

IETFEM: Una herramienta de código abierto aplicada a la enseñanza del Método de Elementos Finitos en Ingeniería

Jorge M. Pérez Zerpa, Pablo Castrillo, Ximena Otegui y Alfredo Canelas

Resumen

Se presenta la experiencia de desarrollo de la herramienta numérica IETFEM, basada en el Método de los Elementos Finitos y su aplicación a cursos de las carreras Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad de la República, Uruguay. Esta herramienta de código abierto, que utiliza como plataforma el software libre GNU-Octave, permite tanto realizar el cálculo estructural en estructuras de barras, como ver el funcionamiento interno del código, enriqueciendo el proceso de aprendizaje de los estudiantes. Se presentan resultados de la aplicación de la herramienta en diferentes cursos de Ingeniería Civil así como de la participación de los estudiantes en el desarrollo de la misma. Palabras clave: enseñanza, IETFEM, Ingeniería Civil y Mecánica.

Abstract

In this article it is presented the process of development of the IETFEM numerical tool, based on the Finite Element Method and its application to the teaching of courses in Civil and Mechanical Engineering at Universidad de la República of Uruguay. The IETFEM open source software, implemented using GNU-Octave, allows students to solve structural problems and see the inner procedures of the software, understanding and addressing errors, therefore, enriching the learning process. Results are shown related to the application of the tool in courses of Civil and Mechanical Engineering as well as the participation of students in its development.

Keywords: teaching, IETFEM, Civil and Mechanical Engineering.

Introducción

El Método de los Elementos Finitos (MEF) es, desde mediados del siglo XX, una de las principales herramientas utilizadas por los ingenieros para el análisis de sistemas estructurales, mecánicos, eléctricos, etc. El avance de la computación y la disponibilidad creciente de computadores potentes a bajo costo ha provocado que los programas comerciales de MEF para el cálculo estructural sean utilizados masivamente (Fish, 2007; Bathe, 2008). De hecho, en los últimos cuarenta años el MEF ha transformado los procedimientos de trabajo de todas las áreas de ingeniería y constituye hoy una de las herramientas indispensables con las que un ingeniero debe contar en el ejercicio de su profesión. Por otra parte, el uso del MEF por parte de profesionales no debidamente capacitados podría eventualmente producir errores en el diseño de estructuras, y por tanto, riesgos para los usuarios.

En este contexto, la enseñanza del MEF en las carreras de Ingeniería se transforma en un desafío docente, donde además de formar a los estudiantes en el uso de diferentes programas de cálculo estructural es necesario transmitirles los conocimientos y herramientas que les permitan realizar un análisis crítico de los resultados. Por otra parte, la mayoría de los programas comerciales (ej: SAP2000 y AxisVM) de MEF son de código cerrado, por lo que presentan como desventaja a nivel educativo, que no permiten a los estudiantes ver su funcionamiento interno, limitando la comprensión de los errores durante el aprendizaje. En Caligaris et al (2013) se analiza la importancia de la enseñanza de los métodos numéricos en Ingeniería y se presenta una herramienta numérica orientada a la

Autores: Jorge M. Pérez Zerpa, Pablo Castrillo, Ximena Otegui, Alfredo Canelas
Los autores son docentes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, Uruguay.

Dirección de contacto: jperez@fing.edu.uy.



enseñanza, enumerando las ventajas que brinda para la misma. Esta herramienta al igual que otras disponibles en el mercado, son pagas o dependen de programas pagos, dificultando así el acceso libre y universal de los estudiantes a la misma.

De esta manera surge entre docentes del Grupo de Mecánica de Sólidos Computacional (MSC) del Instituto de Estructuras y Transporte (IET) la motivación de brindar una solución al problema a través del desarrollo de un software educativo adecuado. En este artículo se presenta la experiencia de desarrollo y aplicación de la herramienta llamada IETFEM (FEM: Finite Element Method) para el apoyo en cursos de Ingeniería Civil y Mecánica en Facultad de Ingeniería (FI) de la Universidad de la República (UdelaR). Desde el punto de vista educativo, resulta interesante destacar que el desarrollo de esta herramienta es realizado y actualizado por docentes y estudiantes de FI para su aplicación en diferentes cursos de grado y posgrado (Castrillo et al, 2013; Castrillo et al, 2014). La Unidad de Enseñanza de la FI (UEFI) ha participado en el seguimiento de la evaluación de los resultados obtenidos en la aplicación de la herramienta.

Herramienta IETFEM

En esta sección se describen el proceso de desarrollo del IETFEM y algunas de las características más importantes de la herramienta; finalmente se muestran los resultados obtenidos al resolver diferentes ejemplos.

Diseño

Como forma de fortalecer la enseñanza del MEF, los docentes Pérez Zerpa, Castrillo y Canelas, apuntaron a desarrollar la herramienta IETFEM para el apoyo del curso Elasticidad. Luego de obtener buenos resultados preliminares, planificaron el desarrollo con el objetivo de aplicarla al dictado de otras asignaturas de Resistencia de Materiales y Teoría de Estructuras. Se establecieron como criterios para su diseño: apertura de código y libre acceso, versatilidad, robustez y similitud con programas comerciales.

Código abierto y libre acceso: se buscó una herramienta que sin ser compleja para su aplicación en cursos de grado, permita al estudiante visualizar el funcionamiento interno del método de cálculo. Por ello se optó por la sintaxis de programación de GNU-Octave (herramienta libre de alta compatibilidad con Matlab), ya conocida por los estudiantes. Existen herramientas de MEF educativas, como el ED-Tridim con un costo de 150 euros por licencia(1); la gratuidad de GNU-Octave permite su libre acceso a cualquier estudiante así como representa un ahorro para las instituciones educativas. Además, contar con un software abierto donde los estudiantes pueden enten-

der e incluso programar nuevos cálculos de acuerdo a sus necesidades, enriquece el trabajo desde el punto de vista didáctico.

Versatilidad y robustez: se buscó que permita resolver variados tipos de estructuras y pueda ser adaptable a otras, como reticulados y pórticos tridimensionales u otros elementos estructurales como losas o cáscaras. Para esto se optó por una programación en módulos independientes facilitando su futura extensión. También se programa de forma eficiente para poder resolver estructuras de número importante de elementos en tiempos razonables.

Similitud con programas comerciales: la forma de ingreso de datos se eligió de acuerdo a otros programas de cálculo de estructuras como SAP2000 donde se deben definir: materiales, secciones, estados de carga, geometrías, conectividades, etc. En el IETFEM se optó por una entrada de archivo de texto plano donde el estudiante debe ingresar esta información. La salida también es en texto plano (.txt y .tex) y gráfica, al igual que en los programas comerciales.

Desarrollo y características

A fines de 2012 comenzó el desarrollo del IETFEM. El primer módulo desarrollado permitió resolver problemas de estructuras de barras articuladas o aporticadas en el plano con cargas aplicadas en los nodos. Esta primera versión fue utilizada por estudiantes del curso de Elasticidad 2013; luego se incluyó la posibilidad de generar un informe de salida en formato LaTeX. Posteriormente, la herramienta contó con el aporte del docente del IET, Agustín Spalvier, desarrollando la capacidad de ingresar cargas distribuidas uniformes en elementos de pórtico y el análisis modal de vibraciones de pórticos (tema abordado en profundidad en la asignatura de posgrado Análisis Dinámico de Estructuras, dictada por el IET). En octubre de 2013, una versión preliminar de la herramienta fue presentada en el 5to Seminario de Ingeniería Civil (Castrillo et al, 2013). Finalmente, a principios de 2014, Castrillo desarrolló un módulo para la resolución de problemas con variaciones de temperatura y fuerza de volumen en barras articuladas.

Actualmente el programa resuelve problemas de estructuras de barras reticuladas o aporticadas planas. El método aplicado para la resolución es el MEF (Oñate, 2013). En el caso de barras articuladas, se utilizan elementos de dos nodos, que interpolan linealmente el campo de desplazamientos. En el caso de vigas, se utilizan polinomios de tercer grado para interpolar la elástica y se considera la teoría de vigas de Navier-Bernoulli para relacionarla con el giro de cada sección (Timoshenko, 1965).

Entrada de datos: se realiza a través de un archivo de texto plano (.txt). Los primeros parámetros a in-

gresar son grados de libertad por nodo y cantidad de nodos por elemento. En la versión actual solo están implementados casos planos, por lo que, en reticulados son dos grados de libertad por nodo, y tanto los elementos de barra como de pórticos son de dos nodos por elemento. A pesar de que el programa no tiene implementadas otras opciones, se pretende que los estudiantes entiendan qué significan estos parámetros, y que en caso de que los modifiquen visualicen que surgen errores. Luego, deben definir materiales a través de módulo de Young, coeficiente de dilatación térmica y peso específico; y propiedades geométricas de las secciones. Finalmente, se definen los nodos y los elementos, dando una conectividad según las numeraciones de los nodos y también asignando material y propiedades geométricas de la sección transversal.

Condiciones de contorno: para la resolución de problemas de estructuras es crítica la correcta aplicación de las condiciones de contorno. Se ha notado que éste suele ser un error frecuente cometido por los estudiantes en la resolución analítica y por ello se prestó especial atención al diseñar el ingreso de las condiciones al IETFEM. Para ingresar las condiciones de contorno se ingresan dos tipos por separado: fuerza conocida y desplazamiento conocido (equivalentes a Neumann y Dirichlet respectivamente en problemas de ecuaciones en derivadas parciales). Para cada tipo de condición, se debe ingresar número de nodos con condición impuesta e introducir el valor impuesto en cada dirección para cada nodo. El programa permite imponer desplazamientos diferentes de cero.

Finalmente, los estudiantes también pueden incluir estados de carga con temperatura y resortes lineales (equivalentes a condiciones de Robin en ecuaciones en derivadas parciales) en cualquier nodo de las estructuras. También se puede configurar el formato de los gráficos definiendo tanto factores de escala para la representación de la configuración deformada como factores de escala para apoyos, fuerzas, margen en los gráficos, etc.

La salida brindada por el programa consiste en varias gráficas de diagramas de solicitaciones y configuración deformada. Por otra parte, genera un archivo de texto plano con todos los resultados numéricos y también se genera un archivo .tex que siendo compilado usando la herramienta libre LaTeX (Oetiker, 2014) genera un informe en .pdf con todos los gráficos y tablas de resultados obtenidos.

Ejemplos

Para presentar el funcionamiento de la herramienta, se resuelven a continuación algunas estructuras simples y se presentan resultados obtenidos por el IETFEM.

Ejemplo 1 – Reticulado simple

Se considera una estructura de tres barras articuladas con un resorte en el nodo B y apoyos fijos en A y D. La barra BC tiene mayor área que las otras y los nodos B y C tienen fuerzas aplicadas según la Figura 1, donde e_x y e_y indican la base global utilizada. Los valores de estas fuerzas son tales que el nodo C no se desplaza horizontalmente.

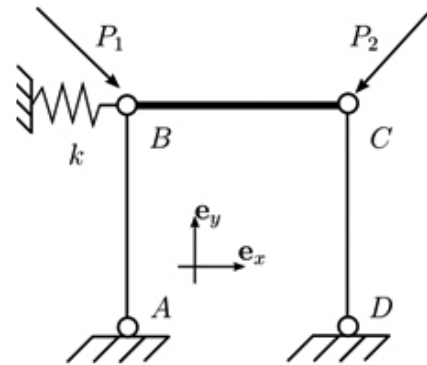


Figura 1: Esquema del ejemplo 1

Este ejemplo fue resuelto por alumnos del curso de Elasticidad 2014 como parte del trabajo de aprobación del curso. En dicha tarea se debía también considerar una fuerza por unidad de volumen en la barra CD y comparar gráficamente los resultados calculados por el software frente a los obtenidos con la solución analítica de la ecuación de Navier, es decir, los alumnos debían obtener un gráfico como el mostrado en la Figura 2, donde se observa que al refinar la malla se obtiene una aproximación de la solución analítica con menor error. En la expresión analítica, L es el largo de la barra y gamma el peso propio. Los diferentes grupos de alumnos trabajaron con diferentes valores numéricos de propiedades geométricas, materiales, y fuerzas aplicadas.

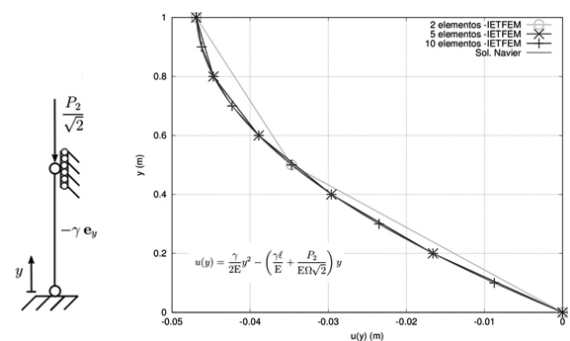


Figura 2: Gráfico comparativo desplazamiento barra CD, soluciones analíticas y IETFEM

Para resolver numéricamente deben dividir la barra CD en varios elementos y analizar la convergencia de la solución. En caso de que no se coloquen apoyos

deslizantes en los nuevos nodos se obtienen errores; de esta forma, todos los estudiantes deben entender el concepto de grados de libertad por nodo. En la Figura 3 se observa a la izquierda el diagrama de la configuración deformada de la estructura y a la derecha el diagrama de solicitaciones directas con el valor de directa por cada barra (en la estructura de la figura, la barra CD está modelada con tres elementos).

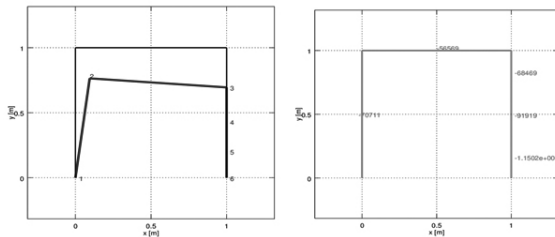


Figura 3: Izquierda: configuración deformada de estructura con un factor de escala de 100; Derecha: diagrama de directa en Newtons.

En la Figura 4 se presenta una de las tablas que proporciona el programa IETFEM, la cual contiene los valores numéricos de los desplazamientos nodales y es dada en formato de texto plano en lenguaje de LaTeX. El informe completo que genera el programa incluye dicha tabla y otras similares con otras informaciones: solicitaciones, reacciones, fuerza en resortes, matrices de rigidez, etc.

A través de la resolución de este ejemplo los estudiantes trabajan el concepto de discretización en elementos de un dominio así como el de grado de libertad de un nodo, ambos esenciales para el funcionamiento del MEF.

Displacements (m)		
Node	u	v
1	0.00000	0.00000
2	$9.43 \cdot 10^{-4}$	-0.00236
3	0.00000	-0.00305
4	0.00000	-0.00228
5	0.00000	-0.00127
6	0.00000	0.00000

Figura 4: Tabla de valores de desplazamientos de los nodos. Se muestra la versión en formato pdf obtenida a partir de la salida de LaTeX.

Ejemplo 2 – Cercha

Se considera una cercha compuesta por 23 barras de acero de perfiles normalizados. Esta estructura es similar a la de problemas planteados como parte de trabajo de aprobación de curso de Estructuras Metálicas y de Madera dictada por el IET en el 9º semestre de Ingeniería Civil.

En la Figura 5 se observa la configuración indeforma-

da de la estructura con los apoyos y cargas esquematizadas. Este esquema básico de cálculo es usual en el ejercicio profesional de los ingenieros al determinar solicitaciones en estructuras metálicas, como por ejemplo galpones.

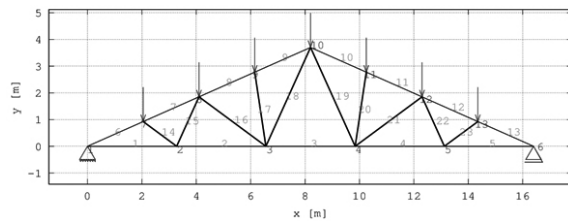


Figura 5: Configuración indeformada de cercha

En la Figura 6 se muestra la configuración deformada de la estructura con un determinado factor de escala de deformada.

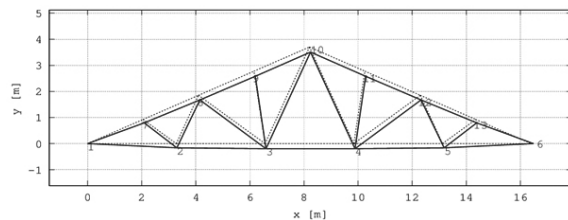


Figura 6: Diagrama de configuración deformada de cercha, factor de escala: 150.

Ejemplo 3 – Torre Eiffel plana

Se considera un problema de mayor porte, con el objetivo de mostrar que el programa es aplicable a estructuras con un elevado número de elementos y grados de libertad. Se considera una versión plana de la Torre Eiffel formada por 1000 barras y 451 nodos. A pesar de ser un ejemplo ficticio, es útil para visualizar que la herramienta puede resolver problemas de mediano porte.

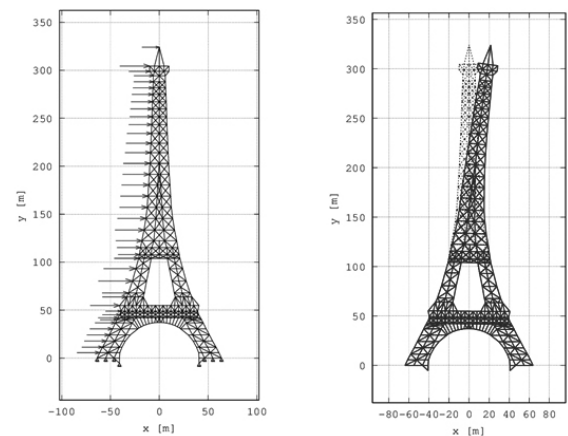


Figura 7: Izquierda: Configuración indeformada de Torre, Derecha: Configuración deformada, con factor de escala: 150.

En la Figura 7 se presenta a la izquierda la estructura con cargas puntuales aplicadas en los nodos de la izquierda, representando una carga de viento con una zona de influencia variable en la altura y a la derecha la configuración deformada.

El tiempo empleado por el IETFEM para obtener los desplazamientos y solicitaciones es aproximadamente 10 segundos. Por otra parte, la generación de gráficos e imágenes .png lleva aproximadamente 80 segundos.

Ejemplo 4 – Pórtico

Se considera una estructura aporticada con momentos, fuerzas puntuales y cargas distribuidas. La versión actual del programa subdivide las barras con cargas distribuidas creando nuevos nodos. En estos nodos se aplican las correspondientes fuerzas puntuales y/o momentos como se muestra en la Figura 8 izquierda.

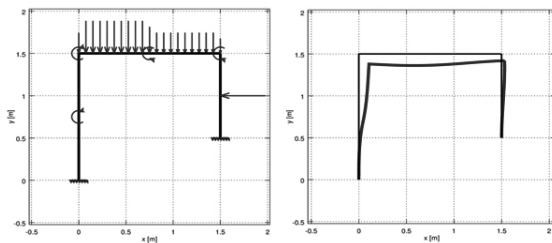


Figura 8: Izq. Configuración indeformada de pórtico, Der.: configuración deformada pórtico, con factor de escala: 3000.

En la Figura 8 derecha se observa la configuración deformada de la estructura con el respectivo factor de escala.

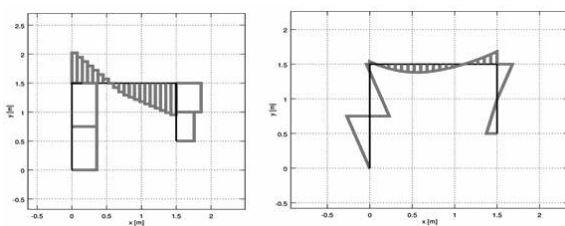


Figura 9: Izq: diagrama esquemático de cortante; Der: diagrama esquemático de momento

En la salida se muestran diversos valores como desplazamientos, cortantes, momentos para cada elemento. También se incluye la posición del elemento donde el momento se anula, dato de interés para el diseño de estructuras de hormigón armado. En la Figura 9 se muestran los diagramas de cortante y momentos provistos por la herramienta.

Aplicación y resultados

En esta sección se describe cómo se aplicó la herramienta a los cursos Elasticidad y Métodos Computacionales Aplicados al Cálculo Estructural (MCACE) - dictado por el IET en el 8º semestre de la carrera Civil perfil Estructural-. También se presentan algunos de los resultados obtenidos en ambos cursos.

Aplicación al curso Elasticidad

La herramienta fue aplicada al curso Elasticidad en sus ediciones 2013 y 2014. En ambas, se pidió a los estudiantes resolver problemas de estructuras de barras utilizando el MEF analítica y numéricamente; la resolución numérica implicó utilizar el IETFEM. Como parte de una de las tareas de aprobación en 2014, algunos estudiantes resolvieron y analizaron el problema planteado en el Ejemplo 1.

Aplicación al curso MCACE

En este curso los estudiantes profundizan en el aprendizaje del MEF desarrollando programas propios para diferentes tipos de cálculos estructurales. También avanzan en el uso de programas comerciales con el objetivo de adquirir los conocimientos necesarios para llevar adelante los cursos finales de Proyecto Ejecutivo de Estructuras. En la edición 2013 se puso especial énfasis en la comprensión del proceso de desarrollo de códigos GNU-Octave, diseñando e implementando rutinas sencillas, para luego resolver problemas estructurales de mayor complejidad como trabajo de aprobación de curso. En las clases prácticas dictadas por los docentes Pérez Zerpa y Castrillo fueron desarrollados -junto con los estudiantes- códigos de lectura de datos desde archivo de texto, generación de gráficos, ensamblaje de matrices, etc. Posteriormente, durante el desarrollo del trabajo, cada grupo resolvió algún problema nuevo de estructuras, para lo cual desarrollaron códigos y utilizaron programas comerciales para su validación. Desde el punto de vista didáctico, en el curso MCACE se buscó trascender el uso de los programas y profundizar en el análisis crítico de los resultados. La habilidad de pensar críticamente es primordial para el ingeniero, por lo que resultan relevantes las experiencias de formación que favorecen su desarrollo (Goodhew, 2010: 38).

Se buscó además favorecer el trabajo colaborativo entre estudiantes -considerando las ventajas que el mismo brinda para el aprendizaje (Biggs & Tags, 2007)- por lo que se los subdividió en parejas fijas durante todo el semestre, con la finalidad de desarrollar programas de resolución de problemas propuestos como forma de aprobación del curso. Los docentes realizaron el seguimiento semanal del trabajo mediante clases de consulta, buscando que los estudiantes tuvieran una retroalimentación continua que les posibilitara avanzar en el desarrollo semanalmente,

para lograr obtener un producto adecuado al final del semestre.

En las ediciones 2012 y 2013, se propuso a los estudiantes de MCACE que sus trabajos pudieran ser parte del futuro desarrollo del IETFEM. Con esta propuesta se buscó potenciar el involucramiento en la asignatura, favorecer su motivación y vincularlos a situaciones de investigación y creación de conocimiento desde una asignatura de grado. Todos estos aspectos son explicitados y valorados como significativos para la enseñanza universitaria en general, y para la de ingeniería en particular (Goodhew, 2010; Bings & Tang, 2007).

Resultados del Curso Elasticidad

La interacción con los estudiantes a partir del uso del IETFEM permitió dar cuenta - al menos cualitativamente- de una mayor comprensión de algunos de los conceptos centrales para el aprendizaje del MEF. Por ejemplo, en la versión actual debe indicarse el número de grados de libertad por cada nodo. Dado que el ingreso de un valor equivocado conduce a resultados incorrectos, para el uso de la herramienta los alumnos necesariamente deben comprender el concepto temáticamente. También fue posible observar una mayor comprensión de la forma de aplicar las condiciones de contorno a diversos problemas de barras e incluso en problemas de sólidos continuos en elasticidad lineal.

En la edición 2014 se realizó una consulta sobre el uso del IETFEM a través de un formulario web, con el objetivo de contar con un sondeo general cualitativo de la valoración acerca del uso de la herramienta en este curso. Se solicitó a los estudiantes indicar solamente comentarios positivos y negativos sobre el uso de la herramienta. Se presentan aquí los comentarios más representativos de los estudiantes que respondieron el sondeo (12% de los inscriptos al curso): “Me pareció un buen programa, no tengo como compararlo con otro, pero nosotros no tuvimos mayores dificultades a la hora de realizar los ejercicios, te da una rápida solución con gráficas y datos! muy bueno.”; “Es fácil modificar archivos para hacer variaciones de un problema, da más rapidez en hacerlas”; “Es abierto, libre, intuitivo, el manual es claro”.

A los estudiantes que cursaron por segunda vez la asignatura y que ya utilizaron otra herramienta en 2012 o antes (40% de quienes respondieron el sondeo), se les pidió realizar comentarios comparativos con el IETFEM. Los comentarios que más se reiteran indican que “Me pareció más fácil que el 2012. Los resultados no se entendían como en este programa que resulta todo muy claro.”; “El IETFEM que yo sepa no falla salvo que uno ingrese algo mal, en el programa anterior tenía a veces errores y había que

ingresar todo de nuevo.”. Como comentario negativo manifestaron que “La interfaz en consola no es muy amigable”.

Estos comentarios son alentadores en cuanto a la buena recepción del IETFEM; las críticas manifestadas por los estudiantes son un insumo valioso para el futuro desarrollo de la herramienta.

Resultados del Curso MCACE

Durante el curso se evaluó en forma continua a los estudiantes en el desarrollo de sus trabajos. En varios casos, se observó un importante grado de compromiso y entusiasmo que condujo a la obtención de elaboraciones de destacada calidad. A través de una encuesta de opinión estudiantil anónima aplicada al finalizar el curso, se pudo constatar que los estudiantes consideraron motivante la posibilidad de contribuir con el desarrollo del IETFEM.

Algunos estudiantes continuaron realizando actividades académicas extracurriculares finalizado el curso. Entre ellos, Fiorella Mondino actualmente se encuentran ejecutando un proyecto de iniciación a la investigación en el grupo de investigación MSC del IET con apoyo de la Comisión Sectorial de Investigación Científica. También Juan Perlas y Lucía Fiori se concentraron en aspectos de modelamiento computacional del comportamiento de la madera y presentarán sus resultados en las XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. Esta vinculación con actividades de investigación de estudiantes de grado resulta novedosa para el IET y podría atribuirse en parte a la propuesta relativa al IETFEM.

La encuesta aplicada al finalizar las ediciones 2012 y 2013 fue respondida por el 37% y 88% de los inscriptos al curso respectivamente en cada edición; el número total de inscriptos al curso correspondió a 22 y 29 estudiantes en cada año respectivamente. En la misma se les solicitó destacar aspectos positivos y negativos del curso (Pregunta 1: Indique aspectos POSITIVOS y aspectos NEGATIVOS que considere relevantes del curso). El aspecto positivo más destacado en ambas ediciones por el 75% y el 70% de los estudiantes que respondieron la encuesta respectivamente fue la aplicabilidad (“(...) está bueno porque es algo que se puede aplicar a la actividad como ingeniero”; (se trabajaron) “ejemplos sencillos y aplicables”; (permitió) “desarrollar la idea de modelar problemas reales”, “comprender los métodos computacionales usados en programas comerciales”, y “aclarar conceptos que no quedaron claros en Elasticidad”). Para los aspectos negativos, la única valoración que es mencionada por más de un estudiante (25% de los estudiantes) corresponde a los conocimientos de programación previos necesarios para desarrollar la herramienta (“Falta introducción a la programación”).

En particular, sobre la inclusión de los códigos desarrollados por ellos para el ensamblado del IETFEM (Pregunta 2: Teniendo en cuenta la propuesta docente de incluir los códigos por ustedes desarrollados durante el curso para el ensamblado de un programa de elementos finitos (IETFEM), 2.1. ¿le pareció interesante?, 2.2. ¿le pareció motivante?; 2.3. ¿le pareció adecuada? ¿Por qué?), el 100% de los estudiantes en ambas ediciones valoraron la propuesta como adecuada al curso e interesante (“Porque va a estar disponible como herramienta pública de la universidad”, “...permite que no sea simplemente recibir información en la carrera sino también formar parte en la generación de conocimiento (...) es genial tener una herramienta para los cursos que no sea pirateada”, “Me parece bien que consideren trabajos de estudiantes”). Además, el 88% en 2012 y el 70% en 2013 la consideraron motivante (“(...) nos motiva a realizar el mejor programa posible para que pueda ser útil para nuestros compañeros”, “(...) era aplicable a problemas de la carrera”, “Es motivante dejar algo para la facultad como retribución”).

Estas valoraciones resultan concordantes con las presentadas por Caligaris et al (2013:71): los estudiantes reconocen y explicitan que el uso de recursos tecnológicos en la enseñanza del cálculo estructural los motiva así como favorece la comprensión de los conceptos trabajados.

Conclusiones

Considerando los diferentes resultados obtenidos a partir del trabajo con IETFEM en los cursos de Elasticidad y MCACE, se puede valorar la experiencia como muy positiva. La inclusión de una herramienta informática desarrollada por docentes de la propia Institución educativa favoreció el aprendizaje de conceptos relevantes para la formación del futuro ingeniero en el área estructural.

Fue posible obtener una muy buena respuesta por parte de estudiantes que utilizaron el programa y además se logró motivar a estudiantes avanzados a continuar desarrollando su actividad académica con el objetivo de cooperar en el desarrollo del programa. Esto sin dudas, también favorece la motivación del equipo docente para continuar en esta línea de desarrollo y trabajo integrado con estudiantes.

Se puede concluir también que es posible la utilización de software libre en la enseñanza. Al utilizarlo se colabora con la gestión eficiente de los recursos de universidades públicas.

Lineas de trabajo a futuro

Aplicación a otros cursos. Teniendo en cuenta la experiencia positiva en el curso Elasticidad, el IETFEM será presentada a estudiantes del curso Resistencia

de Materiales 1 de 4° semestre de Civil dictado por el IET. De esta forma, los estudiantes comenzarán a familiarizarse con programas de elementos finitos como usuarios sin conocimiento del método, pero con apoyo constante de los docentes.

Desarrollo de nuevos módulos. La estudiante avanzada Mondino se encuentra actualmente desarrollando el módulo de reticulados tridimensionales junto a el docente Castrillo para análisis estructural considerando grandes deformaciones y material Saint-Venant Kirchoff. Estos nuevos conceptos representan una introducción a temas del curso de posgrado “Elasticidad Finita” dictado por el Prof. Canelas. De esta forma se obtendrá una nueva experiencia de aplicación de la herramienta al dictado de cursos, en este caso de posgrado.

Cooperación. Siendo la herramienta de código libre es posible establecer cooperación con otras instituciones educativas interesadas, implementando nuevas funciones, validando códigos o redactando documentación.

Notas

1. <http://www.cimne.com/tiendaCIMNE/EduSoft/tridim.asp>

Referencias bibliográficas

- AxisVM 12. Structural Analysis & Design Software. <http://axisvm.eu/index.html>, 2013
- BATHE, K-J (2008). Finite Element Method. Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering. 1–12.
- BIGGS, J., TANG, C. (2007) Teaching for Quality Learning at University. McGraw Hill. 3rd Edition.
- CALIGARIS, M., RODRÍGUEZ, G. y LAUGERO, L. (2013) Los recursos tecnológicos en la enseñanza de las deformaciones de columnas y vigas. Revista Argentina de Enseñanza de la Ingeniería. 2(3):63-72
- CASTRILLO, P., MONDINO, F., PÉREZ ZERPA, J. y CANELAS, A. (2014) Desarrollo y extensión de una herramienta numérica de elementos finitos para el dictado de cursos de grado y posgrado, XXI Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones, ENIEF 2014, Bariloche, Argentina.
- CASTRILLO, P., PÉREZ ZERPA, J. y CANELAS, A. (2013) IETFEM: una herramienta didáctica de Elementos Finitos, 5to Seminario de Ingeniería Civil del Instituto de Estructuras y Transporte, Universidad de la República.
- FISH, J. y BELYTSCHKO, T. (2007) A first course in finite elements. With 1 CD-ROM (Windows). John Wiley & Sons, Ltd., Chichester. xiv+320 PP. ISBN: 978-0-470-03580-1
- GOODHEW, P. (2010) Teaching Engineering. UK Center of Materials Education.



GNU Octave 3.6.4. John W. Eaton. <http://www.gnu.org/software/octave/> 2013
MatLab R2013a. MathWorks. <http://www.mathworks.com/products/matlab/> 2013
OETIKER, T., PARTL, H., HYNA, I., SCHLEGL, E. (2014) The not-so-short introduction to Latex. <http://tobi.oetiker.ch/lshort/lshort.pdf>.
OÑATE, E. (2013) Structural Analysis with the Finite Element Method. Linear Statics International Center for Numerical Methods in Engineering-Springer.
TIMOSHENKO, S.P., YOUNG, D.H. (1965) Theory of Structures. McGraw-Hill.
SAP2000 Computers & Structures, Inc. <http://www.csiamerica.com/products/sap2000>, 2014

