



SECCIÓN DE METODOLOGÍA

COORDINADORES: CARME VILADRICH

ANTONIO HERNÁNDEZ MENDO





Revista de Psicología del Deporte
2011. Vol. 20, núm. 2, pp. 505-521
ISSN: 1132-239X

Universitat de les Illes Balears
Universitat Autònoma de Barcelona

Rol de la intenció en la terminació del ejercicio inducida por la fatiga. Aproximación no-lineal¹

Natàlia Balagué, Robert Hristovski* y Daniel Aragonés**

A NON-LINEAR APPROACH TO THE ROLE OF INTENTION IN FATIGUING EXERCISE

KEY WORDS: Intention, Fatigue, Failure, Non-linear dynamics, Psycho-physiological integration.

ABSTRACT: Intention has a well-recognised role in the termination point of fatigue-induced exercise; however its interaction with physiological factors is unknown. The linear causal model applied to mind-body relationships does not explain several characteristic phenomena related to the termination point in tasks defined by motor intention. This paper aims to investigate the role of intention in terminating exercise and reveal the non-linear psychobiological integration that occurs during fatiguing efforts. On the basis of the experimental results, we conclude that the mechanism responsible for termination is the dissolution of the intentional attractor that is produced by the growing instability that fatigue produces in the neuromuscular axis. These findings point to the existence of a non-linear, dynamic psychobiological integration in exercise-induced fatigue.

Correspondencia: Natàlia Balagué. INEFC Barcelona. Avda. de l'Estadi s/n. 08038 Barcelona.
E-mail: nbalague@gencat.cat

¹ Este artículo se ha realizado con el soporte de la Secretaria General de l'Esport y del Departament d'Innovació Universitats i Empresa.

* Faculty of Physical Education, University of St. Cyril and Methodius, Skopje, Macedonia.

** INEFC Barcelona, España.

— Fecha de recepción: 16 de Enero de 2010. Fecha de aceptación: 7 de Febrero de 2011.





La intención se encuentra presente en cualquier actividad humana y juega un papel esencial en el ejercicio físico que se mantiene hasta el agotamiento total, ya que se relaciona con el propósito u objetivo del participante. Clásicamente, se ha entendido como la capacidad de causar un determinado comportamiento, pero su rol de causal plantea dudas y deja algunas cuestiones sin resolver. En primer lugar, qué es lo que causa la propia intención (de dónde y cómo emerge). Una regresión lógica nos llevaría, o bien a alguna causa mágica o intención última, dispuesta por algún tipo de súper programa, o a la existencia de algún dispositivo capaz de seleccionar y decidir sobre los propósitos. En segundo lugar, es cuestionable que podamos realmente aislar y explicar la intención al margen de otros factores de tipo cognitivo o fisiológico que actúan durante el ejercicio —en especial, aquel que es llevado hasta el fallo (Bechtel, 2009).

En este artículo definimos la intención como la direccionalidad hacia un estado coordinativo motriz (p.e. mantener una flexión de codo de 90° o un pedaleo a 70 revoluciones por minuto) y sostenemos que no es sólo un estado mental sino también es físico, en la línea de la teoría de la emergencia (Beckermann, 1992; Ellis, 2000; Thompson y Varela, 2001). Las intenciones motrices son conscientes porque son accesibles a la consciencia y podemos informar sobre ellas. Son vistas como propiedades emergentes de procesos dinámicos (no sólo desde el punto de vista epistemológico sino también ontológico) y no precisan de representaciones mentales pre-formadas (ver Edelman, 1998). En este sentido son tanto estados físicos como mentales y se pueden definir como atractores, es decir estados estables del sistema motriz. En particular, cuando las

definimos cinemáticamente son valores que nos informan macroscópicamente del comportamiento coherente de la dinámica de los componentes neuromusculares (desde los corticales hasta las unidades motoras), presentando cambios cualitativos cuando emergen nuevos tipos de coordinación.

El objetivo de este trabajo es reconocer el papel de la intención en la terminación del ejercicio desde una perspectiva no-lineal, y revelar el tipo de integración psicobiológica que se produce durante el esfuerzo fatigante. Se mostrará cómo determinados resultados poco claros o controvertidos, conseguidos por estudios que aplican aproximaciones reduccionistas y lineales, adquieren un nuevo significado con la modelización dinámica no-lineal. A través de la aplicación de conceptos y herramientas propios de la teoría de sistemas dinámicos (TSD), que serán detallados para familiarizar a la persona lectora con la metodología no lineal, se discutirán resultados experimentales que apuntan hacia una relación de causalidad circular de la intención con otros componentes neuromusculares en el fallo inducido por la fatiga.

Modelos vigentes para explicar la fatiga y el fallo inducidos por el ejercicio

El fallo de la tarea inducido por la fatiga se ha relacionado clásicamente con factores de origen muscular (Gandevia, 2001). Sin embargo, las controversias existentes entre los investigadores respecto a la causa, lugar o mecanismo específico responsable de dicha fatiga han substituido el término de “fatiga muscular” por el de fatiga inducida por el ejercicio (Maluf y Enoka, 2005). Los modelos reduccionistas lineales aún no han resuelto satisfactoriamente la dicotomía entre fatiga central y periférica (Noakes, St. Clair Gibson





y Lambert, 2005), del mismo modo que las teorías de la ciencia cognitiva convencional no han podido resolver la dicotomía mente-cuerpo (Bechtel, 2009). La apuesta por las relaciones del tipo causa-efecto ha llevado a un barullo de mecanismos conflictivos en la relación de las funciones cognitivas y fisiológicas (o también mente-cuerpo), que carecen de delimitaciones claras y competencias bien definidas (Van Orden, Kloos y Wallot, 2009).

Una de las soluciones que se han ofrecido recientemente desde una perspectiva holística para integrar los factores de orden psicológico y fisiológico durante el ejercicio realizado hasta la terminación es ubicar en el cerebro un dispositivo integrador inmutable responsable de regular el esfuerzo y mantener la homeostasis –Modelo del Gobernador Central (MGC) (Lambert, St. Clair Gibson y Noakes, 2005). El MGC supone que a través del diálogo interno, que tomaría la información almacenada y procesada en el denominado “gobernador central”, los sujetos serían conscientes de la sensación de fatiga y autorregularían la intensidad de esfuerzo (St. Clair Gibson et al., 2003; St. Clair Gibson y Foster, 2007). En este contexto la intención pasa a tener una función teleológica en el fallo inducido por la fatiga, relacionada con los cambios fisiológicos existentes en los sistemas periféricos.

A pesar de su indudable contribución a la investigación sobre la fatiga y la terminación del ejercicio, el MGC, que ya ha sido cuestionado por otros autores (Weir, Beck, Cramer y Housh, 2006), presenta dos claras limitaciones para ser considerado “modelo de fatiga de los sistemas complejos” como sus autores le proclaman. La primera hace referencia al supuesto carácter inmutable del programador central con la fatiga. La segunda con la necesidad de dicho

programador en un sistema auto-organizado. ¿Quién programa entonces al programador? Una regresión infinita parece obvia.

Modelos lineales versus no lineales en la fatiga y el fallo

A pesar de que sus defensores le llaman “modelo de fatiga de los sistemas complejos”, el MGC se puede considerar como un híbrido conceptual porque, por un lado, presenta una visión integrada del sistema neuromuscular, pero, por otro, postula la existencia de un programador central que trabaja como una unidad integrada (recibe información periférica, hace cálculos, toma decisiones y envía órdenes vía eferente). El tipo de complejidad que presenta un modelo de este tipo se considera dominada por los componentes (Van Orden, Holden y Turvey, 2003) y es característica de artilugios técnicos ordinarios (como por ejemplo los aparatos de televisión, los coches, etc.), en los que el rendimiento del sistema depende del funcionamiento interno de sus componentes, que se encuentran encapsulados y cableados entre sí, y que interactúan pero no son interdependientes.

Los sistemas biológicos (realmente complejos) presentan, a diferencia de los artilugios técnicos, dinámicas dominadas por las interacciones y, en especial, capacidades de autoorganización y propiedades emergentes. Esto significa que no necesitan de ningún tipo de programador superior o gobernador central que ejerza una función controladora. En este tipo de sistemas los componentes centrales estarían sujetos a cambios, de la misma manera que lo están los componentes periféricos. Los dispositivos de control encapsulados a que nos hemos referido anteriormente permanecerían inmutables con los cambios del entorno (tanto externo como





Balagué, N., Hristovski, R. y Aragonés, D.

Rol de la intención en la terminación del ejercicio...

interno); es decir, actuarían como “motores impasibles”. Dichos dispositivos, son típicos de los sistemas que exhiben una emergencia débil (como la que se lleva a cabo en los artilugios técnicos), pero no de aquellos que, como en el caso de los sistemas complejos adaptativos, presentan fuertes propiedades emergentes y comportamiento no-lineal. Este tipo de comportamiento surge no sólo de la interacción entre los componentes del sistema, sino también de su interdependencia y su “acoplamiento flexible” (Van Orden, Kloos y Wallot, 2009).

Limitaciones de los modelos lineales para explicar el fallo espontáneo

Resulta útil destacar algunos aspectos de la distinción entre los enfoques lineales y no lineales de la complejidad psico-fisiológica y mostrar las diferencias entre su capacidad explicativa. Para ello nos centraremos brevemente sobre las características de la respuesta que se lleva a cabo durante la integración lineal y no lineal, respectivamente, en sistemas complejos.

Los sistemas lineales multivariantes son proporcionales y aditivos; es decir, la respuesta del sistema a un cambio en alguna de las variables independientes siempre es proporcional a ese cambio y a la suma de todos los cambios que se produjeron. Además, es necesario un cambio discontinuo, cualitativo en las variables independientes para generar cambios discontinuos en la respuesta del sistema.

Por el contrario, en los sistemas complejos no lineales un pequeño cambio en los parámetros puede producir un cambio discontinuo en la variable de respuesta. Así, testando el comportamiento del sistema sobre amplios intervalos mientras van variando sus parámetros podemos tener una mejor idea del tipo de integración presente en el mismo.

Para comprender mejor el fenómeno de la terminación de esfuerzo es necesario diferenciar entre lo que habitualmente se denomina fallo de la tarea y el recientemente incorporado concepto de “fallo espontáneo inducido por la fatiga” (FEIF) (Hristovski y Balagué, 2010). Tomemos como ejemplo un ejercicio cuasi-estático consistente en sostener una barra olímpica con una flexión de codo de 90°. El fallo de la tarea se establece por convención y coincide con la incapacidad de satisfacer los criterios de esfuerzo previamente establecidos —en este caso sería el mantenimiento del ángulo de 90°. Cuando a consecuencia de la fatiga el ángulo empieza a decrecer, y no puede recuperar los 90°, aún es posible continuar con el ejercicio a elevada intensidad hasta que se produce la terminación espontánea del esfuerzo, caracterizada por la caída brusca del ángulo. El FEIF se define como un evento macroscópico, comportamental, que puede ser detectado a nivel cinemático como un cambio de movimiento brusco hacia niveles de gasto energético inferiores. Esta fase discontinua del ejercicio que se ubica entre el “fallo de la tarea” y el FEIF, y que se caracteriza por la competición de la intención con los demás componentes neuromusculares que interactúan durante el esfuerzo, es de gran importancia para reconocer la naturaleza no lineal del fallo.

Si el ángulo del codo se considera como una variable cinemática que nos informa sobre el estado del sistema (dependiente de variables psico-fisiológicas que cambian continuamente bajo el ejercicio fatigante), un modelo lineal predeciría que el ángulo de codo cambiaría de forma continua hasta la terminación. Es decir, un cambio continuo en las variables independientes generaría un cambio continuo (aunque no necesariamente monótono) en la variable dependiente (en





este caso el ángulo de codo). Como diferentes estudios han podido demostrar (Wilmore, Costill y Kenney, 2008), las variables psicofisiológicas involucradas en el esfuerzo (temperatura interna y muscular, concentración de sustratos metabólicos, concentraciones de ácido láctico, percepción de esfuerzo, etc.) cambian de forma continua y sin embargo, la terminación o fallo es un evento discontinuo (se produce de forma abrupta). Por lo tanto, un modelo lineal es incapaz de capturar dicho evento final repentino.

Si se persiste en la explicación lineal, lo que queda es elucubrar sobre la existencia de un dispositivo especializado que actúe como integrador lineal de aferencias psicofisiológicas y que posea una característica de activación tipo umbral, análoga a la que se produce en la activación de las neuronas del SNC. Una vez que se alcanzase el umbral, el sistema motor quedaría apagado (inhibido), y se produciría el cambio discontinuo característico del fallo (caída repentina del ángulo de codo). Este tipo de modelo enriquecido o híbrido del umbral de activación lineal sería capaz de capturar el cambio continuo del ángulo de codo durante el ejercicio fatigante, así como la terminación discontinua. Sin embargo, la forma de capturar la discontinuidad es a través de adjuntar *ad hoc* un mecanismo del tipo “si-entonces” para ajustar los datos experimentales, lo que realmente no explica el cambio discontinuo propiamente dicho. Por lo tanto, dicho sistema híbrido (postulado también en el MGC) conduce a una brecha de explicación y por ello no sería un modelo adecuado del fallo inducido por la fatiga. En

pocas palabras, la simplicidad formal alcanzada por el ajuste *ad hoc* excluiría la simplicidad explicativa. Sin embargo, es interesante destacar que mientras se aborda la modelización conceptualmente –es decir, verbalmente– no parecen existir graves problemas. De hecho, su gravedad sólo resulta evidente cuando uno se plantea la modelización formal *no-ad hoc*.

Por el contrario, los modelos no lineales no sólo permiten ese comportamiento discontinuo característico del FEIF, sino que requieren que el sistema se comporte de manera similar cerca de los llamados “puntos críticos”.¹ El comportamiento discontinuo es una predicción general de la TSD y el mecanismo que lo permite es la pérdida de estabilidad dinámica (Haken, 1983). Dichos modelos no se detienen en predecir simplemente la posibilidad de perder la estabilidad y la estabilidad diferencial en los estados del sistema, sino que también permiten un conjunto de predicciones genéricas, que son sellos de las importantes propiedades emergentes relacionadas con el comportamiento de los sistemas complejos. Estas predicciones de comportamiento se detallarán a continuación.

Propuesta metodológica para el estudio no-lineal de la integración psicofisiológica en la fatiga y el fallo

Llegados a este punto cabe preguntarnos cómo se produce la integración de la intención con los factores neuromusculares sin un dispositivo integrador específico. Para responder a esta pregunta es necesario establecer los aspectos cualitativos básicos de la interacción entre los componentes

¹ Un punto crítico es un punto del espacio de control (es decir, aquel espacio abarcado por los parámetros de control) para el que se produce una bifurcación o cambio de estado.



centrales y periféricos que trabajan de forma integrada para producir el comportamiento característico de la fatiga y especialmente del FEIF. De alguna manera, lo que debemos hacer es desentrañar la dinámica coordinativa que está presente entre las variables comportamentales macroscópicas durante el ejercicio realizado hasta la extenuación en diferentes escalas temporales. Para ello la TSD ofrece una serie de conceptos y herramientas útiles que se describen a continuación.

La dinámica no-lineal puede abordarse como mínimo desde dos perspectivas. Una es el análisis de los cambios de estado que sufre con el tiempo una variable representativa de la coordinación del sistema, como sería, en el ejemplo propuesto, el ángulo del codo. El análisis de series temporales de los procesos estocásticos, entre otros, permite la detección de la estructura dinámica temporal de la variable investigada y puede ayudar a hacer una suposición mejor sobre el tipo de interdependencias presentes en el comportamiento del sistema. Dentro de este enfoque, las relaciones entre la potencia espectral y la frecuencia de oscilaciones (o el número inverso de observación), pueden revelar información sobre la existencia de parentesco o independencia de las fluctuaciones estocásticas de la variable investigada.

En el ejercicio cuasi-estático de mantenimiento de la flexión del codo a 90° hasta el FEIF se pueden registrar las fluctuaciones en el ángulo con la ayuda de un electrogoniómetro.

Se pueden diferenciar dos grandes familias de fluctuaciones estocásticas: el movimiento

Browniano fraccionado (fBm) y el ruido Gaussiano fraccionado (fGn). El fGn se define como una secuencia de incrementos sucesivos de fracciones de movimiento Browniano (Delignières, Torre y Lemoine, 2005). En otras palabras, el fBm es una versión integrada del fGn y como tal, es un proceso correlacionado. Estos procesos de relaciones bilogarítmicas (expresión a escala logarítmica de los ejes vertical y horizontal) entre la potencia espectral² y la frecuencia presentan una dependencia lineal, con una pendiente β constante. Esta propiedad se denomina de escala invariable porque la dinámica de las fluctuaciones no es dependiente de la escala temporal en que se observa el sistema, y en el dominio temporal o de la frecuencia esto se expresa como una dependencia de ley de potencias³. Los índices espectrales β entre fGn y fBm están relacionados a través de las siguientes expresiones: $\beta_{fGn} = \beta_{fBm} + 2$ (véase Torre y Wagenmakers, 2009) y $-1 < \beta_{fBm} < -3$. Las constantes β indican el tipo de interdependencia entre los estados de la serie. Por ejemplo, $\beta_{fBm} = -2$ se relaciona con incrementos seriados no correlacionados; los valores de: $-2 < \beta_{fBm} < -1$ están relacionados con incrementos anti-correlacionados o anti-persistentes; es decir, un incremento mayor en promedio es seguido por uno más pequeño y viceversa y $-3 < \beta_{fBm} < -2$ indica una dinámica incremental persistente (es decir, un incremento superior en la serie tiende a ser seguido por uno mayor y viceversa).

Las investigaciones llevadas a cabo en un gran número de sistemas y tareas muestran la

² La potencia o densidad espectral de una señal es una función matemática que nos informa de cómo está distribuida la variabilidad del proceso a lo largo del espectro de frecuencias o escalas temporales.

³ Una relación en forma de ley de potencias entre dos escalares x e y es aquella que puede expresarse como sigue: $y = ax^k$ donde a (la constante de proporcionalidad) y k (el exponente de la potencia) son constantes.



presencia de una relación de escala de ley de potencias. En la cognición, se ha encontrado una escala invariable en una amplia gama de tareas que incluyen: la rotación mental de objetos, la decisión léxica, la búsqueda visual, el tiempo de reacción simple, la estimación de rotación angular, estimación temporal, dinámica de recuperación de la memoria, etc. (ver por ejemplo, Gilden, 2001; Van Orden, Holden y Turvey, 2003; Rhodes y Turvey, 2007). En control motor, la relación de escala de ley de potencias se ha encontrado en tareas de producción de fuerza (Gilden, 2001; Vaillancourt y Newell, 2003; Wing, Daffertshofer y Pressing, 2004;) y movimientos rítmicos y coordinativos unimanuales y bimanuales (Chen, Ding y Kelso, 1997; Ding, Chen y Kelso, 2002; Delignières, Lemoine y la Torre, 2004; Torre, Delignières y Lemoine, 2007; Delignières, Torre y Lemoine, 2008).

Una escala invariable de la dinámica del sistema puede significar la existencia de auto-organización en el mismo. Por ejemplo, Van Orden et al. (2003) se plantean a qué clase general de sistemas pertenecen los sistemas cognitivos y explican la cognición como una condición de escala invariable genérica o criticalidad genérica (esta última se refiere a la propiedad del sistema de mantenerse en un estado crítico estable, no asociado con su inestabilidad) y por ser un sistema dominado por la interacción, que funciona en un régimen crítico autogestionado (Van Orden, Holden y Turvey, 2005; Kello, Anderson, Holden y Van Orden, 2008). Ver también otros autores que dan explicaciones lineales a la dinámica de escala invariable (Farrell, Wagenmakers y Ratcliff, 2006; Torre y Wagenmakers, 2009).

El segundo enfoque que, combinado con el anterior, también puede ayudar a determinar el tipo genérico de integración

dinámica de los sistemas estudiados, consiste en la búsqueda de la existencia de criticalidad –es decir, la propiedad del sistema de mantenerse en un estado crítico inestable (caracterizado por el aumento de fluctuaciones, entre otros cambios).

Los fenómenos críticos son efectos que surgen cerca de los llamados puntos críticos o umbrales de los sistemas que son no lineales por naturaleza. La estrategia de encontrar fenómenos críticos supone la aplicación de un procedimiento de escalado de alguna variable sobre un amplio intervalo de valores mientras se observa el comportamiento de la variable representativa, que hipotéticamente especifica los estados del sistema (Kelso, 1984). La primera variable se denomina parámetro de control no específico porque no especifica el comportamiento del sistema (Kelso, 1995) sino que ejerce control sobre el mismo, de tal manera que lo conduce a través de sus estados disponibles. Por ejemplo, el cambio de potencial eléctrico en un sistema neuronal es un parámetro de control no específico del comportamiento neuronal. Dicho cambio no especifica la forma o la amplitud del potencial de acción, ni tampoco si la neurona dispara o se activa. Sólo lleva el sistema neuronal (o de red) hacia el punto crítico; es decir, hacia un umbral en el que la neurona (o red) se auto-organiza en un determinado modo de acción. Dicha auto-organización viene condicionada por las configuraciones inmediatas de otros parámetros de control no específicos, tales como tipos de acoplamiento sináptico, canales iónicos, etc. (para una información más completa consultar Izhikevich, 2000).

La segunda variable, a la que se ha hecho referencia anteriormente, se denomina parámetro de orden –porque especifica el comportamiento ordenado; es decir,





coherente y colectivo de los componentes del sistema. Los valores de esta variable son los que un experimentador trata como esenciales para capturar el comportamiento bajo investigación. El parámetro de orden rige sus componentes que, a su vez, a través de su comportamiento colectivo cooperativo, forman y estabilizan el parámetro de orden (véase Haken, 1983). Los valores más probables del parámetro de orden se denominan atractores, lo que significa que son estados que atraen el comportamiento del sistema debido a las fuerzas de atracción entre sus componentes, y sus estados estables se denominan puntos fijos, que son los atractores más simples. Los parámetros de orden son esenciales para la caracterización del comportamiento del sistema, tanto en su rango de operación no-lineal, como en el aproximadamente lineal (Kelso, 1995).

El sistema, si es no lineal, exhibirá un comportamiento crítico; es decir, presentará un umbral. Este surge cuando por un cambio del parámetro de control no específico, el sistema; es decir, el parámetro de orden, se sitúa en su gama de funcionamiento no lineal. Las predicciones genuinas de las teorías no lineales sobre el comportamiento macroscópico de sistemas no lineales incluyen (Kelso, 1995): cambio discontinuo del parámetro de orden con respecto a una pequeña variación de un parámetro de control no específico (es decir, bi- o multiestabilidad), aumento de las fluctuaciones del parámetro de orden al acercarse a la discontinuidad, "slowing down" o desaceleración de los procesos de relajación, sensibilidad a las perturbaciones externas e internas y aumento del tiempo de cambio entre los modos de operación –histéresis.

El aumento de las fluctuaciones se produce cuando pequeñas variaciones del orden previamente establecido aumentan su interacción creando un efecto cooperativo

que implica progresivamente a mayores partes del sistema (Patashinskii y Pokrovskii, 1979; Nicolis y Prigogine, 1977). Son un sello distintivo de la desestabilización de los acoplamientos existentes entre los componentes, lo que finalmente lleva al sistema a la pérdida de estabilidad y a la creación de un nuevo estado que satisface a los constreñimientos inmediatos. Por ejemplo, en el caso del ejercicio cuasi-isométrico de flexión del codo a 90°, el aumento de las fluctuaciones del ángulo es consecuencia de la desestabilización de la función cooperativa inicial de componentes musculares, espinales y supra espinales (incluyendo los volitivos, motivacionales, etc.). En este sentido, los sistemas no lineales cambian sus estados como consecuencia de la aparición de una inestabilidad dinámica dentro de los procesos cooperativos que formaban el estado colectivo anterior, representado por el parámetro de orden. El nuevo estado (representado por el FEIF) surge porque se disuelven los procesos cooperativos inestables y los componentes se re-organizan simultáneamente en un nuevo estado cooperativo que se rige por los nuevos constreñimientos. Se puede decir que la condición necesaria y suficiente; es decir, la causa para cambiar a un nuevo estado es la pérdida del mecanismo de estabilidad del estado precedente. En este marco formal los nuevos estados no se producen como consecuencia de la alteración de un componente aislado o como resultado de cálculos realizados por algoritmos específicos de la tarea ubicados en alguna parte del cerebro (como se sugiere en el MGC). Tampoco son el resultado de un funcionamiento parecido al de un termostato que se enciende o apaga en función de unos valores predeterminados con el objetivo de preservar la homeostasis (St. Clair Gibson et al., 2005). Esta es una de las diferencias



fundamentales existentes entre los modelos lineales y no-lineales para explicar los cambios de estado que se llevan a cabo en sistemas complejos. El lector podrá encontrar evidencias experimentales relacionadas con el aumento de la variabilidad estocástica de registros EEG o ECG con el desarrollo de la fatiga en diversos estudios (Azjicki, Gofman y Freidin, 1972; Sologub, Kulagina y Flores, 1972; Lippold, 1981; Hunter, Ryan, Ortega y Enoka, 2002; Huang, Hwang, Huang y Young, 2006; Hunter, Critchlow, Shin y Enoka, 2004; Christakos, Papadimitriou y Erimaki, 2005; Rudrof, Poston, Shin, Møller y Enoka, 2005; Boonstra et al., 2008; Lorist, Kernel, Meijman y Zijdwind, 2002).

Las relaciones características de la existencia de una integración dinámica no lineal han sido demostradas en diferentes comportamientos. Entre ellos podemos citar las transiciones entre estados en la coordinación bimanual de movimientos oscilatorios (Kelso, 1984), la coordinación entre extremidades (Kelso, Buchanan y Wallace, 1991), el aprendizaje motor (Zanone y Kelso, 1992), la coordinación multi-articular (Kelso y Jeka, 1992; Jeka, Kelso y Kiemel, 1993), la formación de trayectorias (Buchanan, Kelso y Fuchs, 1996), las transiciones de reacción-anticipación (Engström, Kelso y Holroyd, 1996), las transiciones posturales (Bardy, Oullier, Bootsma y Stoffregen, 2002), las transiciones de coordinación de agente-objetivo y la aparición de nuevas acciones (Hristovski, Davids y Araújo, 2006, 2009), el razonamiento y la aparición de una visión (Stephen, Dixon y Isenhower, 2009) por nombrar algunos. Además, este tipo de relaciones e integración han sido descubiertas en la dinámica del cerebro humano (véase Fuchs, Kelso y Haken, 1992). Estas y muchas otras investigaciones corroboran firmemente la hipótesis de que los sistemas neurobio-

lógicos pertenecen a la clase de sistemas no lineales, aunque lejos del estado crítico puedan comportarse en régimen aproximadamente lineal (posibilitando su modelización como tales) y enmascarar, por lo tanto, su carácter genérico.

La intención en el contexto de la modelización no-lineal de la fatiga y el fallo inducidos por el ejercicio

Siguiendo con el ejemplo del ejercicio cuasi isométrico al que nos hemos referido y en base a la metodología propuesta por la TSD revisaremos el rol de la intención en la consecución del FEIF.

Como se ha dicho, para demostrar el comportamiento no lineal de un sistema es necesario mostrar que una variable representativa de su coordinación presenta cambios de estado y que se producen fenómenos críticos, como el cambio discontinuo de la variable y el aumento de fluctuaciones al acercarse a la discontinuidad.

En la modelización no-lineal del FEIF consideraríamos por un lado el parámetro de orden (el ángulo del codo) que cambia de estado con la fatiga (pasando del ángulo de 90° al de aprox. 0° de forma discontinua). Dicho cambio, que viene precedido por un incremento de las fluctuaciones del ángulo, se genera como consecuencia de las variaciones continuas que ocurren en los parámetros de control, cuya interacción tiende a desestabilizar el estado inicial y competir con el atractor intencional.

Las intenciones, particularmente las que condicionan la tarea, son una clase importante de parámetros específicos de control (Kelso, 1995), que actúan como condiciones límite del comportamiento del sistema (Van Orden y Holden, 2002). Dentro de la TSD los estados intencionales se definen formalmente como atractores intencionales y



pueden expresarse en términos del parámetro de orden. Las intenciones estabilizan modos de comportamiento inestables y desestabilizan los estables (Jantzen, Oullier y Kelso, 2008). Por ejemplo, en la posición de sentado o bien ortostática, el sistema del ángulo del codo puede caracterizarse como bi-estable, con un atractor correspondiente al antebrazo alineado con la gravedad y otro en armonía con la dirección de la fuerza muscular que, debido a restricciones anatómicas, no puede realizarse. Cualquier otro ángulo tiene que ser sostenido por una intención consciente debido a su inestabilidad intrínseca (como es el caso del ángulo de 90°). Por lo tanto, el ángulo del codo, bajo condiciones de fatiga de la contracción, puede ser tratado como un parámetro de orden intencionalmente especificado que refleja la coordinación cooperativa de los procesos del eje neuromuscular que forman la intención motriz. La intención viene especificada por el estado del atractor, porque la intención consciente trata de mantener o cambiar un estado determinado. Las desviaciones de ese estado significan el grado de inestabilidad de los procesos cooperativos que forman la intención (desde los procesos metabólicos musculares, los reflejos espinales, a los bucles subcorticales y corticales –volición, motivación, etc.).

Los parámetros de control no específicos no causan el fallo sino que interactúan con el parámetro de control específico (la intención) para producir uno u otro estado del sistema. Cuando los efectos inhibidores producidos por los diferentes parámetros de control no específicos que actúan a diferentes niveles (muscular, espinal, subcortical, cortical, etc.) compiten eficazmente con la intención producen la pérdida de la estabilidad cooperativa previa (incrementando las fluctuaciones) y provocan finalmente la disolución de dicha intención (FEIF). Tal

como se mostró en los resultados obtenidos por Hristovski y Balagué (2010) en el ejercicio cuasi-isométrico de flexión del codo las fluctuaciones incrementan en diferentes escalas temporales, de manera que la inestabilidad se va reflejando progresivamente en bucles de control más largos y complejos, que corresponden a los que actúan a nivel cortico-espinal, sub-cortical y cortical (ver también Vaillancourt y Newell, 2003), hasta llegar a afectar a todo el sistema neuromuscular por completo, incluida finalmente la intención.

Lo que hace la fatiga es perturbar la potencia espectral hacia valores superiores de forma correlacionada. En la Figura 1 (gráfico superior) se muestran las fluctuaciones estandarizadas del ángulo del codo durante el ejercicio cuasi estático de flexión a 90° hasta el FEIF y en el gráfico inferior se presenta la densidad espectral de dichas fluctuaciones. Como se observa, el espectro es de escala invariable, característico de un proceso auto-organizado, tal como se ha explicado en el apartado 3.3. Este hallazgo no es exclusivo del ejercicio cuasi estático. Balagué, Hristovski y Vazquez (2010) han observado este tipo de espectro de escala invariable en las fluctuaciones que sufre otro parámetro de orden (en este caso la frecuencia de pedaleo –rpm) durante un ejercicio en cicloergómetro con carga constante hasta la extenuación (Figura 2). A pesar de tratarse de ejercicios y parámetros de orden diferentes (en el primer ejemplo se trata del ángulo del codo y en el segundo de la frecuencia de pedaleo) la densidad espectral de sus fluctuaciones respectivas sigue siendo de escala invariable. Esto indica la universalidad del fenómeno y apunta hacia un tipo de integración psicofisiológica de naturaleza dinámica y no-lineal en la fatiga inducida por el ejercicio.

Lo que ocurre en realidad durante el ejercicio fatigante, más que una mera altera-





ción de algún proceso o “sitio” específico aislado, es el desarrollo de una inestabilidad correlacionada en todo el eje neuromuscular, que acaba por provocar también la cancelación de la intención. Por lo tanto, los cambios locales inducidos por la fatiga no se suman de forma independiente sino que lo hacen de forma correlacionada e integrada y su consecuencia es la desestabilización de la integración inicial. El atractor intencional conscientemente impuesto durante el

esfuerzo tampoco puede mantenerse y se desestabiliza con la fatiga hasta que acaba por disolverse de forma espontánea (sin necesidad de ningún mecanismo adicional) para satisfacer las condiciones inmediatas. En este sentido podemos afirmar que la relación de la intención con la fatiga no es de causa-efecto sino que responde más bien a un modelo de causalidad circular que, afectando a todo el eje neuromuscular, provoca finalmente un cambio no lineal, el FEIF. Por

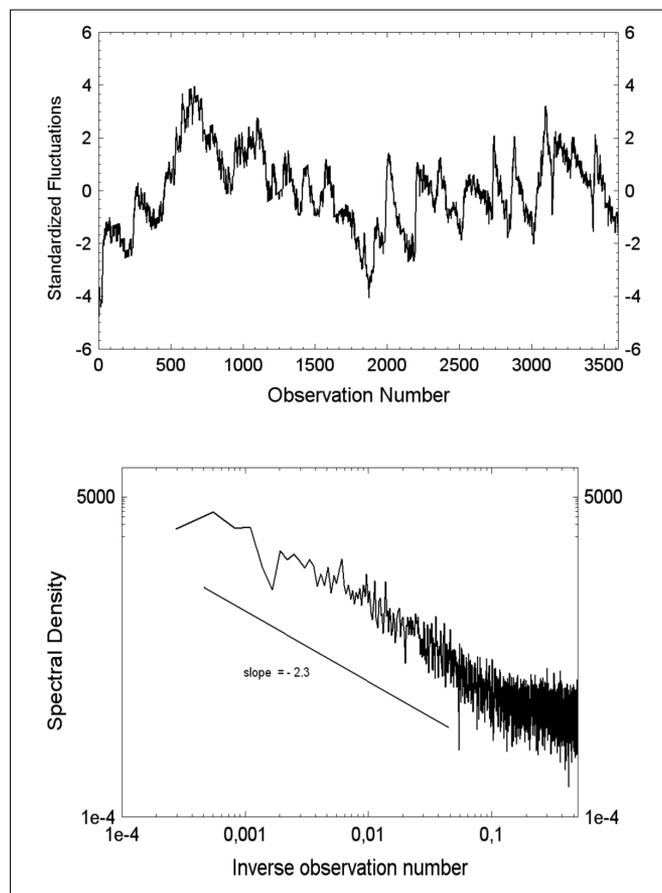


Figura 1. Fluctuaciones estandarizadas del ángulo del codo durante el ejercicio casi-estático (gráfico superior) y su densidad espectral (gráfico inferior), que muestra una pendiente de -2.3 (persistencia).





la universalidad del fenómeno, que se muestra en diferentes tipos de ejercicio y parámetros de orden, el modelo dinámico no

lineal propuesto supone un reto de futuro para la comprensión de los mecanismos de integración psicobiológica en general.

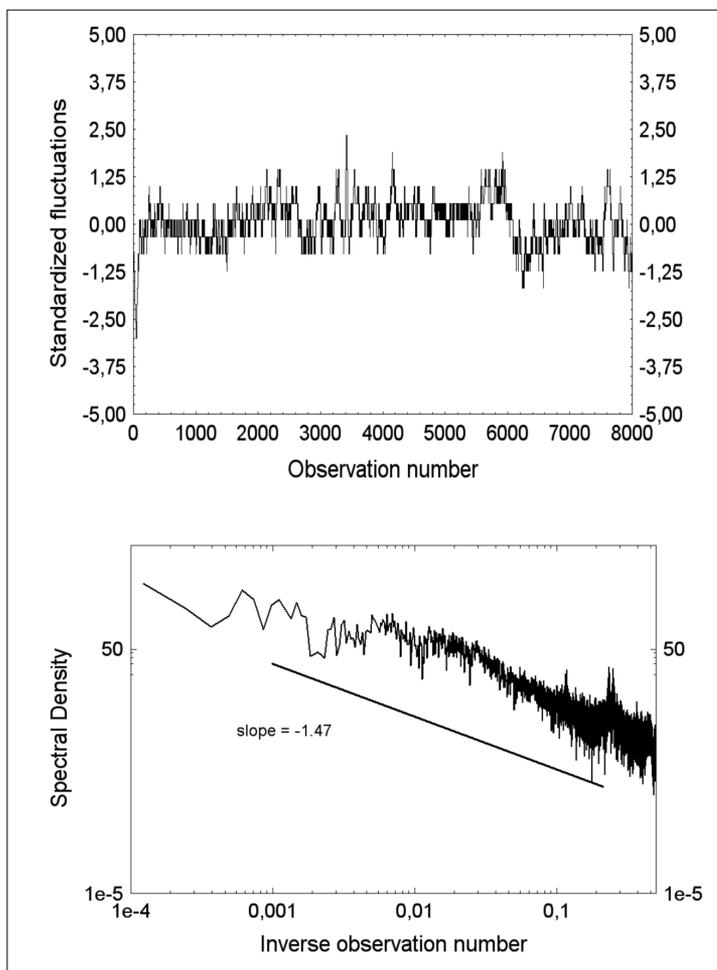


Figura 2. Fluctuaciones estandarizadas de la frecuencia de pedaleo (*rpm*) considerada como parámetro de orden en un ejercicio de *I* constante sobre cicloergómetro (gráfico superior) y su densidad espectral (gráfico inferior), que muestra una pendiente de -1.47 (antipersistencia).





Conclusiones

El rol de la intención en la terminación del ejercicio fatigante se ha explicado clásicamente en base a un modelo de causalidad lineal. Sin embargo, los modelos lineales no permiten capturar algunos de los fenómenos característicos del proceso de fatiga, como la transición discontinua y el incremento de las fluctuaciones característicos del fallo espontáneo (FEIF). Los modelos no lineales macroscópicos predicen de forma natural tales efectos, como se deriva de los resultados obtenidos en diferentes tipos de ejercicio y parámetros de orden. La disolución

espontánea del atractor intencional, consecuencia de la pérdida de estabilidad que se manifiesta en todo el eje neuromuscular con la fatiga, es responsable del FEIF. El rol de la intención es pues constreñir (no causar) la dinámica característica del proceso de fatiga. Al mismo tiempo, la intención es constreñida por el resto de componentes neuromusculares, de manera que finalmente se disuelve. Ello apunta a la existencia de un tipo de integración psicobiológica dinámica y no lineal en la fatiga inducida por el ejercicio y ofrece una nueva mirada para comprender las relaciones mente-cuerpo.

ROL DE LA INTENCION EN LA TERMINACION DEL EJERCICIO INDUCIDA POR LA FATIGA. APROXIMACION NO-LINEAL

PALABRAS CLAVE: Intención, Fatiga, Terminación, Dinámica no lineal, Integración psico-fisiológica.

RESUMEN: La intención tiene un papel reconocido en la terminación del ejercicio inducido por la fatiga pero se desconoce cómo interactúa con otros factores de origen fisiológico. El modelo de causalidad lineal, aplicado a las relaciones mente-cuerpo, no explica algunos de los fenómenos característicos relacionados con la terminación en tareas definidas por la intención motriz. El objetivo de este artículo de posicionamiento es investigar el papel de la intención en la terminación del ejercicio y revelar la integración psicobiológica no lineal que se produce durante el esfuerzo fatigante. En base a resultados experimentales se concluye que el mecanismo responsable de la terminación es la disolución del atractor intencional, provocada por la inestabilidad creciente que se desarrolla en el eje neuromuscular con la fatiga. Ello apunta hacia la existencia de una integración psicobiológica dinámica y no lineal en la fatiga inducida por el ejercicio.

ABORDAGEM NÃO LINEAR AO PAPEL DA INTENÇÃO NO EXERCÍCIO INDUTOR DE FADIGA

PALAVRAS-CHAVE: Intenção, Fadiga, Conclusão, Dinâmica não-linear, Integração psicofisiológica.

RESUMO: A intenção tem um papel reconhecido na conclusão do exercício indutor de fadiga, contudo desconhece-se como interage com outros factores de origem fisiológica. O modelo de causalidade linear, aplicado às relações mente-corpo, não explica alguns dos fenómenos característicos relacionados com a conclusão de tarefas definidas pela intenção motora. O objectivo deste artigo é investigar o papel da intenção na conclusão do exercício e revelar a integração não-linear que se produz durante o esforço fatigante. Com base nos resultados experimentais obtidos conclui-se que o mecanismo responsável pela conclusão é a dissolução do atractor intencional, provocada pela instabilidade crescente que se desenvolve no eixo neuromuscular com a fadiga. Estas conclusões apontam para a existência de uma integração psicobiológica dinâmica e não-linear na fadiga induzida pelo exercício.





Referencias

- Azjickii, K. J., Gofman, J. y Freidin, J. V. (1972). Radio-electro-encephalographic field method for endurance scanning of athletes. En N. V. Zimkin (Ed.), *Physiological properties of and methods for determining endurance in sport* (pp. 159-163). Moskow: Fiskultura i Sport (en Ruso).
- Balagué, N., Hristovski, R. y Vázquez, P. (2010). Which kind of integration exists between the neuromuscular components during exercise-induced fatigue? En F. Korkusuz, H. Eratn y E. Tsolakidis (Eds.), *Proceedings of the 15th Congress of the European College of Sport Sciences* (pp. 283-284). Antalya: ECSS.
- Bardy, G. B., Oullier, O., Bootsma, R. J. y Stoffregen, T. A. (2002). Dynamics of human postural transitions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28(3), 499-514.
- Bechtel, W. (2009). Constructing a philosophy of science of cognitive science. *Topics in Cognitive Science*, 1, 548-569.
- Beckermann, A. (1992). Supervenience, emergence and reduction. En A. Beckermann, H. Flohr y J. Kim (Eds.), *Emergence or reduction? Essays on the prospects of nonreductive physicalism* (pp. 94-118). Berlin: Walter de Gruyter.
- Boonstra, T. V., Daffertshofer, A., van Ditzhuijzen, J. C., Van den Heuvel, M. R. C., Hofman, C., Willigenburg, N. W. y Beek, P. J. (2008). Fatigue-related changes in motor unit synchronization of quadriceps muscles within and across legs. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 18(5), 717-731.
- Buchanan, J. J., Kelso, J. A. S. y Fuchs, A. (1996). Coordination dynamics of trajectory formation. *Biological Cybernetics*, 74, 41-54.
- Chen, Y., Ding, M. y Kelso, J. A. S. (1997). Long memory processes ($1/f\beta$) type in human coordination. *Physical Review Letters*, 79, 4501-4504.
- Christakos, C. N., Papadimitriou, N.A. y Erimaki, S. (2005). Parallel neuronal mechanisms underlying physiological force tremor in steady muscle contractions of humans. *Journal of Neurophysiology*, 95, 53-66.
- Delignières, D., Lemoine, L. y Torre, K. (2004). Time intervals production in zapping and oscillatory motion. *Human Movement Science*, 23, 87-103.
- Delignières, D., Torre, K. y Lemoine, L. (2005). Methodological issues in the application of monofractal analysis in psychological and behavioral research. *Nonlinear Dynamics, Psychology and Life Sciences*, 9 (4), 435-461.
- Delignières, D., Torre, K. y Lemoine, L. (2008). Fractal models for event - based and dynamical timers. *Acta Psychologica*, 127, 382-397.
- Ding, M., Chen, Y. y Kelso, J. A. S. (2002). Statistical analysis of timing errors. *Brain and Cognition*, 48, 98-106.
- Edelman, G. (1998). Building a picture of the brain. *Daedalus*, 127, 68-89.
- Engström, D. A., Kelso, J. A. S. y Holroyd, T. (1996). Reaction-anticipation transitions in human perception-action patterns. *Human Movement Science*, 15, 809-832.
- Farrell, S., Wagenmakers, E.-J. y Ratcliff, R. (2006). $1/f$ noise in human cognition: Is it ubiquitous, and what does it mean? *Psychonomic Bulletin & Review*, 13, 737-741.
- Fuchs, A., Kelso, J. A. S. y Haken, H. (1992). Phase transitions in the human brain. Spatial mode dynamics. *International Journal of Bifurcations and Chaos*, 2, 451-482.





- Gandevia, S. C. (2001). Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiological Reviews*, 81, 1725–1789.
- Gilden, D. L. (2001). Cognitive emissions of $1/f$ noise. *Psychological Review*, 108, 33-56.
- Haken, H. (1983). *Synergetics, an introduction*. Springer Series on Synergetics, Vol.1, 3rd Ed., Berlin: Springer.
- Hristovski, R. y Balagué, N. (2010). Fatigue-induced spontaneous termination point - Nonequilibrium phase transitions and critical behavior in quasi-isometric exertion. *Human Movement Science*, 29, 483-493.
- Hristovski, R., Davids, K. y Araújo, D. (2006). Affordance-controlled bifurcations of action patterns in martial arts. *Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences*, 10(4), 409-444.
- Hristovski, R., Davids, K. y Araújo, D. (2009). Information for regulating action in sport: Metastability and emergence of tactical solutions under ecological constraints. En D. Araújo, H. Ripoll y M. Raab (Eds.), *Perspectives on cognition and action in sport* (43-57). Nueva York: Nova Science Publishers.
- Huang, C. T., Hwang, I. S., Huang, C. C. y Young, M. S. (2006). Exertion dependent alternations in force fluctuation and limb acceleration during sustained fatiguing contraction. *European Journal of Applied Physiology*, 97, 362-371.
- Hunter, S. K., Critchlow, A., Shin, I. S. y Enoka, R. M. (2004). Fatigability of the elbow flexor muscles for a sustained submaximal contraction is similar in men and women matched for strength. *Journal of Applied Physiology*, 96, 195-202.
- Hunter, S. K., Ryan, D. L., Ortega, J. D. y Enoka, R. M. (2002). Task differences with the same load torque alter the endurance time of submaximal fatiguing contractions in humans. *Journal of Neurophysiology*, 88, 3087-3096.
- Izhikevich, E. M. (2000). Neural excitability, spiking and bursting. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 10(6), 1171-1266.
- Jantzen, K. J., Oullier, O. y Kelso, J. A. S. (2008). Neuroimaging coordination dynamics in the sport sciences. *Methods*, 45, 325-335.
- Jeka, J. J., Kelso, J. A. S. y Kiemel, T. (1993) Spontaneous transitions and symmetry: Pattern dynamics in human four-limb coordination, *Human Movement Science*, 12, 627–651.
- Kello, C. T., Anderson, G. G., Holden, J. G. y Van Orden, G. C. (2008). The pervasiveness of $1/f$ β scaling in speech reflects the metastable basis of cognition. *Cognitive Science*, 32(7), 1217-1231.
- Kelso, J. A. S. (1984). Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. *American Journal of Physiology; Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 15, 1000-1004.
- Kelso, J. A. S. (1995). *Dynamic patterns. The self-organization of brain and behavior*. Cambridge: MIT Press.
- Kelso, J. A. S., Buchanan, J. J. y Wallace, S. (1991). Order parameters for the neural organization of single, multijoint limb movement patterns. *Experimental Brain Research*, 85, 432-444.
- Kelso, J. A. S. y Jeka, J. J. (1992). Symmetry breaking dynamics of human multilimb coordination. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18(3), 645-668.
- Lambert, E. V., St. Clair Gibson, A. y Noakes, T. D. (2005). Complex systems model of fatigue: Integrative homeostatic control of peripheral physiological systems during exercise in humans. *British Journal of Sports Medicine*, 39, 52-62.
- Lippold, O. (1981). The tremor in fatigue. En R. W. Porter (Ed.), *Human muscle fatigue* (pp. 234-248). London: Pitman Medical.





- Lorist, M. M., Kernel, D., Meijman, T. F. y Zijdwind, I. (2002). Motor fatigue and cognitive task performance in humans. *Journal of Physiology*, 545, 313-319.
- Maluf, K. S. y Enoka, R. M. (2005). Task failure during fatiguing contractions performed by humans. *Journal of Applied Physiology*, 99, 389-396.
- Nicolis, G. y Prigogine, I. (1977). *Self-organization in nonequilibrium systems. From dissipative structures to order through fluctuations*. Nueva York: John Wiley & Sons.
- Noakes, T. D., St Clair Gibson, A. y Lambert, E. V. (2005). From catastrophe to complexity: A novel model of integrative central neural regulation of effort and fatigue during exercise in humans. *British Journal of Sports Medicine*, 39, 120-124.
- Patashinskii, A. Z. y Pokrovskii, V. L. (1979). *Fluctuation theory of phase transitions*. Oxford: Pergamon.
- Rhodes, T. y Turvey, M. T. (2007). Human memory retrieval as Levy foraging. *Physica A*, 385, 255-260.
- Rudrof, T., Poston, B., Shin, I.-S., Møller, J. B. y Enoka, R. M. (2005). Net excitation of the motor unit pool varies with load type during fatiguing contractions. *Muscle Nerve*, 31, 78-87.
- Sologub, E. B., Kulagina, N. J. y Flores, A. P. (1972). Properties of functional structures in cortical areas of athletes enabling endurance performance. En N.V. Zimkin (Ed.), *Physiological properties of and methods for determining endurance in sport* (pp. 147-158). Moscow: Fiskultura i Sport (en Ruso).
- Stephen, D. G., Dixon, J. A. y Isenhower, R. W. (2009). Dynamics of representational change: Entropy, action, and cognition. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 35, 1811-1822.
- St. Clair Gibson, A., Baden, D. A., Lambert, M. I., Lambert, E. V., Harley, Y. X. R., Hampson, D., Russell, V. A. y Noakes, T. D. (2003). The conscious perception of the sensation of fatigue. *Sports Medicine*, 33(3), 167-176.
- St. Clair Gibson, A., Goedecke, J. H., Harley, Y. X., Myers, L. J., Lambert, M. I., Noakes, T. D. y Lambert, E. V. (2005). Metabolic setpoint control mechanisms in different physiological systems at rest and during exercise. *Journal of Theoretical Biology*, 236, 60-72.
- St. Clair Gibson, A. y Foster, C. (2007). The role of self-talk in the awareness of physiological state and physical performance. *Sports Medicine*, 37(12), 1029-44.
- Thompson, E. y Varela, F. J. (2001). Radical embodiment: Neural dynamics and consciousness. *Trends in Cognitive Sciences*, 5(10), 418-425.
- Torre, K. y Wagenmakers, E. J. (2009). Theories and models for $1/f\beta$ noise in human movement science. *Human Movement Science*, 28, 297-318.
- Torre, K., Delignières, D. y Lemoine, L. (2007). $1/f\beta$ fluctuations in bimanual coordination: an additional challenge for modeling. *Experimental Brain Research*, 183, 225-234.
- Vaillancourt, D. E. y Newell, K. M. (2003). Aging and the time and frequency structure of force output variability. *Journal of Applied Physiology*, 94, 903-912.
- Van Orden, G. C. y Holden, J. G. (2002). Intentional contents and self-control. *Ecological Psychology*, 14, 87-109.
- Van Orden, G. C., Holden, J. G. y Turvey, M. T. (2003). Self-organization of cognitive performance. *Journal of Experimental Psychology: General*, 132, 331-350.
- Van Orden, G. C., Holden, J. G. y Turvey, M. (2005). Human cognition and $1/f$ scaling. *Journal of Experimental Psychology: General*, 134, 117-123.





- Van Orden, G. C., Kloos, H. y Wallot, S. (2009). Living in the pink: Intentionality, well-being and complexity. En C. A. Hooker (Ed.), *Philosophy of complex systems. Handbook of the philosophy of science* (Vol. 10, pp. 639-682). Amsterdam: Elsevier.
- Weir, J. P., Beck, T. W., Cramer, J. T. y Housh, T. J. (2006). Is fatigue all in your head? A critical review of the central governor model. *British Journal of Sports Medicine*, 40, 573-586.
- Wilmore, J. H., Costill, D. L. y Kenney, L. W. (2008). *Physiology of sport and exercise* (4rth Ed.). UK: Human Kinetics.
- Wing, A., Daffertshofer, A. y Pressing, J. (2004). Multiple time scales in serial production of force: A tutorial on power spectral analysis of motor variability. *Human Movement Science*, 23, 569-590.
- Zanone, P. G. y Kelso, J. A. S. (1992). Evolution of behavioral attractors with learning: Nonequilibrium phase transitions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18(2), 403-421.

