

La segunda ley de Newton y una oportunidad desperdiciada

H.G. Valqui*

Resumen

Algunos autores suponen que la Segunda Ley de Newton, SLN, se reduce a la fórmula $\mathbf{F} = m \mathbf{a}$, donde m es la masa de un cuerpo puntual, \mathbf{F} es la resultante de las fuerzas aplicadas a tal partícula, y \mathbf{a} es la aceleración adquirida por dicha partícula.

Pero, cuando los estudiantes trabajan en el laboratorio para verificar la validez de la SLN no lo hacen con un cuerpo puntual. Por otra parte, en general, tampoco tiene sentido referirse a la aceleración de un cuerpo no puntual.

Abstract

Some people like to think that Newton's Second Law reduces to $\mathbf{F} = m \mathbf{a}$, where m is the mass of a particle-like-body, \mathbf{F} is the resultant of the forces applied to that particle, and \mathbf{a} is the acceleration which such point acquires.

But, when working in a laboratory in order to check such law, students neither get a particle-like body, nor is it meaningful to speak of the acceleration \mathbf{a} of a body which is not a particle.

- 01) ¿Cómo presentar la Segunda ley de Newton, de manera que los estudiantes de física o ingeniería puedan verificarla o “descubrirla” en el laboratorio, sin tener que enfrentar las incongruencias verbales ni la palabrería metafísica?
 {Los físicos profesionales no suelen preocuparse por las contradicciones que acompañan la exposición de la Segunda Ley desde un punto de vista básico, sino recurren a conceptos más “elevados” que disimulan tales incongruencias}.

* Facultad de Ciencias/UNI

El estudiante (quien eventualmente se convertirá en un físico o en un ingeniero) aplicará lo que supuestamente ha aprendido, sin tener mucha oportunidad ni deseo de revisar sus conceptos, pues los textos tradicionales, como el de Goldstein (pág.1) o de Saletan-Cromer (págs. 5 y 8) insisten en tales errores.

- 02) En la verificación o “descubrimiento” experimental de la SLN, el estudiante cuenta (más o menos) con la siguiente parafernalia:

- 1) Un cuerpo sólido (bloque, ladrillo, o puck)
- 2) Un sistema de referencia fijo a la Tierra (laboratorio).
- 3) Ideas de lo que son el vector-posición, el vector-velocidad y el vector-aceleración de un punto material (que cambia su posición al cambiar el tiempo)
- 4) Algunas cuerdas y resortes para aplicar fuerzas
- 5) La idea de que la fuerza puede ser bien representada por un vector.
- 6) La idea de que la masa de un cuerpo es “una medida de la cantidad de materia” que posee; o algún discurso similar (“masa es la medida de la inercia del cuerpo”)
- 7) Una imprecisa idea de que los cuerpos tienen un centro de gravedad, punto que propiamente coincide con su centro de masa definido como $\mathbf{x}_{CM} = \sum_k m_k \mathbf{x}_k$ ó, “más elegantemente”, $\mathbf{x}_{CM} = (1/m) \int dm \mathbf{x}$.
- 8) Una serie de asunciones que son automáticamente aceptadas, sin mayor respaldo crítico. [por ejm, los resortes son elásticos, la longitud de una varilla es un número bien determinado, sólo que no podemos medirla exactamente, etc]

- 03) Con respecto a la Referencia usada en el experimento (que está fija al laboratorio, el que a su vez está fijo a la Tierra), debemos señalar que es el mismo tipo de referencia que usó Newton.

- 04) Primeramente debe quedar claro que una fuerza es la representación de cierto tipo de interacción (mecánica o electromagnética) entre dos cuerpos, que produce en ellos un cambio de posición, cambio de orientación o deformación (entre otros efectos). Con el auxilio de un resorte (cuerpo elásticamente deformable) se representa a las fuerzas por medio de vec-

tores, los mismos que indican la magnitud, la dirección y el sentido de aquellas.
Pero la representación de una fuerza por medio de un vector es una representación incompleta.

05) Experimentalmente se puede verificar que fuerzas *iguales como vectores* pueden producir diferentes efectos al actuar sobre un mismo cuerpo, una independientemente de la otra.
También podemos verificar experimentalmente que si dos fuerzas son iguales como vectores, y además son colineales, entonces producen (sin preocuparnos por la resistencia del material) los mismos efectos cuando actúan (independientemente una de la otra) sobre un mismo cuerpo. Esto lleva a una nueva característica de las fuerzas: ellas poseen lo que se conoce como *Línea de Acción*.
Es decir, una fuerza queda bien representada por su vector-fuerza y por su Línea de Acción, LdA.

Está claro, que si se supone que una fuerza está actuando sobre un cuerpo puntual, entonces la posición de este punto permite identificar a la LdA de la fuerza actuante, por lo cual, en tal caso, dicha LdA queda sobreentendida.

Definición: Para lo que sigue conviene dar la siguiente definición: Diremos que dos fuerzas son **equipolentes**, si a ellas le corresponde un único vector de fuerza.

La existencia de la LdA de una fuerza puede ser fácilmente verificada aplicando a un cuerpo en reposo sobre una mesa, o a un cuerpo colgado de dos o tres cuerdas, dos fuerzas equipolentes (una independientemente de la otra), cuyas LdA no sean muy cercanas.

Por otra parte se puede demostrar que la LdA de una fuerza queda bien determinada por (además del vector-fuerza) el vector-torque de la fuerza, \mathbf{M}_Q , y el punto Q (arbitrario) con respecto al cual se ha expresado el torque. Es decir, en general, una fuerza queda bien representada por la terna $(\mathbf{F}, \mathbf{M}_Q, Q)$. Cuando deseemos enfatizar la LdA, designaremos a la fuerza con \mathbf{F} , y con \mathbf{F} al correspondiente vector.

06) Superponiendo, o “sumando” las fuerzas que actúan sobre un cuerpo se obtiene la llamada *fuerza resultante*, que en algunos casos no es una fuerza (no representa a una interacción entre dos cuerpos), pero que matemáticamente posee la mismas características de una fuerza: tiene un vector-fuerza y una LdA.

Por ejemplo, en el llamado péndulo cónico, donde la bolita gira en un plano horizontal, ‘bajo los efectos’ de una resultante horizontal (que es la resultante de dos fuerzas: la de la cuerda de soporte y la del peso de la bolita).

En cambio, en el caso del peso de un cuerpo la resultante (de los pesos de las partes del cuerpo) SÍ es una fuerza física; también lo es la resultante en el caso de la interacción de contacto de un cuerpo con alguna superficie.

De otro lado, a veces puede no ser conveniente trabajar directamente con una fuerza, sino con sus componentes separadamente; tal suele ser el caso de la fuerza de reacción de una superficie de apoyo de un cuerpo, donde conviene tratar separadamente a la componente de fricción y a la componente normal.

07) Ahora, en el laboratorio, aplicando una fuerza a un cuerpo rígido (que por supuesto no es un cuerpo puntual) podemos apreciar dos efectos bien marcados: el cuerpo *se desliza* y el cuerpo *gira* (con respecto a la referencia elegida).

Tales movimientos no son causados solamente por la fuerza que hemos aplicado (quizás por medio de un resorte), sino que es efecto de todas las fuerzas que actúan significativamente sobre dicho cuerpo. En otras palabras, dichos movimientos son efecto de la fuerza resultante que actúa sobre el cuerpo.

Como consecuencia de lo dicho (desplazamiento y giro o rotación), los diferentes puntos del cuerpo adquieren diferentes velocidades y también diferentes aceleraciones (con respecto a la referencia usada). Entonces no tiene sentido referirnos a la velocidad o a la aceleración de tal cuerpo, sin especificar a cuál punto del mismo nos referimos.

08) Consideremos el caso usual en un laboratorio: Un cuerpo apoyado sobre una mesa horizontal completamente lisa (en realidad se ha eliminado la

fricción con una alfombra de aire). En este caso, la fuerza resultante coincidirá (matemáticamente) con la fuerza (horizontal) que apliquemos. Ahora, aplicando (alternadamente) diferentes fuerzas equipolentes podemos observar que los correspondientes desplazamientos no son muy diferentes, mientras que los giros sí pueden ser significativamente diferentes (por ejemplo, unos giros pueden resultar en sentido horario, mientras que otros pueden resultar en sentido antihorario). Esto nos permite enunciar lo que aquí llamaremos,

09) Postulado 1. Dada una fuerza arbitraria y un cuerpo C , existe una fuerza equipolente con aquélla, que aplicada al cuerpo C no le produce rotación. Es decir, bajo la acción de dicha fuerza el cuerpo solamente se desplaza (paralelamente a sí mismo).

Un ejemplo bastante simple para verificar la ausencia de rotación es el siguiente: A un cuerpo que reposa sobre el suelo o una mesa se lo levanta por medio de una cuerda (que constituye la LdA de la fuerza aplicada). *Eligiendo con cuidado el punto de amarre de la cuerda se puede lograr que el cuerpo sea levantado sin que gire.*

Adicionalmente podemos verificar que habiendo encontrado la fuerza (de la familia de fuerzas equipolentes con la fuerza dada inicialmente) que no produce rotación, este efecto se mantiene independientemente de la magnitud de la fuerza (sobre la misma LdA).

[Para lo que sigue conviene considerar un cuerpo ahuecado, de manera de poder colocar un hilo elástico que marque la posición de la LdA].

10) Ahora consideremos una segunda fuerza que tenga diferente dirección que la primera. Para esta segunda fuerza también existe la fuerza equipolente que actuando sobre el cuerpo en cuestión no le produce efecto de rotación, sino sólo traslación.

Entonces podemos verificar experimentalmente el siguiente hecho: La LdA de la segunda fuerza que no produce rotación interseca a la LdA de la primera fuerza (que tampoco produjo rotación). Esto nos lleva al **Postulado 2.** Todas las fuerzas (resultantes) que actuando alternadamente sobre un mismo cuerpo (rígido) no le producen efecto de giro, pasan por un punto fijo con respecto a dicho cuerpo. Ese punto recibe el nombre de *centro de masa*, CM, del cuerpo.

[Habiendo colocado hilos elásticos para marcar las LdA de las fuerzas, dichos hilos se intersecan en un punto común].

La existencia del descrito CM podría verificarse fácilmente de la siguiente manera:

Si se suspende un cuerpo y *se lo deja oscilar* como un péndulo, entonces dicho cuerpo se mantendrá sometido a dos fuerzas: su peso y la fuerza de la cuerda de soporte. Para lograr que, al oscilar, el cuerpo se desplace paralelo a sí mismo, la cuerda (delgada) de soporte debe ser fijada en el CM del cuerpo (ahuecado). En esta circunstancia no sólo se verifica que el cuerpo oscila paralelamente a sí mismo, sino que, además, tal efecto resulta independiente de la posición inicial (de reposo) que se haya dado al cuerpo.

El resultado anterior también es una verificación de que la resultante del peso pasa por dicho CM.

11) Si ahora sometemos un cuerpo a varias fuerzas, cuya resultante pase por el CM, dicho cuerpo se desplazará sin girar; como consecuencia, todos los puntos de dicho cuerpo tendrán la misma velocidad y la misma aceleración. En tales condiciones ya tiene sentido hablar de la velocidad o de la aceleración de dicho cuerpo.

A continuación recién podemos iniciar lo que suele considerarse el experimento para verificar la SLN.

12) Postulado 3: Si a un cuerpo (rígido) se le aplican – una independientemente de las otras – diferentes fuerzas (resultantes), $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \dots, \mathbf{F}_k$, que pasen por el CM, el cuerpo adquirirá las aceleraciones $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_k$, cumpliéndose que dichas aceleraciones son un mismo múltiplo de las fuerzas, es decir, $\mathbf{a}_k = \lambda \mathbf{F}_k$, para cualquier k , o en general $\mathbf{a} = \lambda \mathbf{F}$, *independientemente de la magnitud o dirección de la fuerza \mathbf{F} aplicada* (que debe pasar por CM).

Si el experimento se repite con cuerpos diferentes, entonces se obtendrá que cada cuerpo le corresponderá, en general, un valor distinto del parámetro λ .

13) De los resultados anteriores se puede afirmar que λ representa alguna (nueva) propiedad del cuerpo en consideración. Para verificar que dicha

propiedad es independiente de la forma que pueda tomar el cuerpo, o de si está entero o en pedazos, se pueden realizar algunos experimentos complementarios, tales como: i) Partir el cuerpo y unirlo diferentemente, ii) deformarlo, iii) Molerlo y meterlo en una caja muy liviana (para que el peso de la caja sea despreciable), iv) etc. En todas estas circunstancias el valor de λ permanece inalterado. Es decir, λ representa cierta propiedad intrínseca de un cuerpo, que, como se puede apreciar de algunos de los experimentos complementarios propuestos, tampoco depende de que se trate de un cuerpo rígido. El significado de dicha propiedad solamente puede ponerse en evidencia en una serie de situaciones en la que λ juegue un rol. Esta última afirmación es válida para cualquier propiedad de un objeto.

14) Según lo visto más arriba, para dos cuerpos diferentes C' y C'' tendremos que $\mathbf{a}' = \lambda' \mathbf{F}'$, $\mathbf{a}'' = \lambda'' \mathbf{F}''$, donde ni λ' ni λ'' dependen de las magnitudes ni direcciones de las fuerzas \mathbf{F}' , \mathbf{F}'' . Si ahora se unen (rígidamente, por comodidad) dichos dos cuerpos, entonces para el cuerpo compuesto se cumplirá que $\mathbf{a} = \lambda \mathbf{F}$ (recordemos que esto es independiente de \mathbf{F}), pudiendo verificarse experimentalmente que $1/\lambda = 1/\lambda' + 1/\lambda''$.

15) El experimento anterior pone en evidencia la conveniencia de expresar la 'misteriosa' nueva propiedad no por medio del número λ , sino por su inversa $m = 1/\lambda$, que recibe el nombre de *masa* (inercial) como podría haber recibido el nombre de, por ejemplo, el "espíritu del cuerpo". *El significado correcto de la masa queda determinado por el proceso antes mencionado*. Esto es lo que se conoce como una *definición operacional*. El significado intuitivo, como para cualquiera otra propiedad, solamente puede adquirirse usando dicho concepto en diferentes circunstancias.

16) Luego de todo el proceso anterior hemos arribado a la fórmula $\mathbf{F} = m \mathbf{a}$. Pero esto es sólo un caso particular; quedan dos preguntas importantes: i) ¿Qué sucede cuando la fuerza resultante aplicada no pasa por el CM?, ii) ¿Qué sucede cuando el sistema de referencia no está fijo a la Tierra?

17) El resultado anterior, $\mathbf{F} = m \mathbf{a}$, para cuerpos que no giran, la denominamos *Primera Parte de la SLN*. La segunda parte se refiere al caso en que la fuerza resultante no pasa por el CM. Esta segunda parte se puede desarrollar como se procede en los textos tradicionales, suponiendo que el cuerpo en consideración está compuesto de muchas corpúsculos con determinados valores de masa; por ello aquí no digo más sobre esta segunda parte de la SLN.

18) Antes hemos obtenido la fórmula $\mathbf{F} = m \mathbf{a}$, donde la aceleración \mathbf{a} ha sido medida con respecto a una referencia fija a Tierra. Es fácil verificar tanto teórica como experimentalmente, que dicho resultado no cambia si se recurre a una referencia que se desplace con velocidad constante con respecto a la Tierra, paralelamente a sí misma. A una tal referencia la denominaremos Referencia Inercial Terrestre, RIT. Es decir, el resultado anterior tiene validez (experimental) en toda RIT.

Pero si se realiza cuidadosamente el experimento mencionado en (12) se descubrirá que la fórmula $\mathbf{F} = m \mathbf{a}$ es sólo una aproximación. Es una situación afortunada que el gran Newton (1642, 1727) creyese haber descubierto una fórmula "exacta" (descartando las desviaciones por la presencia de fuerzas cuyas representaciones son complicadas, como es el caso, por ejemplo, de la fuerza de fricción del aire). En caso contrario, Newton podría habernos dejado como herencia una fórmula muy complicada.

Propiamente recién con los experimentos de Coriolis (1792, 1843) se puso en evidencia la falla de la fórmula $\mathbf{F} = m \mathbf{a}$ en una referencia terrestre.

Notemos que si la fórmula $\mathbf{F} = m \mathbf{a}$ fuese correcta en algún sistema de referencia SR, entonces dicha fórmula seguirá siendo correcta en cualquier SR' que se desplace paralelamente a sí misma, con velocidad constante con respecto a SR; pero no será correcta en un sistema de referencia SR'' que se encuentre acelerado con respecto a SR. Así surge la pregunta ¿Existe algún sistema de referencia donde la fórmula $\mathbf{F} = m \mathbf{a}$ sea "exacta"?

19) Llamaremos Referencia Solar a un sistema de referencia cuyo origen está fijo al centro del Sol, pero cuyos ejes no están fijos al Sol, sino

apuntan a estrellas lejanas. Una referencia inercial solar, RIS, es una referencia que se desplaza paralela a sí misma, a velocidad constante con respecto a la mencionada referencia solar. Los astrónomos, al describir el movimiento de la Luna, ya habían descubierto que dicho movimiento quedaba mejor descrito en una referencia inercial solar, RIS. Es decir, para el cumplimiento de la SLN una RIS es menos inexacta que una RIT (referencia inercial terrestre).

20) Aunque los astrónomos ya lo habían experimentado con las trayectorias de los planetas y cometas, recién con los satélites artificiales y los viajes interplanetarios (donde los pequeños errores se van acumulando) se tornó evidente que las referencias inerciales estelares (fijas a las estrellas lejanas), RIE, son las mejores referencias que disponemos para describir la SLN.

21) Es decir, propiamente no existe la metafísica *referencia inercial* a secas, sino que existe una serie de diferentes referencias inerciales, ligadas a grandes cuerpos (el Sol, la Tierra, la Luna, Júpiter, las estrellas lejanas), y en las cuales la SLN se cumple más aproximadamente cuanto más masivo es el cuerpo de referencia considerado, o cuanto más liviano es el cuerpo sometido a una pequeña fuerza.

Así, si lo que he dicho sobre las diferentes referencias inerciales es correcto, entonces cuando se aplique la fórmula $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ en un laboratorio fijo a un planeta o a un gran meteorito, deberá verificarse que dicha fórmula se cumple muy pobremente.

22) ¿No podría restituirse la validez de la SLN sobre la Tierra si se añadiesen las *fuerzas ficticias* adecuadas, como en el caso de la ‘fuerza de Coriolis’? En efecto tal cosa se puede realizar como un *pobre truco matemático*, pero como recurso físico es pernicioso, sobre todo en la enseñanza de la SLN. Aquí debemos tener presente que para quienes no son físicos experimentados no es nada fácil reconocer la existencia de una fuerza como representante de la interacción (mecánica o electromagnética) de dos cuerpos. Suele hablarse de las inexistentes fuerza de impulso, fuerza de la inercia, fuerza centrífuga, etc. Adicionalmente, en los textos de Física,

los llamados Diagramas de Cuerpos Libres suelen ser parcialmente incorrectos (por ignorar la existencia de la LdA).

Además, suponiendo que la Tierra constituye una buena referencia inercial, es un ejercicio simple y saludable describir, por ejemplo, las oscilaciones de un péndulo que cuelga de un ascensor acelerado (con respecto a la Tierra) o que cuelga del techo de un tren acelerado. En ambos casos se puede describir el movimiento de los cuerpos con relación a la Tierra, y posteriormente, trasladar dicho resultado a las coordenadas del ascensor o del tren, respectivamente.

Así mismo, teniendo presente que la Tierra rota con respecto a una RIE o una RIS, se puede calcular el movimiento de los cuerpos, aplicando la SLN, sin trucos, con respecto a una RIS o una RIE, según convenga, y luego trasladar los resultados a las coordenadas terrestres.

23) ¿Por qué se vuelca un camión que avanza a velocidad excesiva sobre una pista circular? La respuesta tradicional es que el vuelco es causado por la fuerza centrífuga que actúa sobre el CM del camión. De esta manera los ingenieros civiles han obtenido la *fórmula del peralte*, que establece la inclinación lateral que debería tener la porción de una pista que es un arco de circunferencia de radio dado, para evitar que los vehículos se vuelquen por efecto de “la fuerza centrífuga”. ¿No constituye tal fórmula una prueba experimental de que dicha fuerza centrífuga existe?.

Aquí debo mencionar un principio fundamental que a veces (como en el presente caso) es mal aplicado: Si en la solución de un problema uno razona equivocadamente, entonces no existe ninguna seguridad de que el resultado sea incorrecto [Por ejemplo, se podría afirmar que para dividir un número entre 3 basta dividir cada una de sus dígitos entre 3, y presentar como casos confirmatorios los de los números 309, 999, 990006]. La fórmula del peralte es correcta, a pesar de haber sido obtenida incorrectamente, pero también puede ser obtenida por medios lícitos, como un resultado de las fuerzas de fricción que la pista ejerce sobre las llantas (*llantas que ‘muerden’ la pista*, suele decir la propaganda del caso), y el hecho que la resultante de las fuerzas (transversales) que actúan sobre el camión, no pasa por el CM, y es centrípeta (como debería ser, por corresponder a un movimiento circular).

24) Ahora, con respecto a que la SLN pueda ser considerada como una mera definición de fuerza, como lo dice, por ejemplo, el texto de Goldstein (pág. 1) o el de Saletan-Cromer (pág. 8), debo aclarar lo siguiente:

i) **Una definición** es arbitraria, con la única condición que no sea contradictoria en sí misma (un pije es un objeto que no es un objeto) ni que contradiga a definiciones o conclusiones correctas ya establecidas. Por ejemplo, el concepto de fuerza ya ha sido establecido, antes de darse la SLN, y la definición de los textos arriba mencionados la contradice parcialmente, pues sabemos que hay fuerzas que aplicadas a un cuerpo no le producen aceleración.

Ejemplos de definiciones son: la velocidad, el momentum, el momento angular, la energía cinética de un cuerpo, etc.

ii) **Una ley experimental** no es arbitraria. Ella establece una relación funcional entre dos o más propiedades de un sistema físico; propiedades que han sido obtenidas o deducidas unas independientemente de las otras. Por ejemplo, no existen razones (evidentes) para creer que todos los cuerpos deban caer con la misma aceleración cerca de la superficie terrestre. Así, el gran filósofo Aristóteles (-384, -322), y otros pensadores posteriores, afirmaban que los cuerpos más pesados deberían caer más rápidamente que los más livianos (esta no es una afirmación caprichosa; existen una serie de ejemplos donde tal cosa se cumple, por ejemplo, cuando uno deja caer simultáneamente una piedra y una pluma). El asunto de la igual aceleración para los cuerpos en caída, recién fue aclarado por Galileo (1564, 1642) casi veinte siglos más tarde.

25) Finalmente debo decir, que es un grave error perder la oportunidad de que los jóvenes estudiantes aprendan buena física básica, por ejemplo, la oportunidad que se presenta con la SLN, y se prefiera que aprendan a seguir meras instrucciones de laboratorio, aún cuando ellas contradigan lo que está delante de sus propias narices, como es el caso de considerar un bloque o un puck como un cuerpo puntual, o pasar por alto que dos fuerzas con igual vector-fuerza puedan ser diferentes.

Creo que el ser humano se divierte cuando puede predecir cómo se va a comportar un objeto sometido a determinadas circunstancias, pero no se divierte mucho cuando debe atisgarse con reglas de predicción que entiendo muy pobremente, aunque en este último caso pueda recibir una palmada de aprobación cuando las aplica efectivamente en algunos casos típicos (como es el caso de los buenos programas de computación).

Conclusiones

1. La SLN no es la fórmula $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$, referida a un cuerpo puntual, donde m es la masa de dicho cuerpo, \mathbf{F} es un vector que representa bien a la fuerza resultante que produce la aceleración del cuerpo puntual.
2. La SLN en una ley experimental (no arbitraria) y no puede ser considerada como una definición (que es arbitraria) de la fuerza.
3. La SLN es una ley que se refiere al efecto de las fuerzas que actúan sobre cuerpos reales (no puntuales).
4. En el proceso experimental para construir la SLN, se presentan dos etapas. La primera se refiere al caso del movimiento del cuerpo paralelamente a sí mismo, expresado en la fórmula $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$. En esta etapa surgen varios conceptos necesarios.
 - i. La representación de una fuerza por medio de un vector es insuficiente; es necesario, además, definir la Línea de Acción de la fuerza considerada,
 - ii. El movimiento del cuerpo paralelo a sí mismo se produce solamente cuando la LdA de la resultante de las fuerzas actuantes pasa por un cierto punto, denominado Centro de Masa (que es definido experimentalmente),
 - iii. El concepto de masa es un resultado del proceso de obtención de la SLN, el mismo que constituye la definición operacional de masa (inercial).
La segunda etapa se refiere al caso general, en el que la LdA de la fuerza resultante no (necesariamente) pasa por el CM, cuyo tratamiento es el suele darse en los textos del caso.
5. Para el aprendizaje de la SLN basta referirse a la referencia del laboratorio o a la referencias inerciales terrestres. Posteriormente se puede mos-

trar como la fórmula $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ es solamente una (buena) aproximación, y que en realidad existe una cadena de referencias inerciales, donde la citada fórmula es “más exacta” cuanto mayor es la masa del cuerpo de referencia, hasta llegar a las referencias estelares.

6. La obtención de la SLN es una primera y excelente oportunidad para que los estudiantes de Física o Ingeniería se familiaricen sensatamente con un proceso científico, Desgraciadamente, hasta la fecha, sólo se trata de una oportunidad incomprensiblemente desperdiciada.

Referencias bibliográficas

1. H.Goldstein, Classical Mechanics, Addison-Wesley
2. E.J.Saletan, A.H.Cromer, Theoretical Mechanics, Joh Wiley.
3. H.G.Valqui, Apuntes de Mecánica, 2003.