

Miralles, Mónica Teresita ; Gherzi, Ignacio

*Linealidad versus no linealidad en el umbral
del maquinoceno*

**Ponencia presentada en: XXXI Jornadas de Investigación y XIII Encuentro Regional Si+ Desnaturalizar y reconstruir, 2017
Secretaría de Investigaciones. Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo. Universidad de Buenos Aires**

Este documento está disponible en la Biblioteca Digital de la Universidad Católica Argentina, repositorio institucional desarrollado por la Biblioteca Central "San Benito Abad". Su objetivo es difundir y preservar la producción intelectual de la Institución.

La Biblioteca posee la autorización del autor para su divulgación en línea.

Cómo citar el documento:

Miralles, M. T., Gherzi, I. Linealidad versus no linealidad en el umbral del maquinoceno [en línea]. XXXI Jornadas de Investigación y XIII Encuentro Regional Si+ : desnaturalizar y reconstruir, 2017. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Buenos Aires. Disponible en:
<http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/greenstone/cgi-bin/library.cgi?a=d&c=investigacion&d=linealidad-versus-no-linealidad>
[Fecha de consulta:]

LINEALIDAD *VERSUS* NO LINEALIDAD EN EL UMBRAL DEL MAQUINOCENO.

Miralles; Mónica Teresita; Ghersi; Ignacio

Centro de Investigación en Diseño Industrial de Productos Complejos (CIDI), Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo (UBA); Laboratorio de Biomecánica e Ingeniería para la Salud (LaBIS), Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias (UCA).

Tecnología en Relación Proyectual

mmiralles@gmail.com; igghersi@gmail.com

Resumen

Naturaleza y artificialidad fueron, originalmente, considerados opuestos binarios, conceptos extremos y excluyentes, cuya deconstrucción fue dando las características culturales y, en particular, las científico-tecnológicas de cada una de las “edades” de nuestra civilización. El avance científico-tecnológico desde los años 60, en particular la conformación de disciplinas sintetizadas a partir de conocimientos logrados, tanto desde el campo de la ingeniería, como el de las ciencias biológicas (bioingenierías, biotecnologías, biónica, biodiseño, entre otras), fue borrando esta distinción y se naturalizó el hablar de “tecnología natural y tecnología artificial”, “evolución natural y evolución cultural”, “genes y memes”, entre otras dicotomías. Ello fue consecuencia del rol fundamental que tuvo el pasaje de la mirada clásica (lineal) a aquella, no lineal, de los sistemas complejos adaptativos (SACs). Este proceso de desnaturalización aborda hoy el impacto que tendrá la coexistencia de inteligencia natural con la artificial (IA).

Esta última, dado que está íntimamente ligada a fuertes inversiones comerciales, tiene y tendrá, un sensible impacto en el mundo socio-económico-laboral y medio-ambiental. Este rasgo es, precisamente, el que caracteriza el ingreso al recientemente llamado periodo del “Maquinoceno”. En este periodo, el diseño centrado en las personas, en un sentido amplio, comprende infraestructura industrial; procesos de manufactura, procesos de transporte, desarrollo urbano, diseño de productos de consumo e incorpora a grandes sistemas de servicios (sistemas financieros, de seguros, transporte, energía, educación, cuidado y asistencia de la salud, entretenimiento, entre otros). A partir de este momento, y dado el aumento de la complejidad, aparecen fenómenos emergentes, impredecibles, que requieren nuevos marcos teóricos para ser tratados y el desarrollo de metodologías acordes para dar respuesta a los patrones emergentes. La atención se centra, luego, en un eje central del campo disciplinar conocido como Factores Humanos y Ergonomía (FH&E) donde la *variabilidad* de la postura humana, debida a su no linealidad, es el punto de partida para abordar problemas sistémicos de la compleja amalgama hombre-interfaces-entorno-, a diferentes escalas. El hecho que la postura humana, al igual que otros sistemas fisiológicos antes considerados periódicos y predecibles, exhiba no linealidad, no puede ser ignorado en la confección de guías en el campo del diseño de productos y puestos de trabajo para tareas, contextos y sujetos específicos, donde el imperativo es evitar la fatiga o minimizar el daño del sistema músculo esquelético.

El presente trabajo se inscribe dentro de estas nuevas necesidades epistemológicas. Se parte de una breve reflexión introductoria que toma como guía heurística la deconstrucción de J. Derrida, para abordar los conceptos de linealidad vs. no linealidad. Conceptos troncales que contribuyeron al pasaje del paradigma de las “máquinas” al actual de los “sistemas”. En la segunda parte, se presentan aspectos de los SACs en relación al campo de la FH&E y a la no linealidad de la postura humana. Se describe la forma en que se caracteriza el equilibrio humano utilizando procesamiento de señales, tanto con índices lineales como no lineales. Se presenta el concepto de variabilidad característico de los SACs, y la evaluación de la estabilidad en un diseño de un calzado inestable.

1. Del dualismo al paradigma sistémico

Los conceptos lineal y no lineal son usualmente vistos como opuestos binarios. Están íntimamente ligados a la dupla artificial-natural (entendida en el sentido amplio de producciones realizadas con y sin intervención humana respectivamente). El pensamiento binario fue característico en todas las culturas, tanto orientales como greco-occidentales habiendo infinidad de antecedentes, en particular, en el campo filosófico-teológico. En el siglo XX Jacques Derrida, reflexionó sobre los opuestos siendo uno de sus aportes lograr búsquedas originales de nuevas “contradicciones razonables”, de ser motor para una nueva clase de cognición surgida a partir de lecturas subversivas

de todo tipo, sin inhibición alguna frente a cualquier categoría lógico-filosófica previamente establecida, como el concepto mismo de verdad. En una entrevista de 1992, Derrida diría que la deconstrucción “es un pensamiento del origen y de los límites de la pregunta “¿qué es...?” (Birnbau, 2004) y esta pregunta es extensiva a todos los campos del conocimiento.

Es en este sentido que se toma como guía heurística la deconstrucción de Derrida para iluminar los conceptos de linealidad y no linealidad. La elección se basa en el hecho que el deconstructivismo tuvo un efecto estimulante, como lo demuestra la historia intelectual del concepto, a través de su impacto en variados contextos, sin faltar las disciplinas proyectuales y, en particular, la arquitectura a partir de la deconstrucción de metáforas como aquella de “la materialización del pensamiento”.

El proceso de construcción–deconstrucción de lo simple y lo complejo (lineal vs. no lineal), requiere ser nuevamente reflexionado ya que “la unidad de los contrarios” adquiere un sentido renovado por el impacto del conocimiento científico tecnológico en el recientemente llamado “Maquinoceno” (Price, 2016). Este es el nombre dado por Price al periodo que ya comenzamos a transitar (que seguiría al Antropoceno) en la cual la inteligencia no biológica, inteligencia artificial (IA) (Sendhoff et al 2009), impacta fuertemente en el sistema productivo socio–económico global, produciendo una transformación de alcance desconocido. Según Price, el hombre da inteligencia a las máquinas, pero se pregunta si ¿las máquinas harán más inteligente al hombre? El futuro, a partir de este advenimiento, se vuelve *terra incognita* en la cual la toma de decisiones del presente, la ética, la seguridad y los beneficios alcanzados, no sólo marcará el devenir de nuestro planeta sino, incluso, el de la misma galaxia.

En el Maquinoceno la división entre natural y artificial se desdibuja para confluir en el concepto de sistema adaptativo complejo (SAC). Desde la teoría de la artificialidad de Herbert Simon (Simon, H, 1996), un artefacto tecnológico es un objeto sometido a las leyes naturales, pero que ha sido adaptado a metas y propósitos humanos. Los artefactos son vistos como SACs similares a los sistemas adaptativos biológicos. En consecuencia son pensados como sistemas que tienen un entorno interno, una frontera y un entorno externo, donde lo artificial va ganando terreno en lo natural, y lo natural a lo artificial. La deconstrucción puede analizarse en cada una de estas subdivisiones.

En el entorno interno, serán la materia y la estructura centrales en el análisis. En la frontera las metas y los propósitos de diseño serán decisivos para la adaptación bifuncional del entorno interno al externo. En esta articulación recíproca tendrá lugar la predicción, el nivel de conocimiento de las limitaciones impuestas por las restricciones naturales, tanto al entorno interno como al externo, y será central la discusión de la función.

A modo de ejemplo, en el entorno interno la deconstrucción del concepto de “materia” fue central y se dio a la luz de “opuestos binarios”, que se fueron multiplicando, con grados crecientes de abstracción.

Desde los cuatro elementos de la filosofía griega (continuidad vs. discontinuidad de la materia), el comportamiento mecánico-ondulatorio (onda vs. partícula), el descubrimiento de nuevas fuerzas como las nucleares (fuertes vs. débiles), la equivalencia masa vs. energía, la postulación de nuevos principios como el de incertidumbre (determinación vs. indeterminación de posición y cantidad de movimiento); el teorema de Gödel (completitud vs incompletitud), la introducción de conceptos como el de niveles de energía (discreto vs. continuo) tanto para los estados atómicos como para los nucleares, las diversas teorías de cuerdas de la actualidad para describir las partículas subatómicas (corpúsculos vs. estados vibraciones de filamentos o cuerdas), fue desestabilizando los conceptos básicos referidos a la naturaleza del mundo físico, al rol jugado entre el observador y lo observado, lo natural y lo artificial, entre múltiples juegos de opuestos. A ello se sumó, como bien lo señalara Derrida, el énfasis en la textualidad de todo conocimiento, hecho que sirvió para enriquecer “el juego de las diferencias” en el seno de las teorías físicas, generando un campo de discusión semántica que dura hasta la actualidad.

La linealidad vs. no linealidad; máquinas vs sistemas

El concepto de linealidad hace referencia al procedimiento analítico de base que requiere que la interacción entre partes sea tan débil que pueda dejarse de lado, para que se puedan unir y separar. Se cumple la aditividad, y por lo tanto se espera que, a partir del conocimiento de los procesos parciales, se pueda dar cuenta de la totalidad.

Esta fue la pauta del “entender rompiendo” del siglo XVII; propio de las máquinas hechas por el hombre. Este pensamiento se trasladó, junto con su reduccionismo, a la “máquina cósmica” para ser, finalmente, asimilado por el método científico de la física clásica y trasladado a las otras ciencias, que modelaron sus propias teorías en forma acorde a una única realidad física racionalmente aceptada.

Pero la observación de nuevos fenómenos dio lugar a problemas cuya solución requería nuevas formas de pensamiento. En los años 20 nace el concepto de *sistema* que desplaza al newtoniano de *máquina*. Para ello fue necesario pasar a una nueva e innovadora integración de saberes y generar nuevos conceptos. La historia del

concepto de *sistema* se puede buscar desde la filosofía, y dentro de cada una de las ciencias en particular. Fue precisamente en el campo biológico desde donde surgieron problemas imposibles de abordar con leyes causales, siendo el concepto de *organismo* el que fortalece la idea de *sistema*. Ello se debe, precisamente, a que todo organismo vivo es un *sistema abierto*, capaz de intercambiar materia, energía e información con su entorno, a diferencia de los *sistemas cerrados* de la física newtoniana. La totalidad recupera un nuevo estatus al igual que se revive la discusión teleológica frente al causalismo clásico. Los sistemas tienen la mirada de partes en interacción *no lineales*.

En los 50 aparece la primera sociedad destinada al estudio de la ya consolidada “Teoría General de los Sistemas” (Bertalanffy, 1995) aplicables en diferentes campos del saber y casi, simultáneamente, la Cibernética de R. Wiener (incorporando el concepto de realimentación característico de los seres vivos) (Wiener, 1985, 266), la Teoría de la Información de Shannon (cómo la información reorganiza el sistema) y la Teoría de los Juegos de von Neumann (sistemas regulados por fuerzas antagónicas). Pronto se sumarían la Teoría de los Comportamientos, la Teoría de Grafos, Teoría de Redes (explicación inteligible del origen de las formas biológicas); la Teoría de los Automatas (que dio lugar a la Máquina de Turing y al postulado de que todo lo que pueda ser realizado en pasos finitos de algoritmo puede ser realizado por una máquina), entre otras. Todas estas teorías fueron evolucionando (Gros, 2015) y hoy la Cibernética es sólo parte de la expansiva Teoría de Control (lineal, adaptativo, etc), basada en la comunicación y transferencia de información dentro del sistema y entre el sistema y el medio, usada comúnmente para describir mecanismos de regulación.

Toda esta actividad generadora desplaza la acción individual, a un equipo de desarrollo o de investigación que tiene que llegar al objetivo planteado utilizando caminos que sean óptimos (eficientes y eficaces). Se termina el “saber poco de mucho” (enciclopedismo) y el “saber todo de poco” (especialización). Nacen disciplinas sintetizadas a partir de conocimientos logrados, tanto desde el campo de la ingeniería, como el de las ciencias biológicas (bioingenierías, biotecnologías, biónica, biodiseño etc.). Lo cierto es que, a partir de los años 60, se fue borrando esta distinción y se naturalizó el hablar de “tecnología natural y tecnología artificial”, “evolución natural y evolución cultural”, “genes y memes”, entre otras dicotomías. La creación de software y de hardware aceleró aún más la llamada Segunda Revolución Industrial, que construyó la actual mirada holística y, a nivel global, ecológica y sustentable del planeta.

El próximo hito será en el año 63 con Lorentz (MIT) (Lorentz, 1963), un meteorólogo que cambiando simplemente el número de cifras significativas de su serie de clima - de 3 a 6-, cambia con ello, inesperadamente, las predicciones a largo plazo. El resultado da lugar al nacimiento de la *Teoría del Caos*. La teoría de caos tiene que ver con la alta sensibilidad de los sistemas a las condiciones iniciales, mientras que en la complejidad hay siempre un enorme número de interacciones que no son afectadas por las condiciones iniciales, y de allí la robustez de los sistemas complejos, su capacidad para actuar en la misma forma bajo condiciones diferentes. En este sentido hay autores que ven al caos como un subconjunto de la complejidad.

En los años 90 Prigogine cuestiona la flecha del tiempo y la reversibilidad de los sistemas poniendo en evidencia que, si el sistema no es cerrado, el intercambio de energía con el exterior, tiene la posibilidad de generar orden en forma espontánea, es decir, dar origen a fenómenos de auto-organización junto con sus emergentes patrones (Prigogine, 2009). El resultado de todo este derrotero fue el cambio de mirada de la naturaleza en el plano proyectual. La naturaleza pasó de ser vista como *referente proyectual*, a *referente conceptual*. Mirada que fecunda al campo actual de la ciencia biomimética.

2. Los Sistemas Adaptativos Complejos, Diseño y Ergonomía

Los problemas a afrontar en el Maquinoceno son sistémicos lo que significa que están interconectados y son interdependientes. No se los puede resolver fragmentando sino a partir de ser considerados como SACs, es decir, sistemas en permanente evolución y adaptación al medio. Un rasgo sobresaliente de los SACs es que ningún agente externo controla estos procesos. Algunas de sus características incluyen:

- Contar con un gran número de elementos (agentes) *interactuando* en una forma dinámica, con mucho intercambio de información.
- Tener interacciones ricas, no lineales, de rango limitado (ausencia de una superestructura que controle el flujo de información).
- Ser abiertos al entorno, con lazos de realimentación tanto positivos (lazos de refuerzo o estimulación) como negativos (lazos de inhibición).
- Operar bajo condiciones fuera del equilibrio, lo cual significa que hay un cambio continuo que debe dar respuesta a un constante flujo de energía dentro del sistema.
- Estar embebidos en el contexto de sus propias historias y ningún elemento único (o agente) puede conocer, comprender o predecir acciones y efectos que están operando dentro del sistema como un todo.

- Emergencia de patrones que dan cuenta de la complejidad en el sistema.

Los SACs representan la máxima capacidad de procesamiento de la información, es decir, aquella en la que ocurre la máxima creatividad.

Un fuerte aporte inicial a la teoría de los SACs surgió desde la biología evolutiva (Levin, 1992, 243 pp). La misma concluye que, luego de una rica experimentación evolutiva (explosión cámbrica), tuvo lugar un severo proceso de selección (extinción masiva del Pérmico) y de allí, un proceso de estabilidad dinámica. Los programas informáticos de simulación de la vida (vida artificial), con sus algoritmos autorreplicantes, dieron origen a organismos digitales y fueron un paso sustancial de la unión entre la biología y los ordenadores.

Las simulaciones no sólo validaron las observaciones provenientes del estudio de la evolución biológica, sino que fueron extensivas a escalas superiores de complejidad como los ecosistemas. De este modo, leyes como la de Lotka Volterra fueron simuladas y validadas, como así también, la predicción de largos periodos de estabilidad interrumpidos por estallidos de cambio (asociado al concepto de *equilibrio pautado* de S. G. Gould) (Eldredge, N. y Gould, S.J. 1972, 33 pag). Esta imagen se ha extendido también, en otra escala temporal, al surgimiento y desaparición de diferentes culturas y a la producción tecnológica misma. De la adaptación funcional dada por gradualismo de la selección natural, se pasó a los conceptos revolucionarios -como el de autorganización-, y a la búsqueda de fuentes espontáneas generadoras de orden en sistemas dinámicos adaptativos en el campo social.

A modo de ejemplo, la traducción a la producción objetual morfológica puede pensarse desde el enfoque de la complejidad en términos de poner en consideración hipótesis tales como que, progresivamente, y a medida que se alcanza el límite caótico, la innovación se hace menos arriesgada hasta llegar a un estado de renovación estable (*constancia de la pauta*). Hay quienes postulan que el proceso de explosión-selección-conservación de la pauta-puede estar expresando más que una mera analogía entre sistemas dinámicos adaptativos biológicos, para ser manifestación de una *acción dinámica fundamental* de todos los sistemas complejos

2.1. Factores Humanos y Ergonomía desde el paradigma de la complejidad

La teoría de los sistemas complejos fue atravesando diferentes campos, hasta llegar hoy al del cuidado de la salud y la ergonomía. El campo denominado de Factores Humanos y Ergonomía (Human Factors and Ergonomics HF&E) es un ejemplo del surgimiento de las disciplinas de “encrucijada” en el campo proyectual (Gerardin, 1968, 251pp) surgidas de la convergencia de conocimientos interdisciplinarios, desde un pensamiento sistémico (Salvendy, 2012). Refiere a la actividad profesional de diseñar productos, procesos y sistemas que tiene en cuenta no sólo los aspectos ergonómicos ligados a la biomecánica ocupacional clásica, sino también las funciones cognitivas personalizadas de cada sujeto, para dar cuenta de nuevos tipos de interacción entre el hombre, la tecnología y el entorno y, de este modo, eficientizarlos en forma segura para el sistema (usuario - interfaz involucrada - entorno). En particular, ha cobrado un gran impulso en el campo de la salud y la seguridad en entornos de trabajo, sobre todo en aquellos puestos ligados a la productividad (Deml et al, 2015).

En cuanto a la salud, la atención se concentra hacia particulares tipos de lesiones rotuladas como “desórdenes musculoesqueléticos”, como túnel carpiano, tendinitis, entre otras dolencias producidas por la actividad laboral en sí misma, o bien, lesiones provocadas por tareas repetitivas que involucran al sistema nervioso, propias del trabajo con las interfaces en que el intercambio de información se vuelve un factor crítico. En este contexto, el interés por el control postural (motor, central y sensorial) se vuelve un eje central que debe ser revisado, no sólo en cuanto a los métodos y técnicas clínicos comúnmente utilizados, sino también en la necesidad de redefinir nuevas variables (cuali-cuantitativas) que permitan su evaluación en poblaciones, tareas y contextos específicos (Paillard y Noé, 2015). Por otra parte, los estudios vinculados al deterioro del control postural con la edad también se vuelven fundamentales, más allá de los ligados a los estudios preventivos de riesgo de caída en adultos mayores (Teasdale, 2001; Lipsitz 1992).

2.2. La no linealidad de la postura humana

El estudio del control postural humano ha enriquecido su interpretación desde la mirada de los sistemas no lineales y caóticos. La fuerte no linealidad del sistema postural se debe a la elasticidad y amortiguación de los músculos y a la realimentación no lineal, con demoras y umbrales de respuesta, del sistema nervioso central (SNC).

El equilibrio se deteriora cuando hay:

- a) un decrecimiento en la información sensorial, o bien,
- b) un deterioro en el procesamiento de la información espacial (obtenida a partir del sistema visual, vestibular o somatosensorial) que provee información sobre referencias internas y externas.

Los tratamientos matemáticos y las interpretaciones de los patrones posturales, dependiendo del enfoque elegido para su consideración (lineal o no lineal), serán diferentes.

El Centro de Masa Corporal (CMC), variable propia del modelo biomecánico lineal, interpreta al cuerpo humano como un sistema de segmentos rígidos articulados. Esta variable se utiliza como referencia básica en la caracterización, a lo largo del tiempo, de las oscilaciones corporales presentes en los diferentes gestos y posturas, La marcha (traslación del CMC, a lo largo del tiempo y el análisis del equilibrio en condiciones estáticas (balance), son complementarios para la caracterización del equilibrio.

Cualquiera sea el caso, dinámico o estático, el CMC es siempre cuantificado de forma indirecta. En el caso de estudios posturales estáticos, se realizan con el sujeto manteniendo la postura ortostática (de pie con los brazos a los costados del cuerpo) sobre una plataforma estabilométrica. Las coordenadas anteroposterior (AP) y mediolateral (ML) de la fuerza de reacción de la plataforma, respuestas al control postural del sujeto, constituyen las coordenadas del llamado Centro de Presiones (CP). En estas condiciones, el sistema articulado transmite sus oscilaciones a la plataforma que, por acción y reacción, responde a estas variaciones, que son las que efectivamente se miden. El resultado es la huella bidimensional dejada por el CP a lo largo del tiempo, que refleja el oscilar del CMC pero, con el valor agregado de ser la manifestación integrada de los numerosos componentes neuromusculoesqueléticos actuando a diferentes niveles articulares, dando cuenta, en consecuencia, de la actividad del sistema de control motor (Blaszczyk et al, 2001, Winter, 1998).

El patrón de desplazamientos trazado por el CP es conocido como oscilación postural (Postural Sway, SP). Se trata de una serie temporal bidimensional (combinación de las señales AP y ML), a partir de la cual se puede hallar la velocidad del CP considerado una medida de la estabilidad dinámica del sujeto continuamente en movimiento (Myklebust et al. 1995). La longitud del SP surge de segmentar, a partir de un intervalo temporal fijo, la trayectoria del CP. Luego, al dividir la suma de todos esos segmentos por dicho intervalo, se obtiene su velocidad (Han et al, 2005). El SP es un parámetro clínico lineal, como el Rango AP, Rango ML, velocidad AP, velocidad ML o el área que contiene al patrón. Las mediciones clásicas a partir de las trayectorias en las plataformas de fuerza asumen implícitamente la estacionalidad desde una mirada de los sistemas de control, es decir, que cuanto menor sea la trayectoria, y cuanto más tienda la traza del CP a un punto (caso de equilibrio perfecto), mejor será el control. Sin embargo, si bien el tratamiento clásico asume que es un proceso estacionario, el SP es caótico. Los procesos de control de anticipación y retroalimentación tienen cierta variabilidad inherente, que no es aleatoria sino determinista, y que puede ser caracterizada por descriptores no lineales. Dentro de este enfoque, la variabilidad toma un lugar central.

2.3. La variabilidad: ¿una nueva medida del hombre?

La variabilidad está presente en los sistemas naturales. La sorpresa fue hallar en los años 90, que muchos sistemas fisiológicos que se creían periódicos no eran lineales, cambiando con ello la imagen de la fisiología anatómica tradicional. Cuando una persona camina, la longitud o la frecuencia de los pasos no se mantiene constante y exhibe, en cambio, pequeñas variaciones que tienen que ver con continuas adaptaciones a situaciones externas. Un robot cae bruscamente ante un evento externo no previsto, incapaz de adaptarse a esa nueva perturbación. La frecuencia cardíaca no es constante, mostrando una rica variabilidad. ¿Es esta variabilidad un ruido sobrepuesto a un patrón regular? La mirada actual se inclina a pensar que la variabilidad forma parte de la naturaleza profunda de los sistemas dinámicos biológicos.

Los dos conceptos centrales de la dinámica no lineal son los *fractales* y el *caos*

- Los fractales geométricos sirven para caracterizar estructuras geométricas complejas bajo las cuales subyace un patrón que puede conservarse y repetirse a diferentes escalas (Stanley, 1986). No las caracteriza una escala espacial, y esta es la razón por la cual sus dimensiones no son enteras. Este rasgo se conoce como *auto-similaridad*, y en el terreno biológico ha tenido alto impacto en el estudio de arquitecturas de ramificación de diferentes sistemas biológicos, mostrando que son parte integrante de la anatomía de estos sistemas. En el campo del Diseño Industrial, los fractales suelen utilizarse para el control de calidad de productos en diferentes industrias (en particular han tenido gran impacto en productos médicos como las lentes intraoculares), para lo cual se recurre a algoritmos dedicados para producir fractales no determinísticos (es decir, se introduce el azar en alguna de las etapas de cálculo).
- El caos se asocia a la *impredecibilidad* del sistema, que puede surgir a partir de ciclos de retroalimentación local, en sistemas no lineales, y pueden dar lugar a fluctuaciones complejas que no tienen una escala temporal, produciendo una señal errática e impredecible.

Además de los parámetros lineales que pueden describir el equilibrio postural (indicados en la sección 2.2), las características dinámicas y la variabilidad del CP, contienen información de utilidad como medida de desempeño. La

figura 1 muestra dos trazas del CP, de un mismo sujeto, adquiridas durante 30 segundos, con una plataforma estabilométrica (Gherzi et al, 2017). Se muestran dos condiciones diferentes de bipedestación (abajo: equilibrio con pies juntos y paralelos y, arriba: en 1ª posición de la danza clásica). La extracción de parámetros lineales sobre estas trazas, como la velocidad media del SP y el área del patrón, indican que, si bien el área cubierta por el CP se mantuvo idéntica entre ambos casos (variación menor al 1%), el camino recorrido por el CP muestra, en cambio, diferencias significativas (incremento de 28% en 1ª Posición). De esta manera, es evidente que la dinámica de respuesta entre ambas posiciones es claramente diferente, mostrando que, en primera posición, hay una reducción en la capacidad de control en la dirección anteroposterior, consecuencia de la inferior base de sustentación corporal.

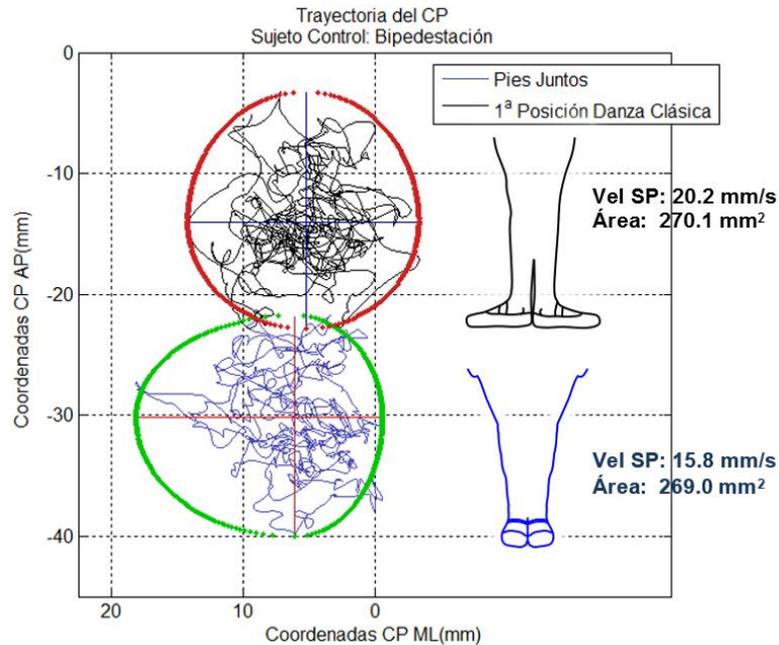


Figura 1. Parámetros lineales como descriptores globales del control postural. CP en dos condiciones durante 30s: pies juntos (azul) y 1ª posición de danza clásica (negro). Los parámetros lineales (velocidad SP y Área) indican que el CP se desplaza sobre un área similar en el mismo intervalo de tiempo en ambas pruebas, pero que lo hace con dinámicas diferentes, con grandes variaciones en la velocidad media del SP.

Sistemas complejos y parámetros característicos

La dinámica de un fenómeno, así como aquella de la señal que lo representa, puede variar entre determinística (representando un comportamiento predecible, por ejemplo periódico) y estocástica (aleatoria). Las señales derivadas de procesos caóticos no se enmarcan en ninguno de estos dos extremos (Muthuswamy, 2003). Herramientas como el análisis de dimensión, entropía no lineal y espectro de frecuencias, son utilizadas para diferenciar entre estos comportamientos, cuantificando la complejidad de la señal:

- Las señales caóticas van a tener, a diferencia de las periódicas, un amplio y distribuido espectro de frecuencias, y este aumentará con la complejidad de la señal. Los espectros de frecuencia de señales periódicas serán, en cambio, concentrados en valores específicos. En los procesos fisiológicos, la pérdida de complejidad es acompañada por la reducción del espectro de frecuencias, en particular de las altas, en favor de las bajas.
- En sistemas complejos, la dimensión está relacionada con el número de variables dinámicas requeridas para reproducir la salida de un sistema. Cuanto más alta la dimensión, mayor es este número de variables, y más compleja será la señal. Por ejemplo, un proceso estrictamente periódico tiene dimensión 1.
- Otro concepto que permite cuantificar la complejidad del sistema es la entropía no lineal asociada a la cantidad de información necesaria para predecir el estado futuro del sistema. Cuanto mayor sea su entropía, el sistema será más complejo y menos predecible.

En caso de que haya variabilidad, como se espera para el control postural en bipedestación, se puede implementar algoritmos de análisis no lineal a la serie temporal del CP, como el de Higuchi (Higuchi, 1988), que permiten calcular una medida de dimensión fractal (DF) para el registro de equilibrio estático. Los investigadores consideran un indicador de la salud del sistema de control postural que el índice esté entre 1 y 2. Cuando esto es así, el sistema está oscilando alrededor de un punto estable de una manera dinámica y compleja con un alto nivel de control de los grados de libertad, y es capaz de adaptarse fácil y rápidamente a condiciones cambiantes. El valor 1 correspondería a un sujeto que idealmente quedara en reposo, es decir, a la no variabilidad. La dimensión 2 puede ser indicativa de un

sistema cuyos grados de libertad han sido aumentados a un punto donde el sistema es dinámico pero con poco control. El aumento en la dimensión fractal puede indicar *inestabilidad*; mientras que el aumento en el SP puede simplemente indicar el aumento en la complejidad de las tareas. Un cambio en la DF puede indicar, a su vez, un cambio en las estrategias de control dispuestas para mantener el equilibrio estable. Esta información puede, por su parte, resultar de utilidad en el diseño de productos asociados con los fenómenos biológicos involucrados (en este caso, consideraciones de ergonomía asociadas con el balance postural).

Dimensión fractal y sus aplicaciones a la evaluación de un producto

Este tipo de consideraciones puede servir para la evaluación de productos industriales. Un ejemplo es la evaluación de calzados innovadores. Diseñar un calzado que ofrezca soporte, maximizando el rendimiento postural (requiriendo mínimo esfuerzo de control), o bien otro que resulte en un control postural muy cercano al que se tiene sin utilizar calzado, surgen como oportunidades. Para el caso del calzado inestable, su objetivo es alterar el mecanismo de control postural al perturbar la superficie de apoyo plantar, y la respuesta de balance encontrada como consecuencia de esta alteración será única para cada sujeto que lo utilice (adaptación).

La figura 2(a) muestra dos trazas del CP adquiridas durante 60 segundos. En el primer caso, para un sujeto descalzo (línea azul, arriba), y en un segundo caso, cuando el mismo sujeto usa un calzado diseñado sin apoyo de talón para favorecer la activación de músculos en miembros inferiores (línea roja, abajo). Como se observa en la figura, el uso de este calzado especial (zapatillas inestables) repercute en el SP, afectando en gran medida su área (incrementada en un 400%), así como su velocidad (incrementada en un 79%).

Las figuras 2(b) y 2(c) muestran las mismas señales de 2(a), separadas para cada condición, y en sus coordenadas AP y ML, a lo largo del tiempo. Las variaciones encontradas en el parámetro no lineal (DF_{AP} y DF_{ML}) para el caso de uso del calzado inestable cuantifican, por su parte, el cambio en la dinámica de la señal (se muestran los valores resultantes de implementar el algoritmo de DF de Higuchi, con un decrecimiento en la DF_{AP} y un mayor incremento en DF_{ML}), poniendo en evidencia que las estrategias de control del sistema postural del sujeto se ven sensiblemente condicionadas por el calzado en el segundo caso.

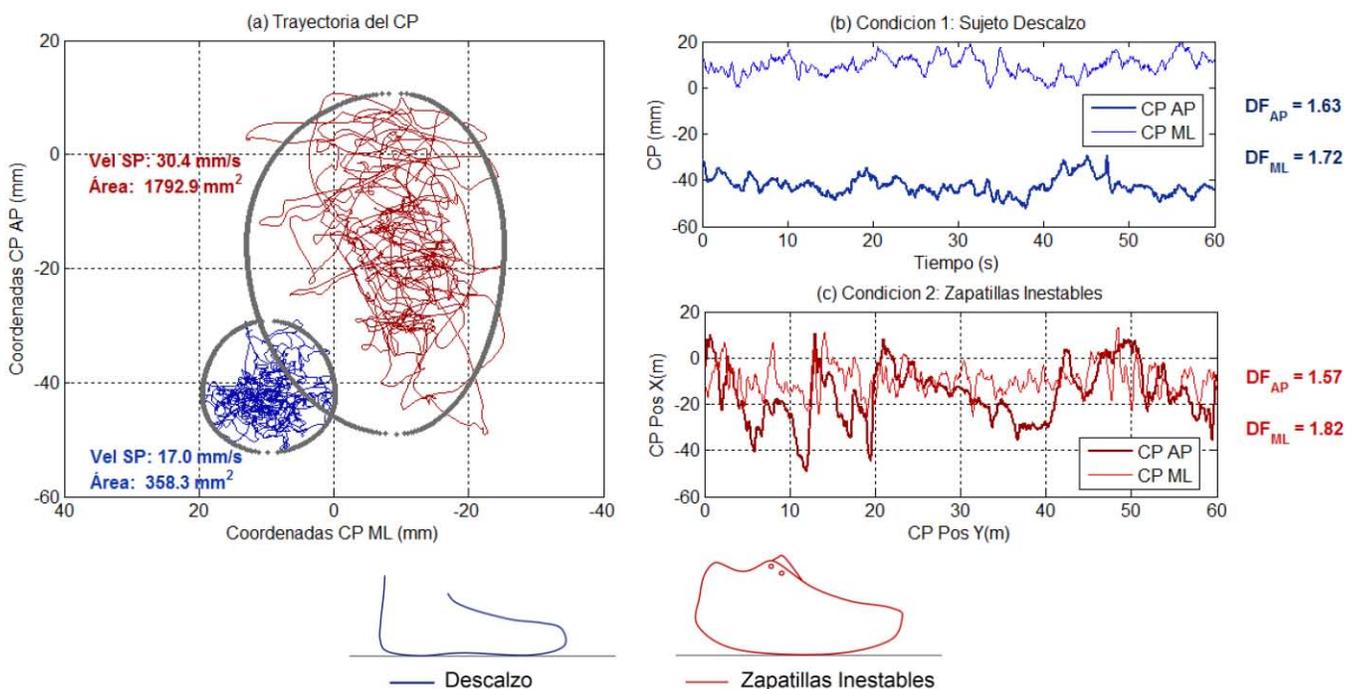


Figura 2. Respuesta del CP en bipedestación estática, para un sujeto sin calzado (azul) y en uso de zapatillas inestables (rojo). (a) Se observa un gran incremento en la zona de influencia del CP y el SP en uso de zapatillas inestables. (b)(c) La DF también se ve modificada en uso de zapatillas, y con mayor fuerza en el eje ML, cuantificando la modificación en las dinámicas posturales.

Con base en la información obtenida de este tipo de análisis postural, sería posible proponer modificaciones personalizadas para plantillas y calzado (materiales, propiedades formales, adaptaciones ergonómicas especiales), para favorecer una respuesta postural individual que se ajuste a valores control en términos de la variabilidad (DF) y eficiencia global (parámetros lineales).

El análisis de complejidad y variabilidad de sistemas propone, de esta forma, una mirada alternativa, complementaria y necesaria para el estudio del hombre y sus interacciones con su entorno. Las herramientas no lineales pueden ser utilizadas en el diseño de productos asociados con los procesos biológicos involucrados en esta interacción.

Conclusiones

La complejidad, vista como un nuevo paradigma para ver el mundo, conlleva a un pensamiento sistémico unificador de lo biológico con lo artificial. Las conjeturas generales se vuelven más interesantes cuando se está transitando el advenimiento de un nuevo periodo como puede serlo el Maquinoceno. Consecuencia del impacto tecnológico del último siglo en las nuevas formas de percepción, pensamientos y valores, deja atrás el método científico como forma casi excluyente de aproximación al conocimiento, a la visión mecanicista del universo y aquella de una sociedad en permanente lucha competitiva por la supervivencia. Se diluye la creencia en un progreso material ilimitado logrado por el crecimiento tecnológico y económico, entre otras consecuencias.

Por su propia naturaleza, este paradigma impacta particularmente en la forma de ver al hombre, y en particular, en su relación con la tecnología y el entorno. El pensar en hombre-tecnología-entorno como un SAC naturaliza la variabilidad de los sistemas. El control postural, como sistema evolutivo clave de nuestra especie, se vuelve un objeto de estudio por excelencia. En el umbral del Maquinoceno, el hombre, las interfaces hombre – máquina, y el contexto (ambiguo e impredecible), son todos SACs que pasan a una nueva jerarquía de sistemas adaptativos (recursividad), en los cuales la variabilidad será una de las variables relevantes a conocer, cuantificar y controlar. Entender la variabilidad es avanzar en la comprensión y prevención de los posibles fallos o errores del sistema.

La IA tendrá que dejar muy atrás el éxito de los sistemas expertos (que requieren entornos suficientemente estructurados), incorporando lógicas borrosas para lograr la flexibilidad requerida. La computación evolutiva y las redes neurales deberán lograr la adaptabilidad y el aprendizaje a la velocidad requeridos para seguir el ritmo impredecible de los cambios. El problema de la falta de versatilidad, costo, fiabilidad e inteligencia de los dispositivos o su verdadera autonomía, deberá ser superado. Ejemplos de estos nuevos productos se dan día a día, pero aun con limitaciones. La industria automotriz es pionera en introducir nuevas tecnologías (vehículos autónomos), al igual que la industria del entretenimiento, aprendizaje asistido, o bien, la producción de electrodomésticos inteligentes, especializados, sincronizados, para las tareas y el ahorro de energía. Sin duda, el Diseño Industrial jugará un rol clave en la recíproca adaptación tecnológica del hombre con las máquinas.

Los SACs responden a una gran cantidad de variables interdependientes, y cuyas interacciones cambian en el tiempo. Con el avance de desarrollos de telas inteligentes (Crouse, 2015) y con electrónica integrada (Google ATAP, 2017), el campo del diseño de indumentaria se abre al creciente potencial de obtener vestimentas adaptables. Por ejemplo, un esfuerzo conceptual de investigación reciente estudia prototipos de vestimenta que miden la postura corporal, temperatura externa e interna, y posibilitan la regulación de aislación y cambios morfológicos en la prenda (Durbhaka, 2016). La proliferación de sensores de variables fisiológicas integrados y comunicados en red (movimiento, ritmo cardíaco, etc.) y de nuevos materiales ha abierto el camino hacia concebir soluciones proyectuales que encuadran al sistema sujeto-vestimenta-ambiente en esta definición de SACs. De manera similar, los conceptos de arquitectura adaptativa también se abren a una visión del ambiente que se adapta en el tiempo en relación con múltiples y complejas variables, sin ya concebir al espacio como rígido en sus propiedades físicas.

Referencias

- Bertalanffy, L. (1995). Teoría general de los sistemas. México: Fondo de cultura económica.
- Baszczyk, J.W. y Klonowski, W. (2001). Postural stability and fractal Dynamics, *Acta Neurobiol. Exp.* 2001. Vol. 61(2): 105-112.
- Crouse, M. (2015). 'Smart Fabric' Keeps People Heated and Cooled. *Product Design and Development* (online). Recuperado el 06/07/2017 de <https://www.pddnet.com/news/2015/07/smart-fabric-keeps-people-heated-cooled>.
- Deml, B.; Stock, P.; Bruder, R.; Schlick, C.M. (editors). (2015). *Advances in Ergonomic Design of Systems, Products and Processes. Proceedings of the Annual Meeting of GfA 2015*, Springer.
- Birnbaum, J. (2004). Entrevista inédita del 30 de junio de 1992 a Jacques Derrida. Recuperado el 06/07/2017 de http://medias.lemonde.fr/medias/pdf_obj/sup_pdf_derrida_111004.pdf.

- Durbhaka, G.K. (2016). Adaptive wearable smart fabric based on body posture and temperature. *2nd International Conference on Advances in Computing, Communication, & Automation (ICACCA) (Fall)*, Bareilly, 2016: pp. 1-5.
- Eldredge, N. y Gould, S.J. (1972). Punctuated equilibria: an alternative to phyletic gradualism. En: Schopf, Th.J.M. (Ed.) *Models in paleobiology*. Freeman Cooper and Co.: 82-115.
- Gerardin, L. (1968). *La biónica*, Biblioteca para el hombre actual. Madrid: Ediciones Guadarrama. 251pp.
- Gherzi, I.; Castro Arenas, C.; Borsoi, P.; Miralles, M. (2017). Force Plate Calibration and Setup for Assessments of Human Balance. *IFMBE Proceedings VII Latin American Congress on Biomedical Engineering (CLAIB 2016)*: 197:200.
- Google ATAP. (2017). Project Jacquard. Google ATAP. Recuperado 06/07/2017 de <https://atap.google.com/jacquard/>.
- Gros, C. (2015). *Complex and Adaptive Dynamical Systems: A Primer*, 4th edition. Berlin: Springer. 250pp.
- Han J.; Moussavi, Z.; Szturm, T.; Goodman, V. (2005). Application of Nonlinear Dynamics to Human Postural Control System. *Proceedings of the 2005 IEEE, Engineering in Medicine and Biology 2005*. 7: 6885-6888.
- Higuchi, T. (1988). Approach to an Irregular Time Series on the Basis of the Fractal Theory. *Physica*. Vol. 31 (2): 277-283.
- Levin, R. (1992), *Complejidad. El caos como generador de orden*. Metatemas 41, Libros para pensar la ciencia, Tusquets Editores, Barcelona.243 paginas.
- Lipsitz, L.A. y Goldenberg, A.L. (1992). Loss of "Complexity" and aging. *JAMA*. (1992) Vol. 257(13): 1806-1809.
- Lorentz; E.N. (1963). Deterministic nonperiodic flow. *Journal of Atmospheric Sciences*. Vol. 20: 130-141.
- Muthuswamy, J. (2003). *Biomedical Signal Analysis*. En: *Standard Handbook of Biomedical Engineering and Design*. New York: McGraw-Hill.
- Myklebust, J. B.; Prieto, T.; Myklebust, B. (1995). Evaluation of Nonlinear Dynamics in Postural Steadiness Time Series; *Annals of Biomedical Engineering* (1995). Vol. 23(6): 711-719,
- Paillard, T. y Noé, F. (2015). Techniques and Methods for testing the postural function in Healthy and Pathological subjects. *BioMed Reserch International (Review Article)*, Volume 2015; article ID 891390, 15 pp.
- Price, H. (2016). Now it's time to prepare for the machinocene). Recuperado el 06/07/2017 de <https://aeon.co/ideas/now-it-s-time-to-prepare-for-the-machinocene>.
- Prigogine, I. (2009). *La Fin des Certitudes: Temps, Chaos et les Lois de la Nature*. Paris: Odile Jacob. 223pp.
- Sendhoff, B.; Körner, E.; Sporns, O.; Ritter, H.; Doya, K. (2009). *Creating Brain-Like Intelligence: From Basic Principles to Complex Intelligent Systems*. New York: Springer. 351pp.
- Simon, H. (1996). *The Sciences of the Artificial*. Boston: The MIT Press; 3rd ed. 215pp.
- Stanley H. Eugene; Ostrowsky, Nicole (1986); *On Growth and Form Fractal and Non-Fractal Patterns in Physics*. Boston, MA: Boston University. 317 pp.
- Teasdale, N.; Simoneau M. (2001). Attentional demands for postural control: the effects of aging and sensory reintegration. *Gait & Posture*. Vol 14: pp 203-210.
- Wiener, R. (1992); *Cibernética: o el control y comunicación en animales y maquinas*; Serie Metatemas 8, Turquets editores, Barcelona.
- Winter D. A.; Patla A. E.; Prince F.; Ishac M.; Gielo-Perczak, K. (1998). Stiffness Control of Balance in Quiet Standing. *J Neurophysiol*. Vol. 80: pp 1211-1221.