparentemente Huygens no apreció: cuando los relojes corren simultáneamente, se vuelven cronometradores poco fiables porque reducen la velocidad de tal manera que pierden unos 1000 segundos por día. Nuestros hallazgos experimentales fueron explicados más a fondo por un modelo matemático detallado (Pena Ramirez et al., 2016).



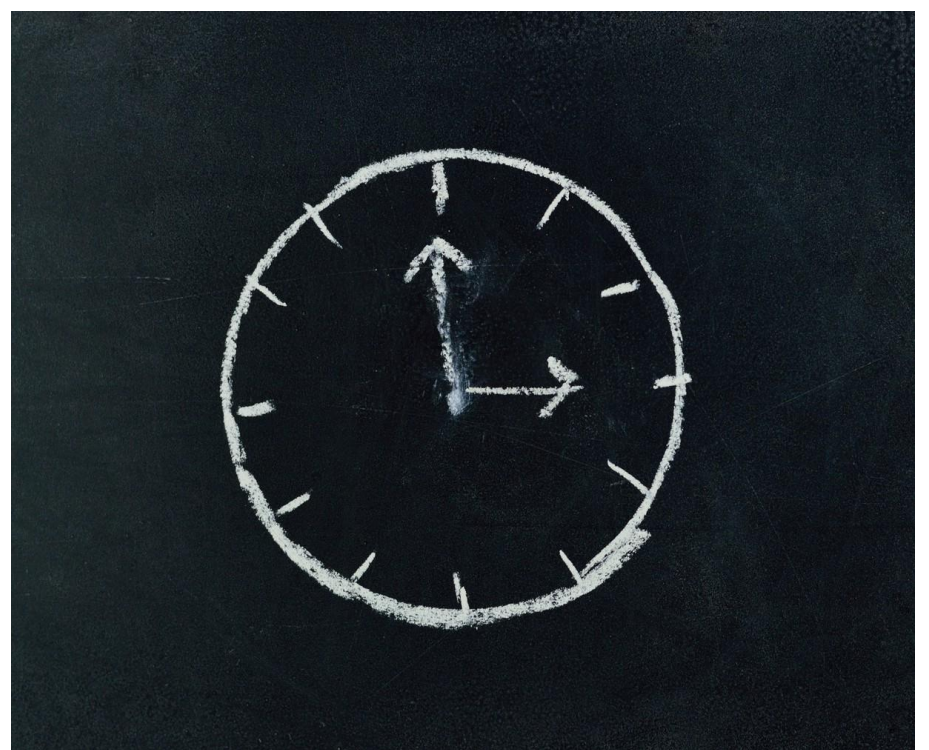


The experiment described above is in permanent exhibition at the museum “Luis Alberto Olvera”, located inside the factory of Relojes Centenario and can be accessed by the general public. We like to mention that, this is the only museum in the world exhibiting such an experiment.

Now, in order to highlight the importance of our research on natural synchronization of mechanical oscillators, it is convenient to recall that spontaneous synchronization also occurs in living organisms. For instance, inside the human body, there are several biological rhythms: respiration, heartbeat, and blood perfusion just to mention a few of them. It has been found that when some of these rhythms synchronize with each other the energy consumption is minimal. Thus, in this case the onset of synchronization is beneficial.



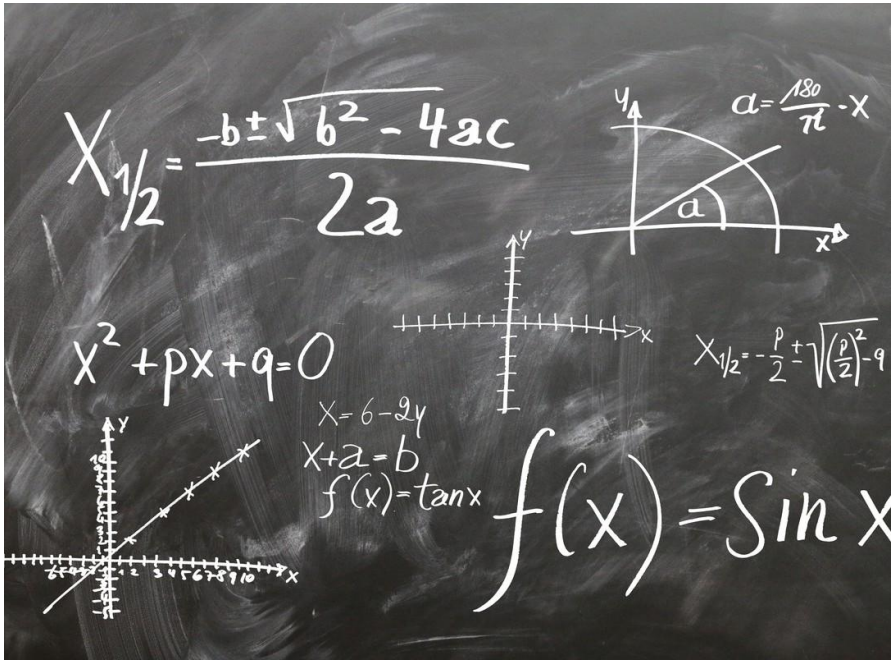
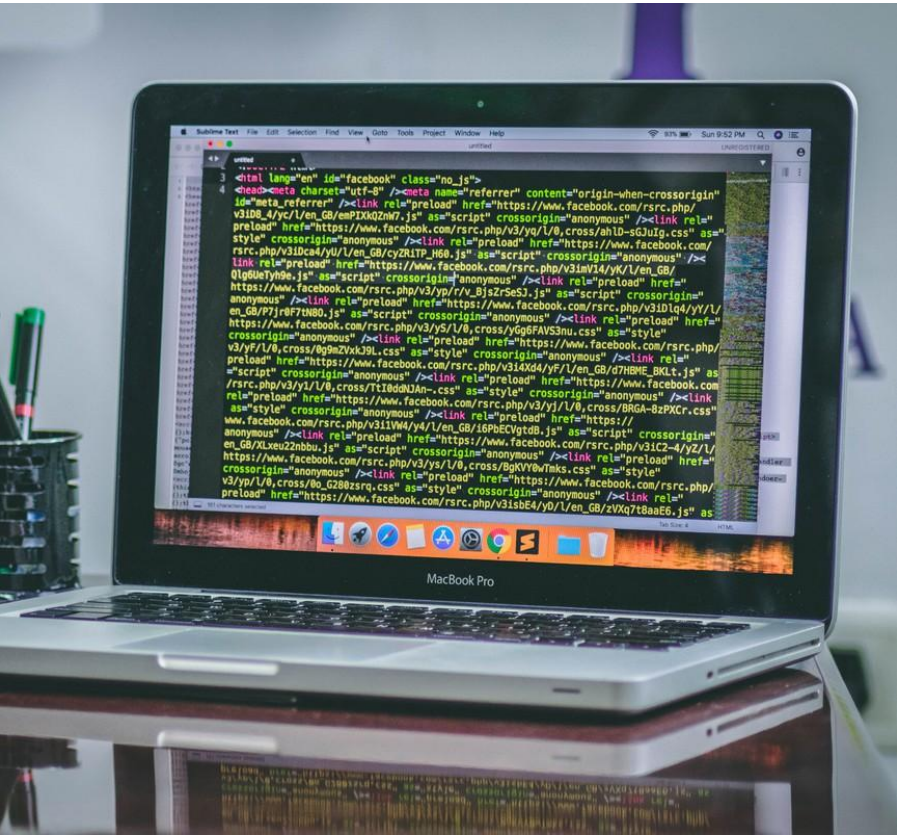
El experimento descrito se encuentra exhibido en el museo “Luis Alberto Olvera”, localizado dentro de la fábrica de Relojes Centenario y tiene acceso al público en general. Nos gustaría mencionar que este museo es el único en el mundo que exhibe este experimento.



Ahora, para resaltar la importancia de nuestra investigación sobre sincronización natural de osciladores mecánicos, es conveniente recordar que la sincronización espontánea también se produce en organismos vivos. Por ejemplo, dentro del cuerpo humano hay varios ritmos biológicos: respiración, latidos del corazón y perfusión sanguínea, por mencionar algunos de ellos. Se ha comprobado que cuando algunos de estos ritmos se sincronizan entre sí, entonces el consumo de energía es mínimo. Así, en este caso el inicio de la sincronización es beneficioso.

On the other hand, synchronization can also be dangerous or detrimental. It is widely accepted, that the process of seizure generation is closely associated with abnormal synchronization of neurons. In all these cases, the synchronization phenomenon occurs naturally, just like in our synchronized clocks experiment or in the synchronized metronomes.

Hence, it is our believe that a thorough understating of the onset of synchronization in systems described by physical laws may help to better understand the natural synchronization phenomena occurring in biological rhythms, where a rigorous theoretical study is most of the times unfeasible because of the obvious lack of good mathematical models.



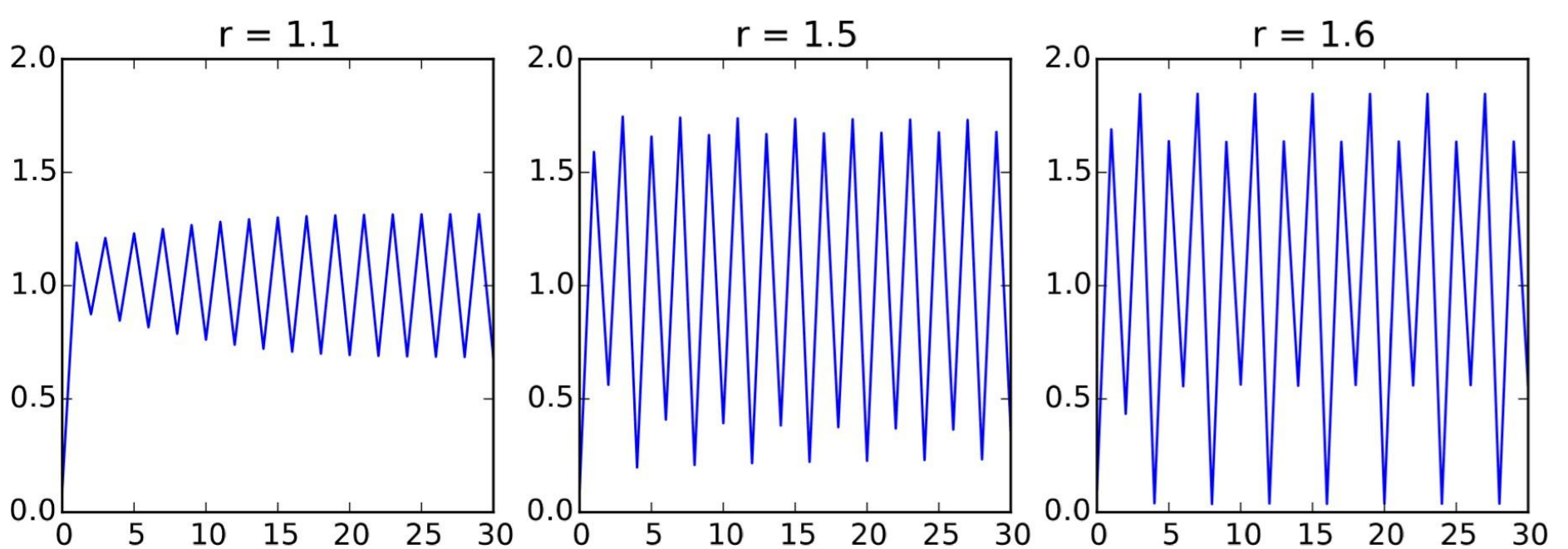
Por otro lado, la sincronización también puede ser peligrosa o perjudicial. Es ampliamente aceptado que el proceso de generación de convulsiones está estrechamente asociado con la sincronización anormal de las neuronas. En todos estos casos, el fenómeno de sincronización ocurre naturalmente, como en nuestro experimento de relojes sincronizados o en los metrónomos sincronizados.

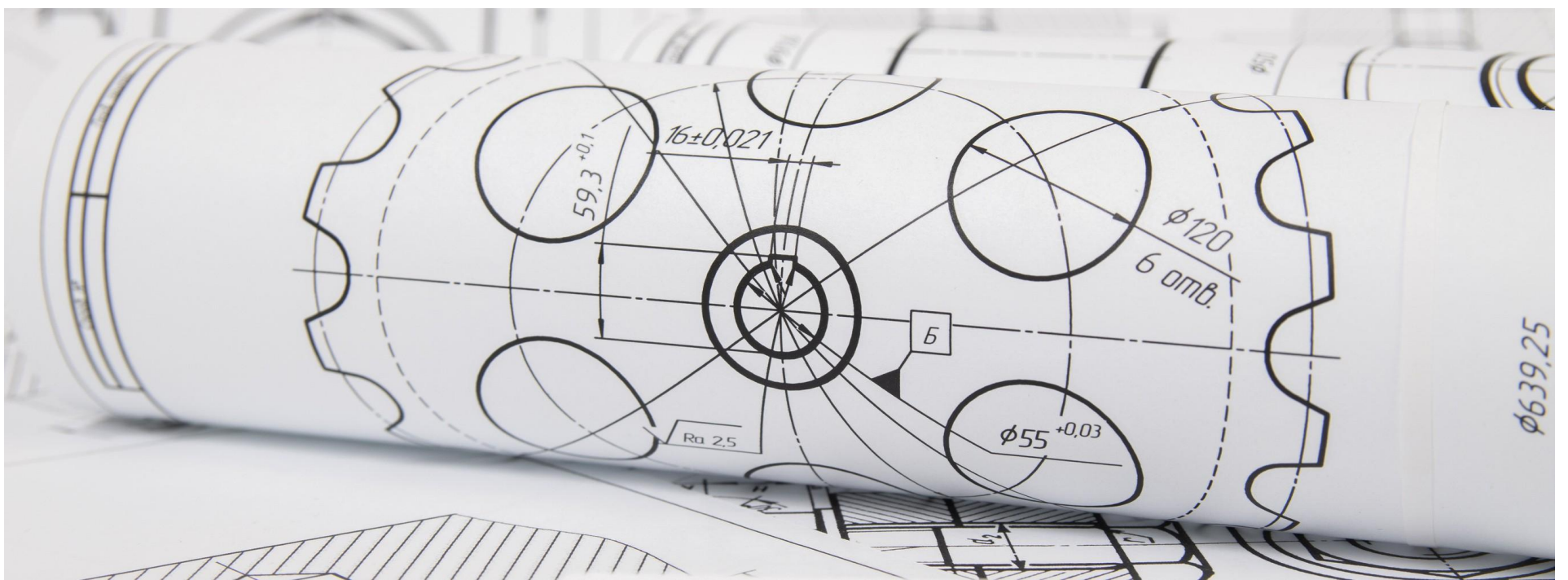
Por lo tanto, es nuestra creencia de que una subestimación completa del inicio de la sincronización en los sistemas descritos por las leyes físicas puede ayudar a comprender mejor los fenómenos naturales de sincronización que se producen en los ritmos biológicos, en el caso de los sistemas de formación continua, la mayoría de las veces no es posible un estudio teórico riguroso debido a la evidente falta de modelos matemáticos adecuados.



On the other hand, we have had and still run collaborative research projects. In fact, in 2019 we started the fundamental research project: A1S2613 “Analysis, control, and synchronization of complex systems using dynamic interconnections and flexible couplings”, which was granted by the Mexican Council for Science, Humanities and Technology, CONAHCYT, México. In this project we focused on the development of mathematical tools for analyzing the time evolution of complex networks, including emergent behavior, chaos, synchronization, and bifurcations, and how these can be used in the design of robust control algorithms for inducing cooperative or coordinated motion in, for example, a group of robots or in a platoon of vehicles.

Por otra parte, hemos tenido y seguimos teniendo proyectos de investigación en colaboración. De hecho, en 2019 iniciamos el proyecto de investigación fundamental: A1S2613 "Análisis, control y sincronización de sistemas complejos utilizando interconexiones dinámicas y acoplamientos flexibles", que fue otorgado por el Consejo Mexicano para la Ciencia, las Humanidades y la Tecnología, CONAHCYT, México. En este proyecto nos centramos en el desarrollo de herramientas matemáticas para analizar la evolución temporal de redes complejas, incluyendo comportamiento emergente, caos, sincronización, y bifurcaciones, y cómo pueden utilizarse en el diseño de algoritmos de control robustos para inducir un movimiento cooperativo o coordinado, por ejemplo, en un grupo de robots o en un pelotón de vehículos.





This was an interdisciplinary and interinstitutional project where, besides the collaboration between CICESE and Eindhoven University of Technology, we also had the opportunity to collaborate with colleagues from different Mexican institutions, including Dr. Alejandro Rodríguez Ángeles from Cinvestav Zacatenco and Dra. America B. Morales Díaz from Cinvestav Saltillo and other colleagues from UASLP and IPICYT. In fact, a previous collaboration with Dr. Rodríguez Ángeles is in the topic of synthesis of controllers for robotic systems, which was the research topic of the PhD thesis of Dr. Rodríguez Ángeles, under the direction of Professor Nijmeijer. This thesis became the basis of the book: Synchronization of Mechanical Systems (Nijmeijer & Rodriguez- Angeles, 2003).

Se trata de un proyecto interdisciplinario e interinstitucional donde, además de la colaboración entre el CICESE y la Universidad Tecnológica de Eindhoven, también tuvimos la oportunidad de colaborar con colegas de diferentes instituciones mexicanas, incluyendo al Dr. Alejandro Rodríguez Ángeles de Cinvestav Zacatenco y a la Dra. América B. Morales Díaz de Cinvestav Saltillo y otros colegas de UASLP e IPICYT. De hecho, una colaboración previa con el Dr. Rodríguez Ángeles se encuentra en el tema de síntesis de controladores para sistemas robóticos, que fue el tema de investigación de la tesis doctoral del Dr. Rodríguez Ángeles, bajo la dirección del profesor Nijmeijer. Esta tesis se convirtió en la base del libro: Sincronización de sistemas mecánicos (Nijmeijer & Rodriguez-ángeles, 2003).



Our bi-national collaboration has further extended to bilateral academic research stays, joint thesis supervision, and traineeships for students in both countries.

All in all, we have been able to construct a solid bridge between México and the Netherlands. This bridge was initially started by colleagues from Cinvestav Zacatenco, including Professor Rafael Castro, and Prof. Nijmeijer back in 1989. Since then, collaborative and synchronous research has been maintained. The role of Professor Nijmeijer in these binational efforts has been pivotal. This fact was recognized by the Mexican Academy of Sciences and, in 2018, Professor Nijmeijer was appointed as corresponding member of the Mexican Academy of Sciences. During the ceremony, Prof. Nijmeijer further highlighted the binational collaboration with his talk: "Dynamics and Control of Cooperation", see <https://amc.edu.mx/conferencias-de-miembros-correspondientes/>

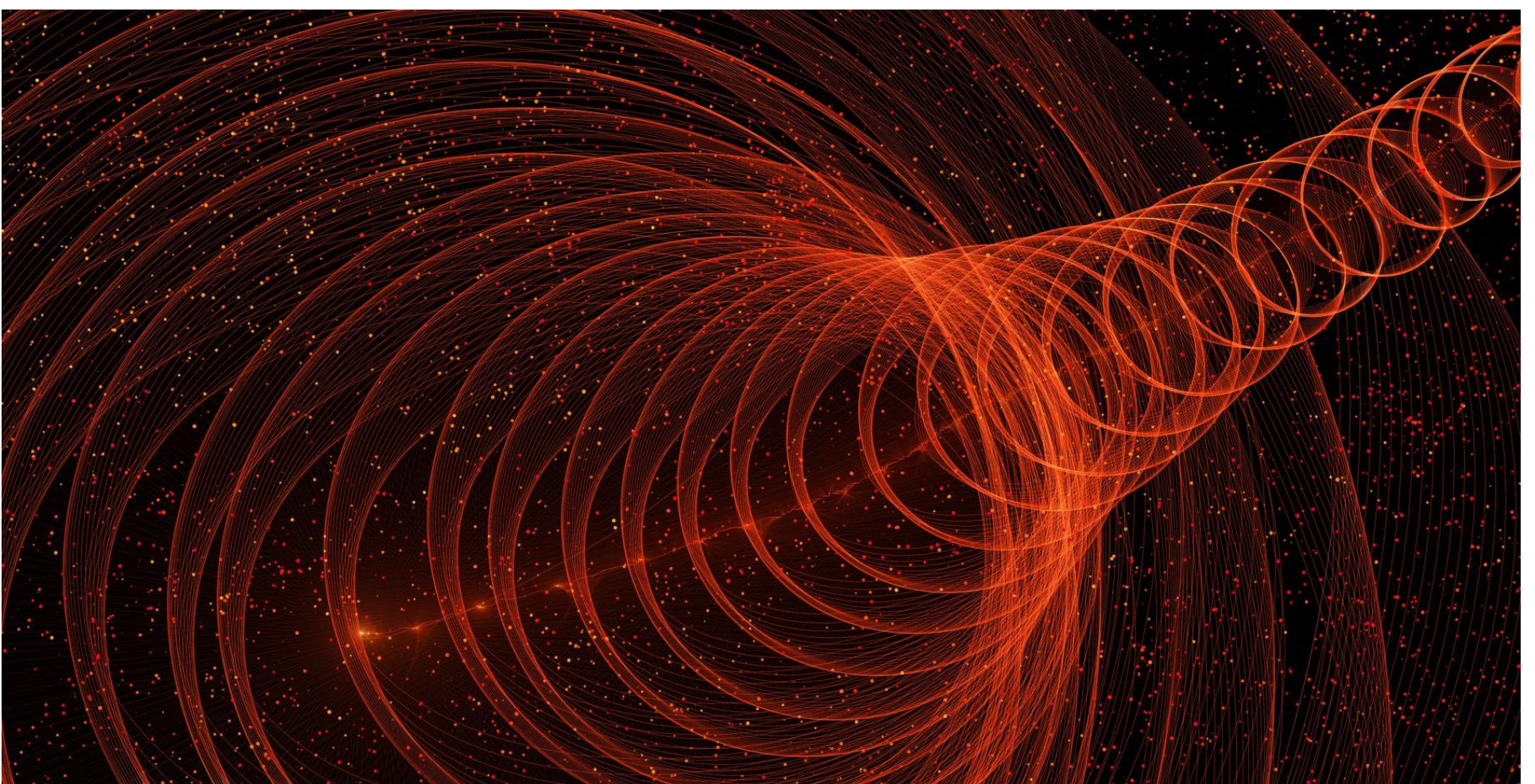
Nuestra colaboración binacional se ha ampliado aún más a las estancias de investigación académica bilateral, la supervisión conjunta de tesis y los períodos de prácticas para estudiantes de ambos países.

En conjunto, hemos podido construir un puente sólido entre México y los Países Bajos. Este puente comenzó inicialmente por colegas de Cinvestav Zacatenco, incluyendo al profesor Rafael Castro y el Prof. Nijmeijer en 1989. Desde entonces, se ha mantenido la investigación colaborativa y sincrónica. El papel del profesor Nijmeijer en estos esfuerzos binacionales ha sido fundamental. Este hecho fue reconocido por la Academia de Ciencias de México y, en 2018, el profesor Nijmeijer fue nombrado miembro correspondiente de la Academia de Ciencias de México. Durante la ceremonia, el Prof. Nijmeijer destacó aún más la colaboración binacional con su charla: "Dynamics and Control of Cooperation", ver <https://amc.edu.mx/conferencias-de-miembros-correspondientes/>



Nowadays, we are excited for a future of continued collaboration and cooperation between Mexico and the Netherlands, with the final aim of further discovering the secrets behind synchronized behavior in Nature and its potential applications in science and technology, including robotics and smart mobility. In particular, we are interested in developing a project on autonomous vehicles in CICESE, México, following the advice and expertise of Professor Nijmeijer, who was the director of the integrated Cooperative Automated Vehicles project (i-CAVE) in the Netherlands, which was granted by the Dutch Research Council, NWO.

Hoy en día, estamos entusiasmados por un futuro de colaboración y cooperación continua entre México y los Países Bajos, con el objetivo final de descubrir más secretos detrás del comportamiento sincronizado en la naturaleza y sus posibles aplicaciones en ciencia y tecnología, incluyendo la robótica y la movilidad inteligente. En particular, estamos interesados en desarrollar un proyecto sobre vehículos autónomos en CICESE, México, siguiendo el asesoramiento y la experiencia del profesor Nijmeijer, quien fue director del proyecto integrado de Vehículos Cooperativos Automatizados (i-CAVE) en los Países Bajos, que fue concedido por el Consejo de Investigación neerlandés, NWO.



Autores

Dr. Jonatan Peña Ramírez
Profesor asociado
División de Física Aplicada
Centro de Investigación Científica y
de Educación Superior de Ensenada
(CICESE), México
jpena@cicese.mx

Prof. dr. Henk Nijmeijer
Profesor emérito
Departamento de Ingeniería
Mecánica
Universidad de Tecnología de
Eindhoven, Países Bajos
h.nijmeijer@tue.nl
Miembro de la Academia Mexicana
de las Ciencias

Authors

Dr. Jonatan Peña Ramírez
Associate Professor
Applied Physics Division
Center for Scientific Research and
Higher Education at Ensenada
(CICESE), México
jpena@cicese.mx

Prof. dr. Henk Nijmeijer
Emeritus Full Professor
Department of Mechanical
Engineering
Eindhoven University of Technology,
Netherlands
h.nijmeijer@tue.nl
Also, Corresponding Member of the
Mexican Academy of Sciences



Final Communication

Comunicado Final

If you wish to stop receiving this Journal, you can unsubscribe by sending an e-mail to:
cooperacionpba@sre.gob.mx.

On the other hand, if you are interested in sharing your academic or scientific work in this space, we invite you to contact us also through the e-mail:
cooperacionpba@sre.gob.mx.
We will be pleased to consider your contribution.

Si desea dejar de recibir este Diario, puede darse de baja enviando un correo electrónico a:
cooperacionpba@sre.gob.mx.

Por otro lado, si le interesa compartir su trabajo académico o científico en este espacio, le invitamos a contactarnos a través del correo electrónico:
cooperacionpba@sre.gob.mx.
Estaremos encantados de considerar su contribución.



Responsible for the publication:
Department of International
Cooperation.
Embassy of Mexico in the
Netherlands
Contact:
cooperacionpba@sre.gob.mx