

## La evolución de un concepto: El número de Froude y su aplicación al estudio de la marcha humana.

**Fusco, Mara Edith**<sup>1-2</sup>; **Edwards Molina, Diego**<sup>2-3</sup>; **Miralles, Mónica Teresita**<sup>1-4</sup>

[fuscomara89@gmail.com](mailto:fuscomara89@gmail.com); [diegojedwards@gmail.com](mailto:diegojedwards@gmail.com) ;  
[mmiralles@gmail.com](mailto:mmiralles@gmail.com)

<sup>1</sup>Universidad Católica Argentina Santa María de los Buenos Aires. Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias. Laboratorio de Biomecánica e Ingeniería para la Salud (LaBIS). CABA. Argentina;

<sup>2</sup>Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Haedo. Castelar, Argentina.

<sup>3</sup>Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ingeniería. CABA, Argentina.

<sup>4</sup>Universidad de Buenos Aires. Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo. Centro de Investigación en Diseño Industrial de Productos Complejos (CIDI). CABA Argentina.

Línea temática 1. Palabras, campo, marco  
(Conceptos y términos en la definición teórica de las investigaciones)

### Palabras clave

Número de Froude, Ciclo de la Marcha, Acelerometría, Adulto mayor, Riesgo de caída

### Resumen

El número de Froude es una palabra clave que designa a una magnitud adimensional utilizada en diferentes campos del conocimiento. Este concepto, originado en el contexto de la ingeniería naval del siglo XIX, expresa la relación entre las fuerzas

inerciales y las gravitatorias. El mismo es extensivo a todo aquello que se mueve sobre el planeta Tierra. Fue D'Arcy Thompson uno de los pioneros en relacionarlo con la locomoción animal y, en particular, con la bípeda.

El número de Froude, al tener en cuenta los efectos de tamaño, permite realizar predicciones sobre la velocidad, por ejemplo, si se conoce el valor del largo de zancada. Si se relaciona el gesto locomotor con el consumo de oxígeno se logra establecer relaciones entre diferentes poblaciones animales. También ha dado lugar a estudios más refinados a partir de los cuales se derivan nuevos conceptos, como el de aversión al riesgo (*risk aversion*), para explicar el inicio de la marcha humana en infantes. De este modo, el número de Froude entrelaza estrategias biomecánicas con el desarrollo neurológico. Desde entonces, el número de Froude es aplicable al amplio espectro de las alteraciones en la marcha debidas, tanto a disfunciones evolutivas, como las patológicas. Hoy se utiliza para estudiar la marcha en otros planetas con atracción gravitatoria diferente a la terrestre. En el campo de la robótica, animal o bípeda, es una de las herramientas teóricas más utilizadas para comparar patrones de movimiento de los futuros productos cibernéticos.

En este trabajo se presenta la evolución que ha tenido este concepto como herramienta heurística, derivada de la teoría de Semejanza Dinámica (pasaje de modelo a escala a prototipo) y se explora el potencial que tiene el número de Froude para el entendimiento de la locomoción bípeda actual.

Se presentan los resultados de su aplicación a la marcha humana, a partir del análisis de series temporales de acelerometría en tres ejes, medidas en personas voluntarias adultas mayores. Se discuten los resultados obtenidos.

## Introducción

Este trabajo revisa la evolución histórica del concepto “el número de Froude”, de ahora en adelante expresado como “Fr”. Ilustra un hecho singular en la historia de la ciencia y de la tecnología ya que, habiendo nacido a mediados del siglo XIX en el campo de la ingeniería naval, se ha convertido en el siglo XXI en el eje de las investigaciones de la locomoción bípeda espacial.

El hilo conductor a lo largo de este recorrido pasa por la capacidad de predecir la velocidad óptima, es decir, aquella asociada al menor costo energético, ya se trate de barcos, organismos biológicos, robots, o futuros humanos dispuestos a desplazarse en el espacio exterior. Nuestro interés está puesto en la relación del Fr con la marcha humana y, en particular, en los cambios progresivos que conducen hacia la marcha senil.

Para comprender la evolución del Fr se parte de la integración de tres campos teóricos fundamentales. El primero es el de la teoría de Semejanza Dinámica (Potter et al., (2002)), íntimamente ligado al de la ingeniería naval que le dio origen. El mismo permite pasar de la construcción y ensayo de modelos a escala, a futuros prototipos.

El segundo está ligado al campo del isomerismo y de la alometría (McMahon & Bonner, (1986)). Se apoyan en la hipótesis que cualquier rasgo de los organismos biológicos puede ser modelado y explicado matemáticamente, en particular, el cambio de la forma debido al crecimiento. Ello conduce, necesariamente, al planteo de la conservación (isomerismo) o no conservación (alometría), de la forma ligada al aumento del tamaño.

Finalmente, el tercer campo es el del control adaptativo (inteligencia artificial “IA” y sus ramas derivadas). Esta última conexión es natural dado que la locomoción bípeda modeló, no solo las estructuras anatómicas de los primates, sino que- fundamentalmente - desarrolló el complejo sistema de coordinaciones, de sinergias, que dio lugar a las singulares capacidades del *homo sapiens*, a su antigraavitatoria e inestable manera de caminar sobre el planeta, la cual está, discretamente captada por el Fr.

La síntesis de esta historia es el modelo de control alométrico, que nos permite hacer predicciones a partir de parámetros relacionados con el Fr, como lo son la dimensión fractal “D” o el “número de Hausdorff” (Hausdorff et al., (1995)).

El trabajo se estructura en dos partes: la primera consagrada a presentar al Fr, sus aplicaciones en diferentes contextos y, en particular, en el de la marcha humana. La segunda está dedicada a la presentación de resultados del grupo de investigación. Se presenta un estimador del Fr de personas voluntarias adultas mayores. El mismo surge del procesamiento de diferentes ciclos de marcha, mediante un modelo de reconocimiento y segmentación basado en la

forma de la señal (*Dynamic Time Warping*) (Gherzi et al., (2020), desarrollado por el grupo de investigación.

## Parte I: El número de Froude

### *El número de Froude y el Análisis Dimensional*

El número de Froude es un número adimensional, es decir, una expresión matemática que no tiene unidades. La más elemental es la expresión del factor de escala geométrica (el cociente entre dos longitudes), o bien, los ángulos expresados en radianes, o los coeficientes tabulados de rozamiento entre dos superficies lisas y secas, entre otras relaciones físicas bien conocidas. Es decir, son expresiones- sin dimensiones- que vinculan magnitudes físicas relevantes para un problema dado en forma tal que, la expresión final, es adimensional. El método para combinar las variables relevantes en forma de números adimensionales está dado por el Teorema PI de Buckingham (Potter et al., (2002)). La relación funcional entre los números adimensionales es fáctica, se logra a partir del ajuste de funciones matemáticas a los datos experimentales.

Este tipo de razonamiento se inicia con Galileo, quien se interrogó acerca del tamaño máximo que podían tener cualquier tipo de estructura, ya sea artificial o biológica.

La utilidad de los números adimensionales reposa, por un lado, en que definen umbrales cuantitativos de cambios de comportamiento cualitativos y, por el otro, permiten predecir el comportamiento cuando los sistemas son dinámicamente semejantes, como veremos a continuación.

### *Definición del número de Froude*

El Fr surgió para dar respuesta a cómo aumentar la velocidad del *Great Eastern*, el barco más grande en su tiempo. Es decir, un problema que involucraba escala de tamaño y de velocidad. A partir de estudios experimentales, en un canal hidráulico de 100m, Froude, usando maquetas a escala, logra definir el que fuera, luego, llamado “número de Froude” (Fr), expresado en la ecuación (1):

$$Fr = \frac{v^2}{Lg} \quad (1)$$

siendo v la velocidad, L una longitud característica del problema bajo estudio y g la aceleración de la gravedad. Froude se dio cuenta que la fuerza de arrastre debida a la producción de oleaje era la parte más importante del arrastre total del barco en la superficie y dependía de la constancia de la relación (1) entre modelo y prototipo.

Una forma alternativa del Fr es tomar la raíz cuadrada de la ecuación (1) -que sigue siendo adimensional- obteniendo, en este caso, la expresión de una velocidad adimensional ( $\beta$ ) dada por la ecuación (2):

$$\beta = Fr^{0,5} = \frac{v}{(Lg)^{0,5}} \quad (2)$$

donde ahora, la velocidad  $v$  está normalizada a una velocidad media o característica contenida en el denominador.

Esta velocidad adimensional es típicamente informada para robots bípedos activos como ASIMO ( $\beta = 0,17$ ) o el robot SD3X de Sony ( $\beta = 0,15$ ).

Es obvio destacar que, de la definición dada en (1), surge que el valor máximo que puede tomar el Fr es siempre  $Fr \leq 1$ . Ello puede verse al aplicar la ecuación (2) al caso donde la velocidad media,  $v$ , es estimada a partir de la longitud de la pierna,  $l$ , dividida por el periodo de un péndulo invertido ideal  $(l/g)^{0,5}$  (Bullimore & Donelan, (2008)). La longitud de la pierna,  $l$ , a su vez, se puede medir desde puntos anatómicos específicos siendo alrededor del 54% de la altura del sujeto.

#### *El número de Froude y la Semejanza Dinámica*

El poder predecir el valor de una variable dada en un prototipo, a partir del valor conocido de la misma en el modelo a escala, se fundamenta en la Teoría de Semejanza Dinámica (Potter et al., (2002)). La misma refiere a garantizar que el cociente de cualquier fuerza dada sobre un elemento de fluido, entre modelo y prototipo, deberá ser igual a una misma constante para todos los cocientes de las diferentes fuerzas actuantes (de presión, inerciales, gravitatorias o viscosas).

Por su parte, los cocientes de cada tipo de fuerza por unidad de volumen están asociados a un número adimensional bien conocido. En el caso particular del Fr se trata del cociente entre la fuerza de atracción gravitatoria y la fuerza de inercia. Es decir, el Fr se deduce directamente del cociente de las dimensiones de ambas fuerzas:  $\rho l^3 / \rho l^2 = v^2 / \rho g$ .

Este número, así enmarcado dentro de la Teoría de Semejanza, dio lugar a la llamada "Ley de Froude". Esta ley establece que la constancia del Fr entre el modelo y el prototipo asegura un comportamiento dinámico equivalente.

Para pasar de los barcos a los seres vivos, el problema de la velocidad y de la escala de tamaño, requería relacionar al Fr con el cambio de forma a medida que el organismo aumenta o disminuye de tamaño.

#### *El número de Froude y la Teoría Alométrica*

Huxley en 1932 estudió las diferencias de tamaño presentes en la biología (Huxley, 1972). Se interesó, de manera particular, en el cambio de forma a medida que el organismo acrecienta su tamaño. Estas observaciones dieron origen a los conceptos de isomerismo y de alometría, es decir, a la conservación o no, de la forma a medida que cambia la escala de tamaño del organismo.

Asumió, a partir de los resultados experimentales de comparar variables dinámicas “Y vs. X” la relación alométrica general dada por la ecuación (3):

$$Y = a X^b \quad (3)$$

donde  $a$  y  $b$  son parámetros experimentales que se pueden determinar a partir de la recta obtenida cuando se grafica el logaritmo de la expresión anterior. El parámetro “ $a$ ” se puede hallar a partir de la ordenada al origen, y el “ $b$ ” de la pendiente de la recta. Por ejemplo, “Y” puede ser el consumo de oxígeno por unidad de masa y “X” la masa corporal del organismo.

La marcha bípeda es un logro de la evolución biológica describable por un patrón locomotor común a un elevado número de especies, dentro de un amplio rango de escalas de tamaño. Por lo tanto, la teoría alométrica fue la herramienta utilizada para comparar las diferentes velocidades de vuelo, de carrera o de natación, como también el comportamiento de la velocidad, o de la frecuencia de aleteo o de pasos con relación a la masa de los diferentes organismos, sin tener en cuenta el número de patas o de marchas, e investigar los efectos de diferentes tamaños corporales sobre la mecánica del movimiento.

Dado que todo movimiento requiere energía, esta magnitud también se relaciona con el Fr como veremos a continuación.

#### *El número de Froude y la energía mecánica*

El Fr puede deducirse del cociente entre la energía cinética y la potencial gravitatoria del centro de masa corporal (CM), como se expresa en la ecuación (4):

$$Fr = \frac{1/2 m v^2}{mgh} \quad (4)$$

donde, en este caso, “h” es la altura asociada a la altura del CM (usualmente estimada como el largo de pierna o la altura de la cadera).

La energía de la marcha se puede pensar como la suma de dos trabajos: un trabajo mecánico asociado a la variación de la energía cinética ( $W_f$ ) y un trabajo mecánico ( $W_v$ ), asociado a la variación de la energía potencial gravitatoria. Se

define el índice R de recuperación de la energía mecánica, dado por la ecuación (5), como:

$$R = \frac{W_f + W_v - W_{CM}}{W_f + W_v} \quad (5)$$

Este índice representa un parámetro de recuperación de la energía mecánica respecto a la variación total de energía mecánica del CM ( $W_{CM}$ ) (es decir, marca la diferencia con un péndulo ideal donde  $W_{CM} = 0J$  y  $R = 1$ ).

La velocidad óptima para caminar (recuperación del 63% de la energía cuando se comparan pigmeos, niños, enanos, adultos caucásicos) (Cavagna et al., (1998), (2000)) es del orden de 1,5 m/s (5,5 km/h). Es decir, corresponde al valor del Fr igual a 0,25. A esta velocidad el costo de transportar la masa es minimizado y las fluctuaciones entre la energía cinética y potencial gravitatoria son similares, es decir, tiene lugar el máximo intercambio de energía según el modelo de péndulo invertido.

Desde los años noventa se sabe que el costo energético es fundamentalmente diferente para caminar que para correr. Para correr, el costo energético está determinado por el costo de generar la fuerza muscular para soportar el peso del cuerpo, que es mayor que para caminar (Farley & McMahon, (1992)).

El costo energético de ambos tipos de marcha no es el mismo. Si a ello se suman cambios en el valor de g, las fluctuaciones de la energía potencial se verán afectadas, a diferencia de las fluctuaciones en la velocidad. Es decir, el péndulo se vuelve ineficiente y debe ser compensado por las fuerzas musculares.

#### *El número de Froude y la marcha humana*

La primera conexión de la locomoción con el Fr la realiza D' Arcy Thompson a mediados del siglo XIX (Thompson, (1917)). Convencido de que las criaturas vivientes se podían comprender adecuadamente en términos matemáticos comienza a pensar a la marcha bípeda como un movimiento pendular del CM, situado alrededor de la segunda vértebra lumbar. Pero, al mismo tiempo, advierte el problema del cambio de escala. Como cualquier objeto natural o artificial, los seres vivientes están sometidos a los efectos de la gravedad, siendo el par de interacción sobre cualquier objeto, el peso, producto de la masa por la gravedad. Pero la masa, a su vez, es el producto de la densidad ( $\rho$ ) por el volumen y éste último es quien introduce la escala dimensional ( $L^3$ ). Es decir, establece la conexión entre el Fr, la semejanza dinámica y la teoría alométrica.

Las consecuencias predictivas del Fr ligados a la marcha son múltiples (Vaughan & Malley, (2005)). El Fr ha sido utilizado para el estudio de la marcha en diversas patologías tales como parálisis cerebral o el enanismo.

En robótica, el Fr es un criterio central ligado a la discusión en el diseño de robots, tanto de marcha pasiva, como de marcha activa. Es decir, aquellos robots en que el CM cae dentro -o fuera- de la base de sustentación, respectivamente.

La importancia del estudio de la marcha es creciente, ya que las alteraciones en la marcha son predictoras de la aparición de cambios cognitivos (cambios degenerativos leves o de demencia)) (Waite et al., (2005)) y, por lo tanto, del riesgo de caídas en adultos mayores (Alexandre & Hausdorff, (2008)).

#### *El ciclo de marcha y el número de Froude*

El patrón de marcha bípeda se describe mediante el ciclo de la marcha, el cual, en el caso de la marcha humana, se subdivide en dos fases. La primera conocida como fase de apoyo, ocupa -en promedio- el 60 % del tiempo del ciclo, describe el apoyo de la pierna que inicia el movimiento para luego pasar a la fase de vuelo, o de no apoyo, que ocupa el 40 % del tiempo restante. Dentro de cada una de ellas se pueden considerar subfases definidas por eventos biomecánicos específicos (cuatro para la fase de apoyo y tres para la de vuelo) (Perri, (1992); Whittle, (2007)). Estas subdivisiones hablan del nivel de detalle con que se estudia el gesto durante el tiempo del ciclo.

A ello se suma la descripción del movimiento desde los tres planos espaciales, a partir de señales obtenidas mediante sensores fijados a puntos anatómicos específicos (Tao et al., (2012)) (tobillos, rodilla, cadera). Esta instrumentación permite estudiar, en detalle, el correspondiente movimiento articular y demás aspectos de la cinética y cinemática de la marcha.

El grupo de investigación ha desarrollado algoritmos de segmentación propios para segmentar los ciclos de las series temporales dadas por los diferentes sensores y, de este modo, poder analizar la variabilidad de la marcha en el adulto mayor (Gherzi et al., (2020)).

#### *De la hipótesis de similitud dinámica a la hipótesis de similitud del control dinámico.*

La integración de los números adimensionales a la Teoría de Semejanza Dinámica y la conexión con la alometría nos permiten, en el caso del Fr, reescribir la ecuación (3) para obtener la ecuación (6):

$$Y = l/L = 2 Fr^{0,4} \quad (6)$$

donde las variables X e Y se vuelven, ahora, números adimensionales. En particular la variable Y expresa la relación de escala de la longitud de la pierna, l, a la de la zancada, L, y la variable X coincide con el Fr. En este caso, los parámetros a y b, determinados experimentalmente para marcha normal de sujetos saludables, son 2 y 0,4, respectivamente.

La hipótesis de similitud del control dinámico considera la marcha en términos de un sistema retroalimentado de múltiples lazos, donde la salida se reconecta a las diversas entradas, las cuales son el córtex motor, ganglio basal y cerebelo, además de las realimentaciones del sistema vestibular, visual y propioceptivo. Es, precisamente, en la integración de todas esas realimentaciones, donde están embebidas las leyes de escala, es decir, en el acomodar todas las entradas realimentadas a una salida única, en tiempo real.

Desde esta mirada, la regulación que permite adaptar la marcha a entornos cambiantes se relaciona con las correlaciones de las fluctuaciones en el intervalo temporal de la zancada. Estas fluctuaciones requieren analizar escalas de tiempo cortas y largas. Es decir, la marcha humana se enmarca en la teoría de los sistemas caóticos (Lewis et al., (1992)).

#### *Predicciones y número de Froude*

Las predicciones derivadas del Fr son, en muchos casos, sorprendentes y únicas. Se trata de una forma de razonamiento que permite resultados imposibles de lograr por otras vías. A continuación, se citan tres hallazgos que ilustran el alto potencial predictivo de este enfoque:

##### a) Predicción de la velocidad de los dinosaurios bípedos mesozoicos

En los años 70, Robert McNeill Alexandre va a lograr estimar la velocidad de los dinosaurios mesozoicos usando el Fr, gracias al hallazgo de huellas que permitieron medir la longitud de la zancada (L) y de restos fósiles que sirvieron para determinar la altura de la cadera (H), de los saurios bípedos (Alexandre, (1991)).

Graficando el adimensional  $L/h$ , formado por el cociente de la longitud de la zancada "L", sobre la altura de pelvis "h" de todos los animales conocidos *versus* el Fr correspondiente, obtuvo una curva de calibración. Ésta le permitió, a partir de la relación adimensional homóloga (L/H) obtenida con los datos de los dinosaurios, hallar el Fr para la marcha de los mismos. Pudo deducir, entonces, una velocidad de 11m/s para los dinosaurios saurisquios, como el *T-Rex*.

##### b) Ley de neuromaduración para la locomoción humana

El cambio en la estrategia motora asociada con la edad de los niños se puede expresar en término de la velocidad adimensional  $\beta$ , como se muestra en la ecuación (7):

$$\beta(t) = 0,45 (1 - e^{-0,05t}) \quad (7)$$

donde  $t$  es la edad del niño en meses, 0,45 es el valor de  $\beta$  para el adulto y 0,05 es el coeficiente de crecimiento.

Para ver la relación con el  $Fr$ , la velocidad adimensional definida en (7), se iguala, a su vez, a otra velocidad adimensionalizada, derivada de la velocidad media de un ciclo de marcha.

La velocidad media del ciclo se puede expresar (ver ecuación (8)) como el producto de la longitud de la zancada ( $L$ ) por la frecuencia del ciclo de marcha, ( $f$ ) cuyas unidades son el número de pasos por unidad de tiempo.

$$v = L \times f \quad (8)$$

Por su parte la longitud de zancada ( $L$ ) se puede normalizar con el largo de pierna ( $l$ ) dando lugar al adimensional expresado en la ecuación (9):

$$\lambda = (L/l) \quad (9)$$

La frecuencia ( $f$ ) se puede normalizar, a su vez, dando lugar a la frecuencia adimensional  $\varphi$ , dada en la ecuación. (10), mediante la expresión  $(g/l)^{0,5}$  (deducida del periodo del modelo pendular).

$$\varphi = f/(g/l)^{0,5} \quad (10)$$

Luego, la velocidad de la ecuación (7) se puede expresar como la dada en la ecuación (11):

$$\beta = \lambda \times \varphi = (Fr)^{0,5} \quad (11)$$

Es decir, la raíz cuadrada del  $Fr$  es un parámetro para medir la maduración motora de los infantes. Su valor es de 0,27 a los 18 meses, creciendo abruptamente hasta el valor de 0,45, a los 70 meses, para, luego, permanecer constante.

c) El número de Froude y la marcha en otros entornos gravitatorios

A partir de las observaciones y de las huellas humanas dejadas por las misiones Apollo, quedó claro que el patrón de marcha es alterado en ingravidez. Ello se debe a que, durante la marcha, el cuerpo usa la gravedad para caer hacia adelante en cada paso, siendo la velocidad de avance la que

permite restaurar la altura inicial del CM, como lo hace cualquier mecanismo pendular.

La velocidad de marcha en cualquier planeta se puede predecir a partir del Fr apelando a la semejanza dinámica, e igualando el Fr en la Tierra con el correspondiente al planeta en cuestión. Si se asume una longitud de pierna constante, la velocidad óptima de marcha en el planeta está dada por la ecuación (12):

$$v_{planeta} = v_{Tierra} \left[ \frac{g_{planeta}}{g_{Tierra}} \right]^{0,5} \quad (12)$$

Es decir, la velocidad óptima de marcha en el planeta de interés será proporcional a aquella en el planeta Tierra, pero ponderada por un coeficiente que depende del cociente de las aceleraciones elevado a la potencia 0,5. La ecuación (12) deja en claro que la velocidad de marcha, en cualquier planeta de menor gravedad que la Tierra, será menor que en ésta.

Lo novedoso es que, en experimentos realizados en entornos de hipergravedad (por ej. orbitas parabólicas en el A300 Airbus) y en cortos periodos de tiempo, se midieron valores para el Fr que dan lugar a intervalos para la velocidad óptima de marcha más amplios que en la Tierra. Este hecho sugiere que, si aumenta la gravedad se incrementara, a su vez, el rango de velocidades de marcha óptimas posibles.

La ecuación (12) afirma que la energía invertida para caminar por ej. en Marte ( $g_{Marte} = 1/3 g$ ) será más baja que la requerida para la misma distancia en la Tierra.

#### *El número de Froude y la transición de caminar a correr*

El Fr también puede ser visto como un parámetro que permite definir un umbral a partir del cual se producen cambios cualitativos de la marcha. El Fr para la transición de caminar a correr ( $Fr^*$ ), en bípedos o cuadrúpedos en cualquier planeta, se da cuando el valor de  $Fr^*$  es igual a 0,5 (Alexander, (1989); (Minetti, (2001)). Este hecho condiciona la biomecánica y toda la actividad extravehicular (AEV) de la exploración espacial. Ello se debe a que correr en planetas de menor gravedad ( $<0,5g$ ) representa un gasto energético menor a caminar.

Este fenómeno impacta directamente en el diseño de los trajes espaciales ya que modifican, en diferentes formas, el costo metabólico de caminar o de correr (Carr & McGee, (2009)). En la Luna, un nuevo tipo de gesto locomotor se compone de pequeños saltos y se llama "loping". Es una especie de salto, pero sin el mismo intercambio del pie de soporte con el piso. Es decir, las fuerzas de reacción son diferentes a aquellas del ciclo de la marcha en la Tierra.

Para estudiar la transición de la marcha a la carrera, en relación con los trajes espaciales, se ha definido el número adimensional llamado número de Apollo ( $A_p$ ). Este número captura el efecto de la gravedad y el del traje espacial de autosuficiencia. Como puede verse en la ecuación (13), el  $A_p$  es igual al  $Fr$  dividido por un factor  $M$ :

$$A_p = \frac{v^2}{LgM} = \frac{Fr}{M} \quad (13)$$

siendo  $M$  la masa efectiva sobre la masa total transportada (hombre + traje). Es decir, el traje espacial reduce el  $Fr^*$  en un factor  $1/M$ . Si no hay traje  $M=1$  y  $A_p = Fr$ . O sea, el valor del  $Fr^*$  con traje es menor que el  $Fr^*$  sin traje. Los cambios en la presión del traje espacial, o en su masa, o la adición de carga mediante exoesqueletos, puede cambiar la velocidad de transición en entornos de diferente gravedad. Esta observación es interesante para el diseño de diferentes dispositivos de asistencia técnica y de rehabilitación que también pueden ser usados en la tierra.

El consumo energético aumenta con el transporte de carga agregada al peso, tanto para caminar como para correr. Cuando una persona carga un peso equivalente al 40 % del propio, ya sea caminando o corriendo, el consumo de energía aumenta un 40%. Pero, para un entorno con gravedad inferior a la terrestre, el costo energético es significativamente menor (por lo menos en un factor de 2, para correr con carga, respecto a caminar con la misma carga (Farley & McMahon, (1992)). Ello se debe a que el costo metabólico de correr está asociado, a su vez, con el costo para generar la fuerza muscular necesaria para soportar el peso del cuerpo, costo que desciende con la disminución del valor de la gravedad.

Hasta aquí se han presentado los hitos más relevantes por lo que ha transitado el  $Fr$  y su creciente potencial para el entendimiento de la locomoción bípeda actual, tanto en la Tierra, como en la exploración espacial.

A continuación, se presenta una serie de resultados que ilustran y aportan datos experimentales.

## **Parte 2: El estudio experimental de la marcha y el número de Froude**

A partir de las mediciones realizadas en 2012, junto a kinesiólogos y neurólogos de la Unidad Asistencial Dr. César Milstein, se recolectaron en el marco de las evaluaciones de balance con el test de Tinetti (Köpke & Meyer, (2006)) y *Get up and go* (ETGUG test) (Wall et al., (2000)) los datos de marcha (4m ida y 4m vuelta) de 42 pacientes adultos mayores, con riesgo de caída, con trastornos vestibulares. La adquisición se realizó con un dispositivo ambulatorio desarrollado por el grupo de investigación, (Miralles & Gherzi,

(2016)). El mismo permitió la adquisición de las señales de aceleración en los tres ejes (anteroposterior (AP), medio-lateral (ML) y vertical (VE)).

La variabilidad del ciclo de la marcha es una de las características distintivas de este tipo de pacientes. Un algoritmo de segmentación del ciclo de marcha, basado en la forma de la señal (*Dynamic Time Warping*) se desarrolló con una sensibilidad del 99.95% (Gherzi et al., (2020)).

La figura 1 muestra la captura de pantalla del procesamiento de la señal para un paciente adulto mayor. A la izquierda -de arriba hacia abajo- las tres señales de aceleración Anteroposterior ( $a_{AP}$ ), Vertical ( $a_{VE}$ ) y Medio- Lateral ( $a_{ML}$ ) en función del tiempo. El gráfico de la derecha-arriba muestra el ciclo de marcha promedio y los desvíos en gris. El algoritmo permite seleccionar las direcciones AP, VE o ML para ejecutar este análisis sobre los tres ejes. La tabla de la derecha-abajo muestra variables temporales y de análisis que pueden resultar de interés, como período de ciclo, simetría de pasos (diferencia de tiempos de paso), amplitud promedio del paso, número de ciclos de marcha y de eventos de marcha optimizados.

El ciclo de marcha completo consiste en dos pasos consecutivos, empezando con el contacto inicial de un pie (IC), el cual marca el comienzo de la fase de apoyo. Esta fase finaliza con el “contacto final” del mismo pie (aproximadamente 60% del ciclo) y el 40% restante se corresponde con la fase de vuelo de la pierna de referencia, terminando con un nuevo IC.

**Figura 1: Captura de pantalla del algoritmo de segmentación de ciclo de marcha basado en la forma de la señal (ver el texto)**

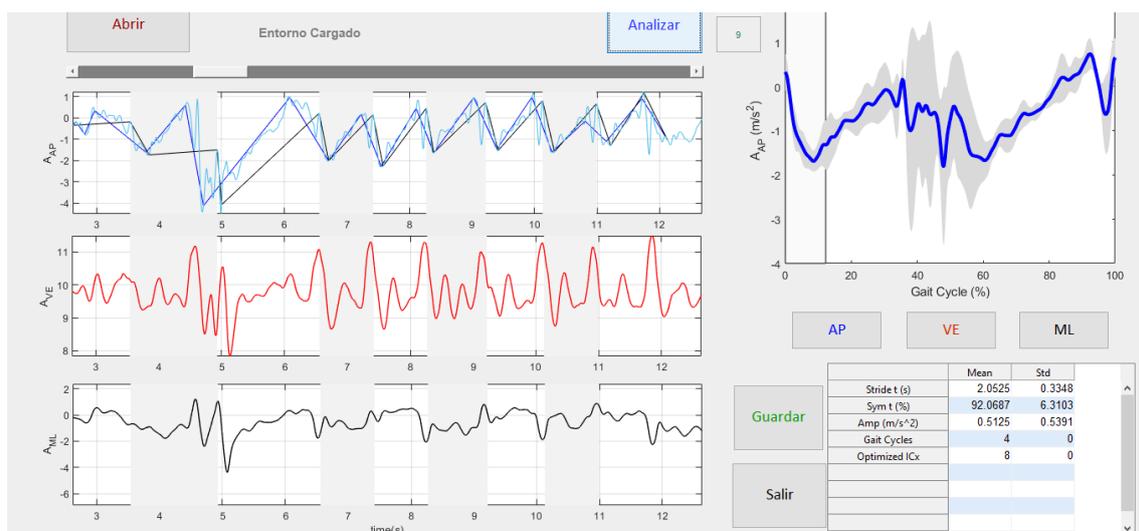


Imagen de los autores. Procedencia LaBIS-UCA.

Dado que se trata de señales de aceleración, para hallar el Fr es necesario obtener la velocidad integrando la señal anterior en el tiempo. Esta operación no suele dar buenos resultados debido a que el eje AP de los acelerómetros no están perfectamente alineados con el eje horizontal. Ello se debe a que no se suele calibrar con la persona en reposo antes de iniciar la marcha, y conocer el nivel de “cero” en cada eje del acelerómetro (Wiebren & Hof, (2003)). Por otro lado, el acelerómetro podría girar durante la marcha y, sin giroscopio u otros sensores que midan rotaciones, no se puede discriminar ese movimiento involuntario. Si a lo anterior se suma el inevitable ruido de la señal -aún bien filtrada-, calcular la integral para obtener la velocidad de la marcha, no es aconsejable (Shin & Park, (2011)).

Por lo tanto, se presenta una estimación del número de Fr a partir del adimensional obtenido de normalizar la aceleración media del ciclo al valor de la gravedad.

Con el algoritmo desarrollado se pudo obtener el Fr estimado como:

$$Fr = \frac{a}{g} \quad (14)$$

Donde “a” es la aceleración media del ciclo promedio, y “g” la aceleración de la gravedad.

**Figura 2. Captura de pantalla de un ciclo medio de marcha ( $a_{AP}$  vs porcentaje de ciclo)**

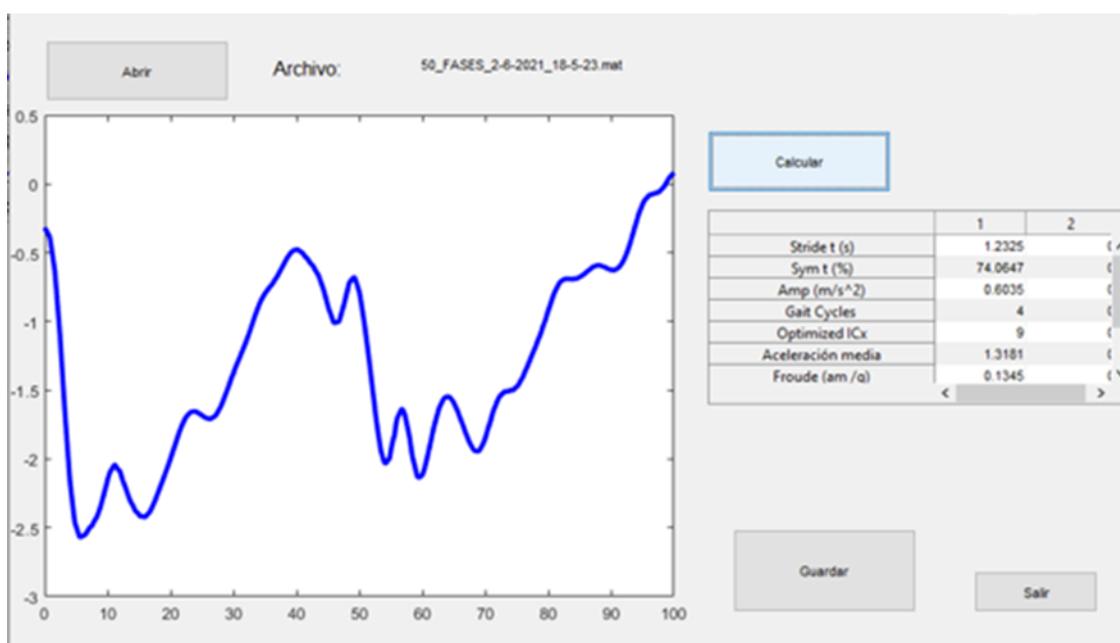


Imagen de los autores. Procedencia LaBIS-UCA.

Como se muestra en la Figura 2 el valor medio del Fr obtenido para los 52 pacientes fue de 0,14, es decir, un 56% menor que el estimado para sujetos sanos y jóvenes, que es igual a 0,25. El tiempo medio del ciclo fue de 1,51s y la aceleración media de 1,35 m/s<sup>2</sup>.

Los pacientes vestibulares pueden tener una afección mayor en el eje ML y, sobre todo, en el evento de contacto inicial. La entrada vestibular es más importante en la fase de estancia del ciclo, cuando la trayectoria para el próximo paso está siendo planificada.

La Figura 3 muestra el comportamiento para un paciente adulto mayor (77 años), recuperado de un accidente cerebro vascular (ACV), con riesgo de caída.

**Figura 3: Captura de pantalla de un ciclo medio de marcha (a<sub>AP</sub> vs porcentaje de ciclo) para adulto recuperado de un ACV**

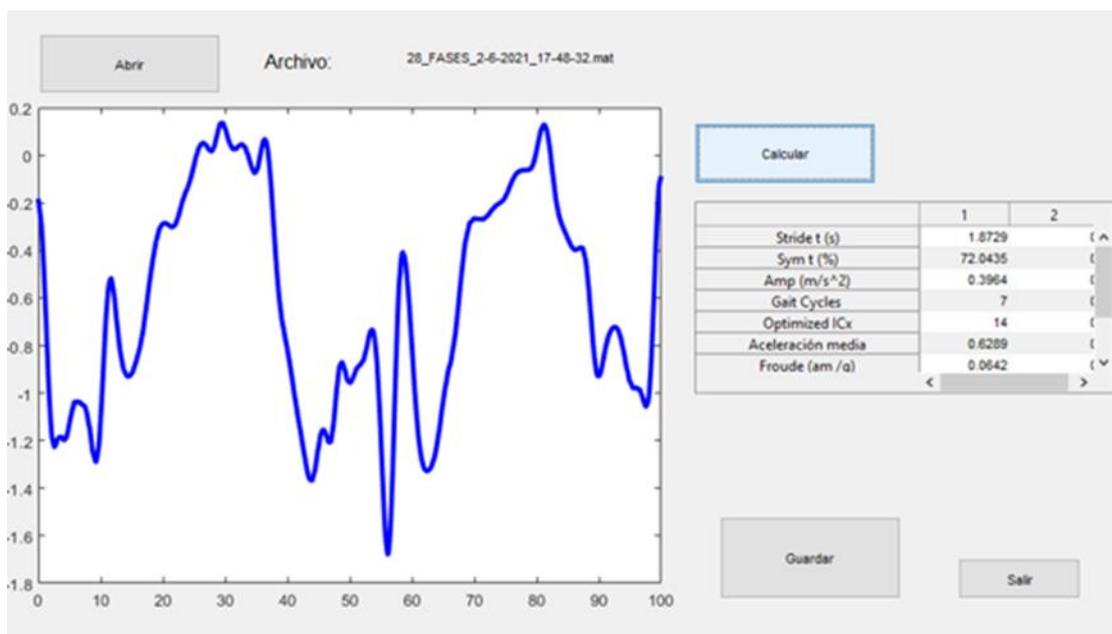


Imagen de los autores. Procedencia LaBIS-UCA.

Como puede verse, las mayores aceleraciones se dan entre el 20 y 40% del ciclo y entre el 70 y 90 %. En el primer caso, corresponde a la "terminal stance" o fase terminal de apoyo (tercera subfase de la fase de apoyo) que se inicia cuando el talón se eleva y continua hasta que el otro pie golpea el piso. El peso corporal cae por delante del antepié. Se trata de lograr la estabilidad de los segmentos y del tronco y la progresión del cuerpo, más allá del pie de soporte.

Por otra parte, el segundo pico de la aceleración corresponde a la subfase de “*mid swing*”, es decir, al segundo tercio de la fase de vuelo. Comienza cuando el pie oscilando, es el opuesto a la pierna de apoyo. La fase termina cuando la pierna, que está en vuelo, va hacia adelante y la tibia alcanza la posición vertical.

### **Discusión de los resultados**

Con el método propuesto, en todos los casos estudiados, se puede hallar un patrón del estimador del Fr, para cada paciente, mediante la aceleración media del ciclo promedio de marcha, normalizada a g. Puede verse que, a medida que la edad avanza, el valor estimado del Fr cae severamente siguiendo el comportamiento esperado de la velocidad media de marcha con el aumento de edad de los sujetos (Enoka, (2015)). Las características del patrón, junto al estudio biomecánico de la marcha, son alentadoras ya que pueden dar rasgos comunes que pueden ser asociados con diferentes patologías.

La discapacidad cognitiva está asociada a los desórdenes de balance, a los de la marcha y al riesgo de caída. La demencia, como la enfermedad de Alzheimer (AD), se asocia con marchas más lentas y aumento de la variabilidad paso a paso, oscilación postural más amplia, disminución en la capacidad de mantener la postura estable ante cualquier perturbación (tal como reducir la base de apoyo) y menor puntaje en las pruebas de balance. Los pacientes con AD depositan su pie muy cerca del obstáculo después de atravesarlo y tienen mayor probabilidad de contactar con un obstáculo en su camino. Todos estos comportamientos conducen a un aumento del riesgo de caída. Un tercio de estos pacientes cuenta con una historia de caídas antes que se diagnostique la enfermedad. Por lo tanto, poder tener índices que permitan un mejor seguimiento del adulto mayor y predecir el riesgo de caída, como las fases preliminares de cualquier futura demencia, está dentro de los grandes desafíos del siglo definidos por la OMS como prioritarios.

### **Conclusiones**

En este trabajo se han revisado los hitos histórico-científicos del número de *Froude*, en particular, aquellos ligados a la locomoción y al ciclo de la marcha humana. Ello se debe a la creciente conexión entre las deficiencias motoras, observadas en la marcha y el equilibrio, con las deficiencias cognitivas (leves o de demencia como la enfermedad de Alzheimer). El Fr es un parámetro fundamental a tener en cuenta en el estudio de la marcha, tanto en la Tierra como en otros planetas. Recolectar datos de la marcha en relación con el Fr es uno de los proyectos fundamentales de la Misión Artemis III de la NASA (Ma & Zhang, (2020)) y de toda la infraestructura espacial y, en particular, del diseño de los trajes espaciales (Carr & McGee, (2009)). Por su parte, todos estos hallazgos suelen dar lugar a diseños e innovaciones de diversos dispositivos

de asistencia técnica para adultos mayores o con discapacidad. Los estudios realizados son consistentes con los valores dados en la bibliografía, permitiendo, a partir de una estadística creciente, poder definir criterios que puedan orientar la evaluación clínica de adultos mayores con riesgo de caída.

### **Agradecimientos**

Esta investigación ha sido financiada parcialmente por a) el Proyecto interdisciplinario No. 20620190100005BA con subsidio de la Programación Científica (UBA) 2020-2022 y b) del financiamiento otorgado por la Pontificia Universidad Católica Argentina, Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias, en el marco del Proyecto Modelos Biomecánicos del LaBIS-UCA.

---

## Bibliografía

- Alexandre, N. B. & Hausdorff, J. (2008). Linking Thinking, Walking and Falling. *Journal of Gerontology: Medical sciences*, vol 63A, (12), 1325-1328.
- Alexander, R. M. (1991). How dinosaurs ran. *Scientific American*, vol. 264, (4), 130-137.
- Alexandre, R. M. (1989). Optimization and Gaits in the Locomotion of Vertebrates. *Physiological Review*, vol. 69, (4), 1199-1227.
- Bullimore, S. R. & Donelan, J. M. (2008). Criteria for dynamic similarity in bouncing gaits. *Journal of Theoretical Biology* 250: 339–348
- Carr, CH. & McGee. (2009). The apollo number: space suits, self-support and the walk-run transition. *PLoS One*, Vol. 4, (8), e6614.
- Cavagna, G, Willems, P. A & Heglund, N. G. (1998). Walking on mars. *Nature*. Vol 393: 636-638.
- Cavagna, G. A., Willems, P. A. & Heglund, N. C. (2000). The role of gravity in human walking: pendular energy exchange, external work and optimal speed. *Journal of Physiology* 528, (3), 657-668.
- Enoka, R. M. (2015). *Neuromechanics of human movement*. 5<sup>TH</sup> Edition. Champaign: Human Kinetics.
- Farley, C.T. & McMahon, T. A. (1992). Energetics of walking and running insights from simulated reduced-gravity experiments. *Journal of Applied Physiology*, 73, 2709–2712.
- Gherzi, I., Ferrando, M. H., Fliger, C. G; Castro Arenas, Ch. F; Edwards Molina, D. & Miralles, M. T. (2020). Gait-cycle segmentation method based on lower-trunk acceleration signals and dynamic time warping. *Medical Engineering and Physics*, Vol. 82, 70-77.
- Hausdorff, J. M., Peng, C-K, Ladin, Z., Wei, J. Y. & Goldenberg, A. L. (1995). Is walking a random walk? Evidence for Long-range correlations in Stride Interval of Human Gait. *J. Appl. Physiol.* 7, 349-58.
- Huxley J. (1972). *Problems of relative growth*, Dover Publications Inc.
- Köpke, S. & Meyer, G. (2006). The Tinetti test Babylon in geriatric assessment, *Z Gerontol Geriat*. Vol. 39, (39), 288–91.

Lewis, A., Lipsitz, A. & Goldberger, L. (1992). Loss of 'Complexity' and Aging Potential Applications of Fractals and Chaos Theory to Senescence. *JAMA* vol 267, (13),1806-1809.

Ma, O. & Zhang, L. (2020). Study of the Froude Number for Human Locomotion in Space environment. *Science Definition Team for Artemis*.

McMahon, T. & Bonner J. T. (1986). *Tamaño y vida*. Barcelona. Biblioteca Scientific American. Prensa Científica. Editorial Labor.

Minetti, A. (2001). Walking on other planets. *Nature* 409, 467–469.

Miralles, M. T. & Ghersi, I. (2016). Muscular and skeletal systems in: *Further understanding of the human machine*. World Scientific: 2015, (42), 310-316.

Perri, J. (1992). *Gait analysis*. SLACK Inc.

Potter, M., Wiggert, D. C., Hondzo, M. & Shih, T. I. (2002). Capítulo 6: Análisis dimensional y similitud. En *Mecánica de Fluidos*, 209-239. México. Thomson Editores.

Shin, S.H. & Park, Ch. G. (2011). Adaptive step length estimation algorithm using optimal parameters and movement status awareness. *Medical Engineering & Physics*, 1064–1071.

Tao, W., Liu, T., Zheng, R. & Feng, H. (2012). Gait Analysis Using Wearable Sensors. *Sensors* 12. doi:10.3390/s120202255.

Thompson, D. W. (1917). *On growth and form*. Cambridge: Cambridge University Press.

Vaughan, CH. L., Langerak, N. G. & O'Malley, M. J. (2003). Neuromaturation of human locomotion revealed by non-dimensional scaling. *Exp. Brain Res.* 153,123–127.

Vaughan, CH. L. & Malley, M. J. (2005). Froude and the contribution of naval architecture to our understanding of bipedal locomotion. *Gait and Posture* 21, 350-365.

Waite, L. M. W., Grayson, D. A., Piguetc, O., Creaseya, H., Bennetc, H. P. & Broec, G. A. (2005). Gait slowing as a predictor of incident dementia: 6-year longitudinal data from the Sydney Older Persons Study. *Journal of the Neurological Sciences*, 229–230, 89–93.

Wall, J. C., Bell, CH., Campbell, S. & Davis, J. (2000). The timed get-up-and-go test revisited, Measurement of the component tasks. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, Vol: 37, 109-114.

Whittle, M. (2007). *Gait Analysis: an Introduction*. Oxford: Butterworth-Heinemann.

Zijlstra, W. & Hof, A. L. (2003). Assessment of spatio-temporal gait parameters from trunk accelerations during human walking. *Gait & Posture*, Vol. 18, (2), 1-10.