
Impacto de la enseñanza de conceptos de fuerza y movimiento en los cursos de Física General

The Impact of Teaching the Concepts of Force and Motion in General Physics Courses

Fecha de entrega: 27 de marzo del 2013

Fecha de aceptación: 24 de abril del 2013

Hernán Castillo
hcastil@pucp.edu.pe

Richard Moscoso
richard.moscoso@pucp.edu.pe

José Luis Phan
jphan@pucp.edu.pe

Jorge Quiroz
jorge.quiroz@pucp.edu.pe

Sección Física
Departamento de Ciencias
Pontificia Universidad Católica del Perú

Resumen:

Este artículo sintetiza el análisis de los resultados de un estudio acerca de la enseñanza de conceptos de Física en alumnos universitarios y la utilidad de evaluar este tipo de conocimientos. Entre los años 2009 y 2011, 4535 alumnos de la Universidad Católica han sido evaluados con la prueba Force Concept Inventory (FCI) a. Los resultados indican que los conocimientos de fuerza y movimiento se implantan entre los cursos de Física 1 y Física 2, y no se encuentra una mejora significativa después. El concepto con mayor dificultad de aprendizaje es la segunda ley de Newton. Además, existe un importante número de alumnos para los cuales no hay relación entre la ganancia de conceptos y la aprobación del curso.

Palabras claves:

conceptos de Física, evaluación en Física, cuestionario sobre conceptos de fuerza, Force Concept Inventory (FCI)

Abstract:

This article focuses on the results of a research about teaching General Physics concepts to college students, and stresses the relevance of evaluating this kind of knowledge. Between 2009 and 2011, 4,535 students from the Pontifical Catholic University of Perú went through an evaluation process using the Force Concept Inventory test. The data results showed no significant improvement in the students' learning process after having learned the concepts of force and motion, matters included in Physics 1 and Physics 2. The hardest concept to learn was Newton's second law. Furthermore, a relevant amount of the students evaluated found no relation between learning these concepts and passing the courses.

Key words:

Physics concepts, evaluation in Physics, survey about concepts of force, Force Concept Inventory (FCI)

Introducción

Como parte de nuestro trabajo docente, el tema de la evaluación de los aprendizajes es una tarea constante. Sin embargo, pocas veces tenemos conciencia de los procesos adicionales que pueden estar detrás de toda evaluación y que no son analizados.

En general, podemos estar de acuerdo con que el estudiante dirige su principal esfuerzo hacia obtener una calificación aprobatoria sin interesarse en el aprendizaje en el largo plazo. Por otro lado, muchas veces los profesores asumen que una calificación aprobatoria es una garantía de que el proceso de enseñanza alcanzó la meta propuesta.

En el caso del dictado de los cursos de Física en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), vemos que para el curso de Física 1 (mecánica clásica para carreras de Ciencia e Ingeniería), esta meta cubre el manejo de los conceptos de fuerza y su aplicación correcta en la solución de problemas de movimiento en una o dos dimensiones, y (casi siempre) con aceleración constante.

Por otro lado, los docentes asumimos que los estudiantes que aprobaron el primer curso de física no enfrentarán dificultades en la parte conceptual de la mecánica de Newton más adelante. No obstante, nos quedaba la inquietud de si entre estos estudiantes existían diferencias en el dominio de los conceptos y en la persistencia en el tiempo de las nociones básicas de fuerza y movimiento.

¿Es que acaso los estudiantes enfrentan el curso de Física 1 (y su curso previo, de nivelación) con ideas predefinidas difíciles de modificar? ¿Es la calificación final del curso un indicador directo del logro alcanzado en el manejo de conceptos sobre fuerza y movimiento? ¿Es el resultado de una evaluación de conceptos suficiente para garantizar un aprendizaje efectivo? En última instancia, ¿qué evaluamos realmente dados los recursos disponibles y el sistema de evaluación vigente?

Surge así nuestro interés en medir el impacto de la enseñanza de conceptos de mecánica newtoniana en los cursos de física en Estudios Generales Ciencias.

La prueba FCI y la muestra utilizada

La prueba que utilizamos para evaluar los aprendizajes conceptuales de los estudiantes es la denominada Force Concept Inventory (FCI) (Hestenes, Wells, & Swackham, 1992)¹. Este inventario sobre conceptos de fuerza y movimiento presenta 30 preguntas objetivas de múltiples alternativas y es ampliamente usado para evaluar el nivel de dominio de los conceptos básicos de la mecánica newtoniana.

Los temas cubiertos en esta prueba son los siguientes (entre paréntesis las preguntas asociadas):

1. Cinemática (1, 2, 3, 12, 14, 19, 20)
2. Primera Ley de Newton (6, 7, 17, 25)
3. Segunda Ley de Newton (21, 22, 23, 24, 26, 27)
4. Tercera Ley de Newton (4, 15, 16, 28)
5. Diagrama de Cuerpo Libre (5, 11, 13, 18, 29, 30)
6. Movimiento Circular (5, 7, 18)

Se evaluaron a 4535 alumnos tanto del curso de nivelación como de los siguientes tres cursos de Física en Estudios Generales Ciencias de la PUCP. Estas pruebas se tomaron en los años 2009, 2010 y 2011.

En el curso de nivelación de Física, la prueba se tomó al final del semestre, mientras que, en el caso del curso Física 1, tanto al inicio, como al final del semestre. De esta manera, también se pudo registrar el nivel de ganancia para cada sección evaluada. Para los cursos de Física 2 y 3, solo hubo una medición al comienzo del semestre.

En líneas generales, los cursos de Física tienen evaluaciones de tipo práctica a lo largo del semestre y dos exámenes, uno parcial y otro final. Además, salvo el curso de nivelación, los cursos de Física incluyen prácticas de laboratorio distribuidas a lo largo del semestre. Todos los cursos de Física general en la universidad emplean enseñanza tradicional.

Primeros resultados

Los resultados que obtuvimos fueron los siguientes. Los alumnos del segundo y tercer curso de Física en promedio contestan correctamente 18 de las 30 preguntas de la prueba FCI, mientras que los alumnos del primer curso contestan correctamente un promedio de 14 preguntas.

¹ Se utilizó una versión posterior de la prueba y en español.

Podemos interpretar este resultado como que los conocimientos de mecánica solo se implantan en el primer curso de y se consolidan sin una mejora significativa entre el segundo y tercero. Para estar seguros de esta interpretación tomamos la prueba FCI a alumnos de electrónica, que ya no ven temas de mecánica en su carrera después de haber llevado el tercer curso de Física. Obtuvimos el mismo promedio de 18 respuestas correctas.

Asimismo, en una primera etapa, se evaluó a 468 estudiantes del curso de nivelación para determinar su dominio sobre conceptos de la mecánica newtoniana antes de avanzar en los siguientes cursos de Física. Encontramos en promedio 14 (de las 30) respuestas correctas, con el mayor número de aciertos en las preguntas sobre Cinemática, Primera Ley de Newton y Tercera Ley de Newton, mientras que las preguntas que versaban sobre Movimiento Circular y Segunda Ley de Newton fueron las peores contestadas.

A continuación, analizamos los resultados en el curso de Física 1 con más detalle.

Análisis de la muestra acumulada del curso de Física 1

Durante dos años (2010 y 2011), se tomó la prueba FCI al inicio (entrada) y al final (salida) de cada semestre académico. La muestra consiste en un total de 539 alumnos que rindieron ambas pruebas de manera que fuera posible obtener las diferencias entre ellas y de esta manera su *Ganancia*² (Hake, 1998)². Los parámetros estadísticos básicos de las variables utilizadas se muestran en la siguiente tabla:

Variable	N	Media	I I	Mínimo	Máximo
CRAEST	518	52,20263	5,687876	39,04	69,96
Prueba de entrada	539	14,5603	5,257106	1	30
Prueba de salida	539	18,03711	5,859453	0	30
Ganancia	539	3,476809	5,543082	-17	20
Ganancia	539	11,93321	2,56209	5	18

Tabla 1. Parámetros estadísticos básicos de las variables usadas

La siguiente figura nos muestra gráficamente la relación entre las variables CRAEst³, Ganancia y Nota (nota final del curso).

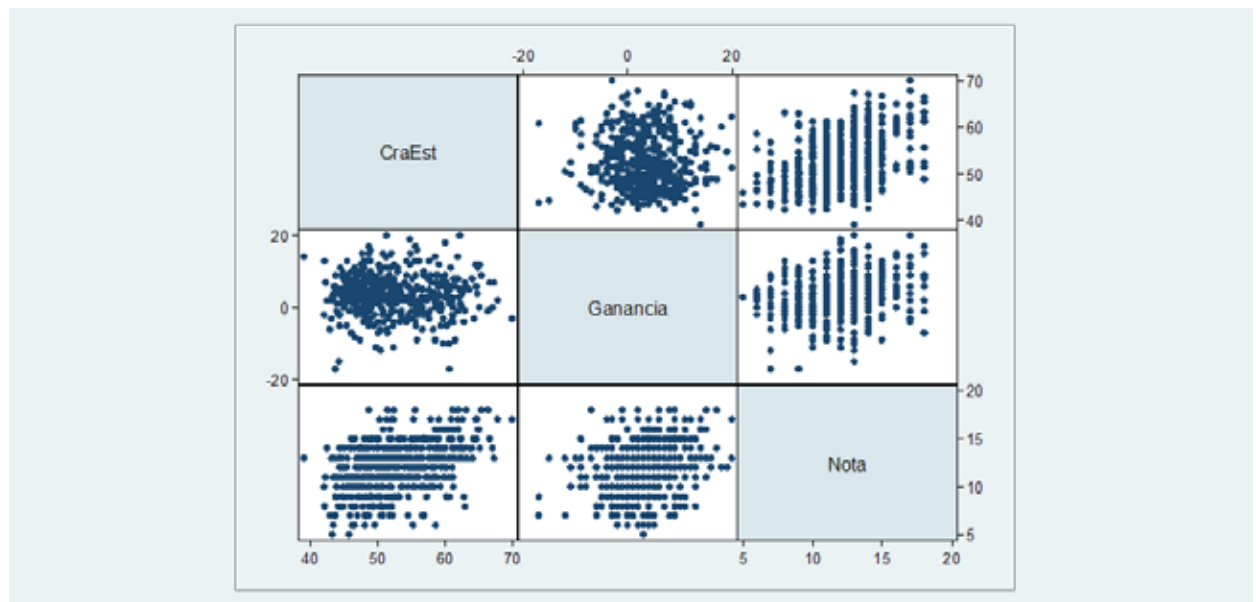


Figura 1. Relación entre las variables CRAEst, Ganancia y Nota (curso Física 1)

² Definimos la ganancia como: $g = (\text{valor_final}) - (\text{valor_inicial})$

³ El Coeficiente de Rendimiento Académico Estándar (CRAEst) de cada estudiante es el promedio ponderado de sus notas (estandarizadas respecto al promedio en el curso) por el número de créditos de cada curso.

El sistema de clasificación de alumnos por rendimiento que empleamos en la PUCP nos lleva a suponer que los alumnos que tienen un craest más elevado deben de tener mejores rendimientos en la prueba FCI o una mayor ganancia que los alumnos con craest más bajo. También podemos suponer que alumnos con mejores notas en el curso de Física 1 deben de tener mejor craest.

Podemos observar que la gráfica nos sugiere que hay una baja correlación lineal entre las variables. Para confirmar nuestra suposición, podemos realizar una regresión lineal entre cada par de variables y calcular el coeficiente de determinación. Aunque no es posible hacer una clasificación estricta, podemos considerar que un coeficiente de determinación menor al 30% indica una baja correlación lineal entre las variables en estudio. Vamos a realizar una regresión lineal entre los siguientes pares de variables: nota vs craest, ganancia vs craest; y nota vs ganancia para determinar si hay alguna relación entre dichas variables.

A continuación se muestran los resultados de la regresión lineal entre Nota vs CRAEst:

N	518	
R ²	0,2141	
m	0,2085	I _m =0,176
b	1,0308	I _b =0,9236

Tabla 2. Regresión lineal entre la Nota y el CRAEst

Entre ambas variables, obtenemos un coeficiente de determinación R² aproximadamente igual a 21%. Esto significa que el CRAEst solamente explica el 21 % de la variación de la Nota.

Si ahora efectuamos una regresión lineal entre la Ganancia y el CRAEst, obtenemos un coeficiente de determinación nulo, es decir, no existe relación alguna entre ambas variables.

N	454	
R ²	0,0001	
m	-0,009973	I _m =0,447
b	4,0616	I _b =2,3538

Tabla 3. Regresión lineal entre la ganancia y el CRAEst

Finalmente, al realizar la regresión lineal entre la Nota y la Ganancia obtenemos igualmente un coeficiente de determinación pequeño (5%).

N	475	
R ²	0,0509	
m	0,1039489	I _m =0,20649
b	11,65116	I _b =0,1378619

Tabla 4. Regresión lineal entre la nota y la ganancia

Resumen por Temas para el curso de Física 1

Para la misma muestra anterior, en la siguiente gráfica se presenta el porcentaje de alumnos del curso de Física General 1 (FIS129) que han contestado correctamente *todas* las preguntas que corresponden a cada una de las taxonomías (que denominaremos *temas*) de la prueba FCI. Se muestran los resultados para las pruebas de entrada y salida (acumuladas).

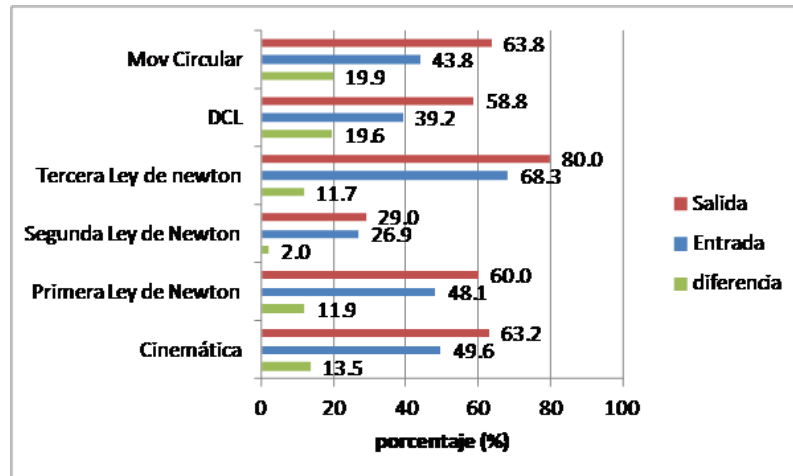


Figura 2. Resultados según los temas de la prueba FCI

Podemos observar que todos los temas obtienen un incremento en porcentaje entre la prueba de salida respecto a la de entrada. En particular, para la Segunda Ley de Newton, se obtiene la menor diferencia (aproximadamente 2%), mientras que la mayor diferencia es de aproximadamente 20% (movimiento circular y DCL). Se obtienen porcentajes similares para los temas de Primera Ley de Newton ($\approx 12\%$), Tercera Ley de Newton ($\approx 12\%$) y Cinemática ($\approx 14\%$). Un promedio simple de estos incrementos corresponde al valor de 13%, por lo cual los datos sugieren que, según la prueba FCI, el aprendizaje de conceptos se incrementa luego de haber llevado durante un semestre el curso de Física 1.

Relación entre la nota y la ganancia

De la Tabla 1 podemos observar que la Ganancia varía entre -17 y 20, y su valor promedio es igual 3,5. Esto significa que existen alumnos con ganancia negativa, lo cual es un resultado inesperado.

El número de alumnos para los cuales se ha calculado la ganancia es de 539, acumulados para ambos años. Es importante tomar en cuenta que el número total de alumnos es alrededor de 600 en promedio por cada semestre. Lo anterior significa que tenemos una muestra del 25% aproximadamente de la población total. Lo que está ocurriendo se puede observar con mayor claridad en la siguiente gráfica:

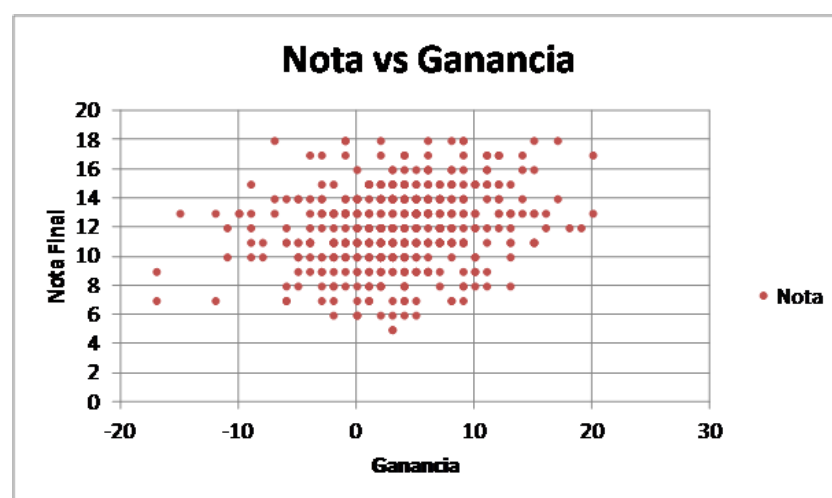


Figura 3. Comparación de la nota final respecto de la ganancia en la prueba FCI

De esta muestra de 539 alumnos, 396 estudiantes aprobaron el curso de Física 1. Si observamos la gráfica, podemos notar que tenemos alumnos (269) con ganancia positiva que han aprobado el curso. Esto, obviamente, corresponde a la situación esperada e ideal. Sin embargo, tenemos varias situaciones inesperadas (entre paréntesis el número de estudiantes de cada caso):

- a) Alumnos (93) con ganancia positiva que han desaprobado el curso.
- b) Alumnos (23) con ganancia nula que han aprobado el curso.
- c) Alumnos (7) con ganancia nula que han desaprobado el curso.
- c) Alumnos (70) con ganancia negativa que han aprobado el curso.
- d) Alumnos (43) con ganancia negativa que han desaprobado el curso.

	Aprobados	Desaprobados
Ganancia positiva	303	93
Ganancia nula	23	7
Ganancia negativa	70	43

Tabla 5. Número de aprobados y desaprobados según ganancia obtenida

Un primer resultado inesperado es el hecho de que tengamos alumnos con ganancia negativa, ya que lo esperado por cualquier docente es, en el peor de los casos, una ganancia nula. Estos resultados también nos están indicando que tenemos una situación claramente no deseable: alumnos (70) con conceptos errados de mecánica que están aprobando el curso. Además, un grupo de alumnos (93) que han mejorado en sus conceptos de mecánica están desaprobando el curso. Es decir, el 18% de los alumnos aprobados de esta muestra tienen conceptos errados de mecánica, 77% de los aprobados han mejorado en sus conceptos de mecánica y 65% de los desaprobados han mejorado sus conceptos de mecánica.

El rendimiento académico de los estudiantes y sus resultados en la prueba FCI

Finalmente, nos planteamos la siguiente pregunta: ¿es la distribución del resultado de la prueba FCI similar a la distribución del CRAEst de los estudiantes evaluados?

Para responder esta pregunta, se eligió una muestra de 1862 estudiantes que rindieron la prueba FCI de entrada en su curso de Física 1. Este grupo mostró un CRAEst máximo de 70,53 y un mínimo de 37,17. Los datos de CRAEst fueron agrupados en 30 intervalos correspondientes a las 30 posibles notas de la Prueba FCI para comparar ambas distribuciones.

Los resultados se presentan en el siguiente gráfico:



Figura 4. Distribución de los datos según resultados de la prueba FCI y el CRAEst

Se logra observar que los parámetros de media, desviación estándar y curtosis no son idénticos. Además, el valor de t es 9 para la prueba de Student. Todo lo anterior nos lleva a concluir que la probabilidad de error al afirmar que las dos distribuciones son diferentes es del orden de 10^{-19} en el peor de los casos (Rice, 1995). En conclusión, las dos muestras son diferentes.

Si asumiéramos que hay una relación entre el resultado de la prueba de entrada y el tipo de rendimiento del alumno (CRAEst), ambos grupos debieran ser grupos con una distribución estadística similar. Esto debería ser previo a la búsqueda de un modelo de descripción fenomenológica.

El resultado indicaría que el CRAEst no distingue el nivel de conceptos de Física que tiene un alumno, aunque fuese de un nivel alto. El análisis del mejor escenario (diferentes varianzas, muestras no pareadas) da un valor casi nulo de confianza ($< 5,0 \times 10^{-19}$). El análisis pareado (FCI-CRAEST) arroja un valor aún menor. Esto descarta un modelo a priori.

A simple vista ambas distribuciones son diferentes. Antes de realizar un análisis más profundo de la relación entre las variables medidas, se requiere revisar algunos parámetros que nos den una mejor comprensión. Este análisis debe ser previo a un modelo predictivo, a priori tendemos a pensar a menudo que hay variables que predisponen el rendimiento académico de un alumno. Aunque quede fuera del alcance del área de estudio del presente trabajo, es necesario reflexionar en la búsqueda de estas relaciones ocultas, o incluso, la falta de las mismas.

La forma, el CRAEst (c) tiene una media $c=13.78$ y un sesgo significativamente distinto al de una distribución gaussiana. En el caso de los resultados de FCI, con una media $f=15.31$, el sesgo es menor pero es también muy distinto al de una distribución gaussiana. Muestras pareadas para cada alumno (FCI-CRAEST), no muestran una concordancia significativa (Press, Teukolsky, Vetterling, & Flannery, 2007), tanto para pruebas t -Student con varianza similar como para pruebas I^2 o Kolmogorov-Smirnov. En un análisis muy crudo la diferencia entre las medias y los valores de otros momentos estadísticos (como la varianza o la kurtosis de cada muestra) nos permiten afirmar que incluso si prescindimos de la relación entre el tipo de alumno (CRAEST) y su rendimiento (prueba FCI) individual, las distribuciones de los grupos en conjunto son tan diferentes que un modelo predictivo para este caso no es posible.

Conclusiones

Algunas de las conclusiones encontradas se resumen a continuación:

- 1) Los resultados de la prueba FCI en el curso de nivelación están en concordancia con los resultados en el curso de Física 1.
- 2) El dominio de los conceptos de fuerza y movimiento se mejoran en el curso de Física 1.
- 3) Existe una ligera maduración de los conceptos de mecánica newtoniana (4 preguntas en promedio) al migrar a Física 2.
- 4) La nota final en el curso de Física 1 no refleja el rendimiento académico logrado en los primeros semestres de su educación universitaria (según el CRAEst).
- 5) La nota final del curso de Física 1 no está relacionada directamente con el manejo de conceptos de la mecánica newtoniana.
- 6) La ganancia en la prueba FCI no está relacionada directamente con el rendimiento académico del alumno según su CRAEst.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su reconocimiento a los colegas de Física que enseñan en EE.GG.CC. y que dieron facilidades para la toma de estas pruebas. Asimismo, al personal administrativo de EE.GG.CC. y de la Oficina de Apoyo Académico por el apoyo brindado.

Referencias Bibliográficas

HAKE, R.

1998 (January). "Interactive-engagement vs traditional methods: A six-thousand student survey of mechanics test data for introductory physics courses". *American Journal of Physics*, 66(1), 64 - 74.

HESTENES, D., WELLS, M., &SWACKHAM, G.

1992 (March). "Force Concept Inventory". *The Physics Teacher*, Vol. 30, 141-158.

PRESS, W. H., TEUKOLSKY, S. A., VETTERLING, W. T., &FLANNERY, B. P.

2007 *Numerical Recipes, The Art of Scientific Computing*. New York: Cambridge University Press.

RICE, J. A.

1995 *Mathematical statistics and data analysis* (2nd Ed.). Belmont, California: Wadsworth Publishing Company.