



Jornadas In-Red 2014  
Universitat Politècnica de València  
Doi\*\*\*\*\*

## Experiencias de aplicación de la simulación empleando software libre y gratuito en la enseñanza de las ingenierías de la rama industrial

Asunción Santafé Moros<sup>a</sup>, José M. Gozávez Zafrilla<sup>a</sup>, Javier Navarro Laboulais<sup>a</sup>, Salvador Cardona Navarrete<sup>a</sup>, Rafael Miró Herrero<sup>a</sup>, Juan Carlos García Díaz<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Ingeniería Química y Nuclear, Universitat Politècnica de Valencia, assanmo@iqn.upv.es

<sup>b</sup> Departamento de Estadística e Investigación Operativa, Universitat Politècnica de Valencia.

---

### **Resumen**

*En este trabajo se presentan las experiencias de utilización de software libre y gratuito llevadas a cabo por el Equipo de Innovación y Calidad Educativa ASEI (Aplicación de la Simulación en la Enseñanza de la Ingeniería) en asignaturas de las áreas de Ingeniería Química, Nuclear y Estadística que requieren la utilización de software de cálculo y herramientas de simulación. El software libre puede ser utilizado como una herramienta en metodologías docentes basadas en el uso de la simulación en el aula de teoría o bien como una forma de disminuir los costes en la enseñanza y aportar nuevos valores. Adecuadamente empleadas, las metodologías basadas en el uso de programas de simulación pueden estimular la capacidad de autoaprendizaje del alumno. En esta comunicación se muestran ejemplos del amplio abanico de aplicaciones de software que se pueden utilizar sin representar coste para la Universidad y posteriormente para la empresa.*

**Palabras clave:** competencias, formación, metodologías activas, simulación, software libre.

## **1. Introducción**

En este trabajo se presentan distintas experiencias de utilización de software libre y gratuito llevadas a cabo por el Equipo de Innovación y Calidad Educativa ASEI (Aplicación de la Simulación en la Enseñanza de la Ingeniería) (ASEI, 2012). Estas experiencias se desarrollaron en asignaturas de las áreas de Ingeniería Química, Ingeniería Nuclear y Estadística industrial que requieren la utilización de software de cálculo y herramientas de simulación. La mayor parte de las experiencias comenzaron a desarrollarse dentro del Proyecto de Innovación y Mejora Educativa SIMULIB “Utilización de herramientas de simulación en software libre como metodología de bajo coste para aumentar el rendimiento de la enseñanza” (PIME A20/11 de la UPV) con el objetivo de investigar, experimentar y evaluar diferentes herramientas de simulación de software libre.

El equipo ASEI es un foro de intercambio de experiencias y un instrumento para trabajar de forma coordinada en el desarrollo de metodologías basadas en la aplicación de la simulación en el aula que buscan mejorar la docencia y facilitar el autoaprendizaje mediante la utilización de herramientas de simulación.

Existen en la actualidad plataformas de cálculo y simulación ofrecidas por casas comerciales que destacan por su potencia, fiabilidad, facilidad de manejo y potencia de representación gráfica. No obstante, presentan los siguientes inconvenientes:

- En la mayoría de los casos, el alumno no puede realizar las tareas no presenciales en su domicilio, a no ser que emplee una copia no legal o que incremente su permanencia en el Centro.
- Finalizada la vida universitaria puede no disponer de ellas en su trabajo, perdiéndose el esfuerzo realizado y las capacidades adquiridas.
- Representan un elevado coste económico para las instituciones de enseñanza.
- Son muchas veces cajas negras cerradas siendo la base de su funcionamiento no siempre conocida, repercutiendo negativamente en la calidad de la simulación.

Por otra parte existen otras herramientas encuadradas en las categorías free/libre/open-source software que son agrupadas bajo las siglas FLOSS, y que, denominaremos simplemente como “software libre” en el contexto de esta comunicación. La utilización de estas herramientas en la enseñanza puede hacer frente a los inconvenientes mencionados. No obstante, precisa de la implantación de nuevas metodologías de enseñanza para solucionar una dificultad de manejo derivada de trabajar con entornos de trabajo a los que los alumnos están menos habituados.

Las plataformas de simulación basadas en software libre son fácilmente accesibles y habitualmente están disponibles para diversos sistemas operativos, no representando su uso coste económico alguno. Sin embargo, suelen presentar algunos inconvenientes, como son:

*Asunción Santafé Moros, José M. Gozávez Zafrilla, Javier Navarro Laboulais,  
Salvador Cardona Navarrete, Rafael Miró Herrero, Juan Carlos García Díaz*

- Suelen ser buenas para aplicaciones concretas pero pueden presentar prestaciones inferiores en ciertos rangos de aplicación.
- En la mayoría de casos el interfaz es menos amigable o desarrollado.
- Excesiva complejidad de uso en algunos casos.
- Existen numerosas plataformas de simulación con niveles de complejidad, elaboración y pretensiones que hacen difícil su comparación y compatibilidad.

Estos inconvenientes pueden paliarse mediante un mayor conocimiento de las distintas posibilidades de software libre y una mayor formación en las técnicas de uso.

Una formación basada en la filosofía del software libre no sólo permitirá al alumno adquirir competencias específicas de su titulación, sino también rentabilizar profesionalmente las herramientas aprendidas, ahorrando a su vez recursos económicos a las instituciones de enseñanza.

## **2. Objetivos**

Los objetivos principales que nos propusimos con el proyecto se derivaron de una reflexión sobre la utilización que estábamos realizando de la simulación en la enseñanza y fueron los siguientes:

- Establecer metodologías docentes para usar la simulación en el aula de teoría para explicar conceptos y para su uso en el autoaprendizaje.
- Desarrollar metodologías activas basadas en el aprendizaje mediante proyectos de simulación propuestos al alumno empleando software libre o gratuito.
- Abrir la posibilidad de utilizar un amplio abanico de aplicaciones de software que no representan coste para la Universidad y posteriormente para la empresa.
- Mejorar la capacidad de autoaprendizaje del alumno estimulando el uso de programas de simulación.

Adicionalmente y como consecuencia del alcance de estos objetivos se espera el objetivo ético de inculcar a través de la utilización de software libre una transición hacia un modo de vida más economicista que no busque siempre soluciones caras pero de poco esfuerzo.

## **3. Desarrollo de la innovación**

Se realizó un análisis del software comercial que se estaba utilizando en tareas de simulación y se identificó el software libre que podría utilizarse para sustituir en parte el software comercial o para complementarlo. De esta manera se consideraron tres grandes grupos de software:

- I. Software matemático o de programación con carácter generalista útil para realizar cálculos o implementar modelos.
- II. Aplicaciones generales de simulación (simuladores de procesos y de sistemas, programas de multifísica y de Dinámica de Fluidos Computacional).
- III. Programas para cálculos y simulaciones específicas de ingeniería.

Por motivos prácticos, el análisis no podía realizarse sobre toda la ingeniería en general. Por ello, se centró en áreas concretas de la Ingeniería Química, Ingeniería Nuclear y Estadística industrial para poder aplicarlo sobre asignaturas concretas donde los profesores del equipo ASEI impartían docencia. De esta forma se identificaron tres áreas diferentes donde se hacía ya un uso importante de las técnicas de simulación y que, por tanto, resultaban áreas potenciales para una posible introducción del software libre y gratuito. Las áreas y proyectos relacionados fueron los siguientes:

- Simulación de Procesos químicos
  - P1) Evaluación de software libre para Modelado y simulación de Procesos
  - P2) Planteamiento de casos para resolver empleando software libre
- Cinética química y Reactores
  - P3) Utilización en dispositivos móviles de software libre para la resolución matemática de mecanismos cinéticos complejos.
  - P4) Simulación dinámica intuitiva de reactores mediante el software libre SCILAB-XCOS
- Análisis de sensibilidad e incertidumbre
  - P5) Introducción de R y DAKOTA como softwares libres en análisis de códigos computacionales complejos aplicables en la industria nuclear o en campos de la ingeniería donde se emplea la Estadística industrial
  - P6) Desarrollo de scripts para métodos de Montecarlo.

### **3.1. Introducción de software libre en el Área de Simulación de Procesos**

#### *3.1.1. Antecedentes*

En este caso se involucraron las asignaturas “Simulación y Optimización de Procesos Químicos” de 5º de Ingeniero Químico, “Modelización, Simulación y Optimización de Procesos de Membrana y Medioambientales” del Máster de Seguridad Industrial y Medioambiente y “Análisis y Simulación de Procesos” de 3º del Grado en Ingeniería Química de la ETSII y de la EPS-Alcoy.

*Asunción Santafé Moros, José M. Gozávez Zafrilla, Javier Navarro Laboulais,  
Salvador Cardona Navarrete, Rafael Miró Herrero, Juan Carlos García Díaz*

En estas asignaturas se requiere que el alumno se forme en dos aspectos:

- La implementación y resolución de modelos.
- La utilización de programas de simulación de procesos.

Para el primer aspecto resulta fundamental que el alumno adquiera cierta maestría con un software matemático o un lenguaje de programación para la aplicación de métodos numéricos y programación. En nuestro caso hemos utilizado los programas MATHCAD® y MATLAB®, con los cuales hemos desarrollado abundantes ejemplos para los alumnos (Gozávez et al. 2011, Santafé et al. 2013) y que son utilizados por los alumnos en la resolución de problemas prácticos en el laboratorio informático. La elección de MATHCAD vino determinada por su facilidad de uso y por presentar una visualización cercana a la notación matemática convencional. MATLAB es utilizado en nivel de máster por su mayor potencia y por ser más adecuado para los cálculos de ingeniería que los lenguajes de programación de uso general. Además se han creado también objetos de aprendizaje en forma de laboratorios virtuales de simulación o vídeos que ilustran al alumno con ejemplos de aplicación y con los que puede explorar el efecto de los parámetros (Gozávez, 2009 y Santafé, 2009).

Los Simuladores de Procesos son utilizados en situaciones en las que la resolución del problema mediante cálculo y programación es prácticamente inviable. En nuestro caso el software comercial de simulación utilizado CHEMCAD® ofrece licencias a un coste no excesivamente oneroso, pero no facilita el acceso libre a los alumnos, con lo cual éstos no pueden practicar en casa.

### *3.1.2. Evaluación de software libre para modelado y Simulación de Procesos*

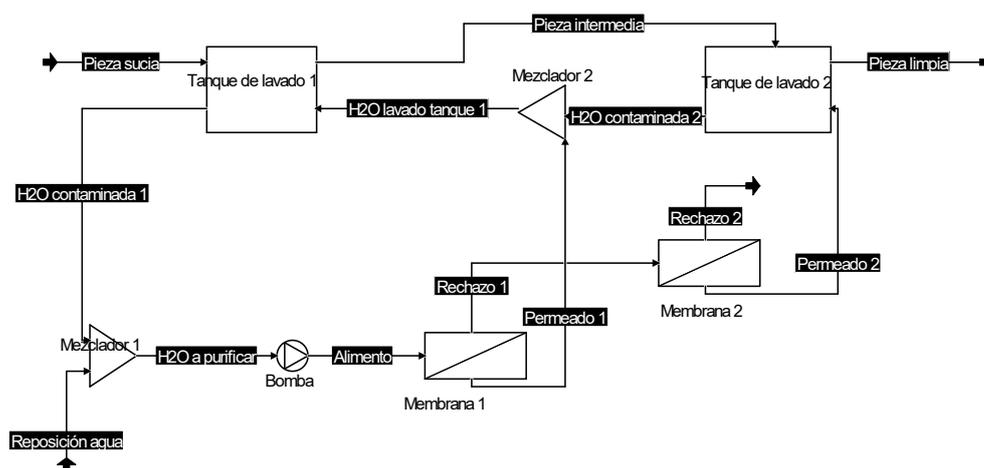
Uno de los temores de los profesores de las asignaturas es que las instituciones universitarias no puedan continuar afrontando el pago de licencias. Por ello, realizamos una búsqueda de alternativas de software libre dentro de las categorías de cálculo y de Simulación de Procesos.

En una primera fase se realizó un análisis exploratorio de posibles candidatos a sustituir el software comercial que estamos utilizando. Nos fue de gran ayuda los siguientes listados (Wikipedia 2012 y 2013). De esta manera en lo que concierne al software matemático, se determinaron SMATH (Smath developers) como alternativa a MATHCAD, OCTAVE (Octave Project) y SCILAB (SCILAB Enterprises) como alternativas a MATLAB, y CALC (Apache OpenOffice) como alternativa a EXCEL de Office.

En lo que concierne a Simuladores de Procesos libres se analizaron inicialmente dos alternativas DWSIM (DWSIM-Wiki) y COCO (Amsterchem-COCO) que en este caso

fueron evaluadas por grupos de alumnos ya formados en el uso del simulador comercial CHEMCAD que usamos actualmente. Como trabajo de curso se le pidió que instalaran el simulador de procesos libre y que trataran de realizar un caso similar a los efectuados en prácticas.

El análisis de los resultados de este trabajo llevó a centrarnos exclusivamente en la opción de COCO (CAPE Open to CAPE open) por parecer más completo. Además, existe un programa de conexión con MATLAB (Amsterchem-connector) que permite la elaboración de modelos de nuevas unidades con MATLAB o SCILAB (Gozálvez et al., 2014). COCO ha sido investigado en más profundidad, pidiéndole a alumnos de buen rendimiento que intentaran resolver un proceso complejo proporcionándoles subrutinas realizadas en MATLAB de determinadas unidades y animándoles a realizar otra (Fig. 1). Además se pidió a los alumnos una evaluación completa de las dificultades que representa frente al programa comercial.



*Fig. 1 Proceso realizado en COCO en colaboración con alumnos*

### *3.1.3. Planteamiento de casos para resolver empleando software libre*

La acción en este caso ha consistido en plantear un problema a los alumnos a través de estas dos variantes:

- 1) Problema sencillo relacionado con ingeniería química sin definir el software a utilizar.
- 2) Problema de nivel profesional que se debe resolver empleando un software libre o gratuito determinado combinado con herramientas comerciales conocidas por el alumno.

*Asunción Santafé Moros, José M. Gozávez Zafrilla, Javier Navarro Laboulais,  
Salvador Cardona Navarrete, Rafael Miró Herrero, Juan Carlos García Díaz*

La primera opción se ha utilizado como propuesta de trabajo de curso para grupos de alumnos. El grupo debe buscar en Internet software que puede ser utilizado para resolver el problema, quedando expresamente prohibido el uso de software comercial craqueado. Posteriormente el grupo recibe asesoramiento del profesor en tres ocasiones, planteamiento, resolución y propuestas de presentación. Finalmente el trabajo es presentado en clase, incluyendo los siguientes puntos: descripción del problema, explicación del software, posibles modelos que utiliza en relación a lo aprendido en teoría y análisis crítico de resultados. Hay que indicar que el profesor conocía al menos una opción de software libre que se podía utilizar, para el caso de que el alumno no fuera capaz de encontrarlo. No obstante, los alumnos eran capaces de localizarlo en la mayor parte de las ocasiones, incluso localizando otro distinto del conocido por el profesor.

En la segunda opción se planteaba un problema común de cierta complejidad a toda la clase y todos los alumnos deben emplear el mismo software. Se daba libertad para utilizar software no necesariamente libre en el análisis de los resultados obtenidos. Este trabajo se realiza de forma práctica a lo largo de varios días y con mínima asistencia del profesor en el uso del software libre el cual deben aprender los alumnos utilizando la ayuda o explorando sus opciones.

Para este tipo de trabajos resultan muy interesantes los programas de organizaciones gubernamentales como la Environmental Protection Agency (EPA) de los EE.UU. y el software de diseño de instalaciones que ofrecen las casas comerciales. Mostramos a continuación dos ejemplos de trabajos propuestos:

- Trabajo ejemplo 1. Usar el software TANKS de la EPA (EPA-USA) para estimar las emisiones de tanques de almacenamiento de hidrocarburo. El hidrocarburo o mezcla de hidrocarburos, así como la localización de la instalación son propuestos por el profesor y diferentes para cada alumno. Emplear información climatológica disponible en la web. Realizar cálculos de dispersión de contaminantes basados en la norma empleando modelos de dispersión gaussiana.

La Fig. 2 corresponde a la pantalla de entrada de datos meteorológicos en el programa Tanks. Estos datos pueden ser obtenidos a través de la web. El alumno añade información química sobre la mezcla, tipo de tanque y régimen de llenado y vaciado y con ello obtiene una estimación de la emisión. La Fig. 3 corresponde al cálculo de la dispersión de contaminante en la dirección del viento predominante empleando los algoritmos de dispersión gaussiana especificados en las normas NTP 327 y 329 que debieron encontrar. Otros alumnos se decidieron por realizar el cálculo en MATHCAD o en MATLAB.

Meteorological

City: Puertollano, Espanya

City: Puertollano State: Espanya

Daily Average Ambient Temperature (F): 60.7 Atmospheric Pressure (psia): 14.50

Month	Daily Maximum Ambient Temp. (F)	Daily Minimum Ambient Temp. (F)	Solar Insulation Factor (Btu / (ft <sup>2</sup> *day))	Average Wind Speed (mph)
JAN	47.5	32.9	524	2.42
FEB	53.1	33.1	918	4.22
MAR	61.2	41.4	1113	5.59
APR	70.2	46.2	1460	5.03
MAY	80.8	55.6	1825	5.4
JUN	88.9	62.4	2027	4.78
JUL	96.3	70.0	2269	4.78
AUG	91.9	64.2	2022	5.28
SEP	84.6	62.4	1535	4.22
OCT	73.9	53.2	966	4.22
NOV	60.6	45.5	572	3.29
DEC	79.8	32.4	406	3.73
ANN	71.6	49.9	1303	4.41

Add New Delete Save Close Help

Fig. 2 Entrada de datos meteorológicos en el software Tanksde la EPA

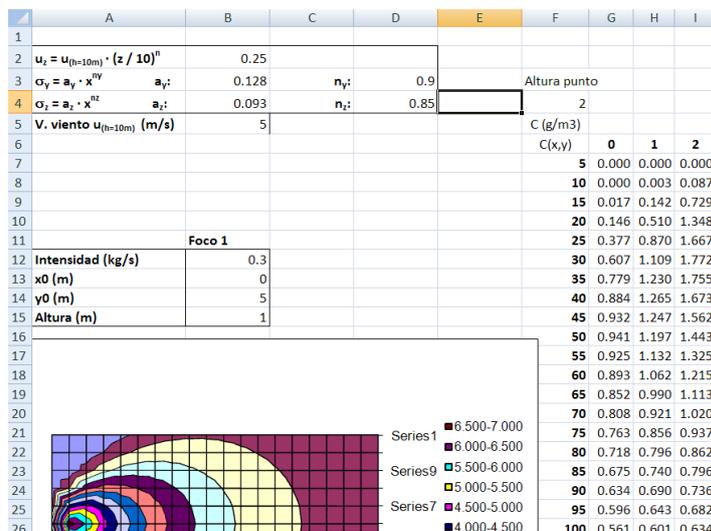


Fig. 3 Cálculo de dispersión gaussiana correspondiente a los datos de emisión calculados con Tanks

- Trabajo ejemplo 2: Diseñar un proceso de membranas empleando software gratuito de casas comerciales, p.e. ROSA® (Dow), IMSDesign® (Hydranautics) o ROPRO®. Se le indica al alumno las características del agua a tratar y la conversión de producto.

Asunción Santafé Moros, José M. Gozávez Zafrilla, Javier Navarro Laboulais, Salvador Cardona Navarrete, Rafael Miró Herrero, Juan Carlos García Díaz

La Fig. 4 representa la pantalla para el cuarto nivel donde se define la configuración del proceso. Los resultados obtenidos (Fig. 5) serán normalmente tratados en EXCEL.

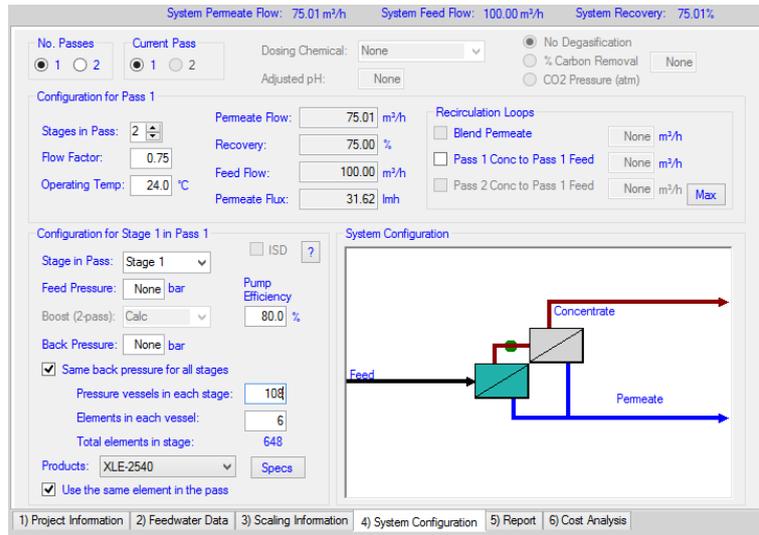


Fig. 4 Pantalla de definición del proceso en el programa de diseño de membranas ROSA

Project Information		Reverse Osmosis System Analysis for FILMTEC® Membranes		ROSA 3.1 CorrigDD v090303_202	
Case-specific		Project: 4 Caso variación membranas+Booster		Case: 1	
System Details				11052013	
11	Feed Flow to Stage 1	100 m³/h	Pass 1 Permeate Flow	75 m³/h	Climate Pressure: Feed
12	Raw Water Flow to Syst.	100 m³/h	Pass 1 Recovery	75 %	Concentrate
13	Feed Pressure	14.33 bar	Feed Temperature	34 °C	Average
14	Flow Factor	0.75	Feed TDS	5000.05 mg/l	Average
15	Chem. Dose	None	Number of Elements	372	Average NBP
16	Total Active Area	2528.37 M²	Average Pass 1 Flux	23.66 l/mh	5.03 bar
17	Water Classification: Well Water SDI < 3				

Stage	Element	MPV	#El	Feed Flow (m³/h)	Feed (bar)	Ratio	Conc Flow (m³/h)	Conc Press (bar)	Perm (m³/h)	Avg Flux (l/mh)	Perm (bar)	Boost (bar)	Perm TDS (mg/l)
1	XLE-2540	118	6	100	13.32	0	35.88	12.26	64.12	34.61	0	0	358.53
2	XLE-2540	44	6	35.88	15.75	0	25	14.23	10.69	15.65	0	4.5	1009.35

Pass Streams (mg/l as CaCO3)		Concentrate		Permeate	
Name	Feed	Adjusted Feed	Stage 1	Stage 2	Total
28	NH4+NH3	0	0	0	0
29	K	0	0	0	0
30	Na	1966.89	1966.89	5229.24	7202.57
31	Mg	0	0	0	0
32	Ca	0	0	0	0
33	Si	0	0	0	0
34	Br	0	0	0	0
35	CO3	0	0	0	0
36	HECO3	0	0	0	0
37	Cl	3033.96	3033.96	8663.95	11202.46
38	F	0	0	0	0
39	NO3	0	0	0	0
40	SO4	0	0	0	0
41	SO2	0	0	0	0
42	Boron	0	0	0	0
43	CO2	0	0	0	0
44	TDS	5000.05	5000.05	13293.21	18511.06
45	pH	7.61	7.61	7.61	7.61

Stage Details		Stage 1		Stage 2		Total	
Element	Recovery	Perm Flow	Perm TDS	Feed Flow	Feed TDS	Feed	Feed TDS
1	0.16	0.16	146.09	0.05	5000.05	13.32	13.32
2	0.17	0.17	305.1	0.1	6062.07	15.75	15.75
3	0.17	0.17	305.1	0.1	6062.07	15.75	15.75
4	0.16	0.16	461.7	0.47	6733.43	12.6	12.6
5	0.14	0.14	721.17	0.4	10391.51	12.5	12.5
6	0.11	0.11	1086.27	0.34	1194.04	12.4	12.4

Fig. 5 Pantalla de resultados del programa de diseño de membranas ROSA

### **3.2. Introducción de herramientas de software libre en Cinética Química y Reactores**

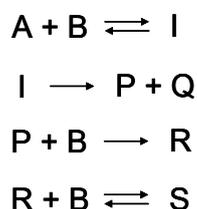
#### *3.2.1. Antecedentes*

La incontenible expansión de dispositivos móviles, vista como una amenaza para el normal desarrollo de las clases, debe ser considerada como una herramienta alternativa docente que posibilite una mayor interacción e investigación por parte del alumno para las actividades concretas a desarrollar en sus asignaturas. Trasladar o desarrollar aplicaciones docentes para estos dispositivos requiere facilitar al usuario (al estudiante) el acceso, la ejecución y entrega de los resultados a través de una plataforma estándar y de libre distribución.

El desarrollo de asignaturas del ámbito de la Ingeniería de Reactores está normalmente limitado por la complejidad de los problemas que pueden ser tratados en el aula. Un ejemplo es la simulación dinámica de reactores químicos, que viene explicada por sistemas de ecuaciones diferenciales ordinarias. SIMULINK es una herramienta de simulación dinámica de MATLAB que ofrece la ventaja, frente a la programación directa, de un entorno gráfico intuitivo en el que se combinan series de bloques que llevan asociados diferentes funciones, desde el cálculo integral o diferencial, a la generación y almacenamiento de datos o la representación gráfica. Una vez modelado el proceso a simular, la construcción del diagrama de bloques es una tarea que los alumnos suelen realizar con relativa facilidad y rapidez, permitiéndoles generar diferentes simulaciones en poco tiempo y analizar el efecto de diversos parámetros sobre la simulación.

#### *3.2.2. Herramientas de manipulación en dispositivos móviles con software de libre distribución*

Con este módulo se genera de forma automática los sistemas de ecuaciones algebraico-diferenciales correspondientes a mecanismos complejos de reacción tales como el mostrado en la Fig. 6 que corresponde a reacciones que se dan en un proceso de desinfección de aguas. Con ello los alumnos son capaces de formular en estos términos la dinámica de las reacciones químicas con pequeñas aplicaciones y pueden comprobar sus resultados inmediatamente.



*Fig. 6. Mecanismo de reacción*

Asunción Santafé Moros, José M. Gozávez Zafrilla, Javier Navarro Laboulais,  
Salvador Cardona Navarrete, Rafael Miró Herrero, Juan Carlos García Díaz

$$v = \begin{pmatrix} -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Toda la información relevante del mecanismo de reacción indicado en la Fig. 6 está contenida en la matriz estequiométrica del sistema (1) (Rawlings, 2002). Se ha desarrollado una herramienta con la plataforma MATHEMATICA que resuelve numéricamente el mecanismo indicado con los objetivos de posibilitar al alumno ejercitarse en la manipulación de mecanismos complejos a partir de sus matrices estequiométricas y de que sea capaz de analizar los resultados obtenidos. Dado que el acceso al programa MATHEMATICA está limitado a la intranet de la Universidad, se está pensando en alojar la aplicación en servidores internos en un Formato de Documento Computable (CDF) (Wolfram) para que los alumnos puedan acceder a la aplicación desde sus dispositivos móviles desde cualquier punto con acceso a internet. Si bien Mathematica es un software comercial, el lector de documentos CDF es de libre distribución e integra toda la capacidad computacional que precisa el documento.

### 3.2.3. Simulación dinámica intuitiva de reactores químicos. Alternativas de software libre

La desventaja de utilizar SIMULINK para la simulación del comportamiento de reactores químicos radica en que forma parte de un software comercial cuyo uso fuera del ámbito de la universidad queda restringido. No obstante, el software libre SCILAB, equivalente a MATLAB, lleva incorporado un simulador dinámico muy similar a SIMULINK, XCOS, cuyo entorno gráfico es muy parecido al de SIMULINK. Aunque en un principio las asignaturas están diseñadas para que los trabajos se realicen en SIMULINK, se ha potenciado que los alumnos también hagan uso de XCOS para simular procesos dinámicos. Para ello tienen que realizar los trabajos utilizando las dos herramientas (SIMULINK y XCOS), contrastando que los resultados obtenidos con ambos programas son idénticos. Uno de los apartados del trabajo consiste en un análisis comparativo entre ambas herramientas, en cuanto a las ventajas e inconvenientes que han encontrado. Es de mucha utilidad el análisis de la valoración que hacen los alumnos al comparar SIMULINK y XCOS. En función de estos resultados se tomará la decisión futura de utilizar sólo XCOS en las clases o seguir con ambas herramientas.

### **3.3. Introducción de herramientas para Análisis de Sensibilidad e Incertidumbre**

#### *3.3.1. Antecedentes*

Hoy día no se concibe la enseñanza de técnicas estadísticas a ingenieros sin la utilización de software estadístico que permita de forma rápida y fiable la realización de complejos cálculos necesarios para la validación de datos experimentales y toma de decisiones cada vez más frecuentes en la industrial moderna. El software estadístico comercial es caro y suele estar accesible sólo a grandes organizaciones como universidades y empresas. Por ello se hace indispensable que el alumno pueda conocer software libre que pueda utilizar en su posterior carrera profesional de forma totalmente accesible y sin coste económico.

En el caso de la Ingeniería Nuclear, muchos de los cursos existentes tienen el objetivo de enseñar Seguridad Nuclear a usuarios avanzados de los programas informáticos o como una herramienta para la investigación (en tesis doctorales, por ejemplo), por tanto el estudiante objetivo es un posgraduado. Pero el número de cursos dedicados a mejorar el currículo técnico en base al uso de códigos computacionales aplicados a la Ingeniería Nuclear es muy limitado (principalmente termohidráulica y neutrónica).

En este trabajo pretendemos proponer al alumno una serie de herramientas estadísticas implementadas en software libre que le permitan llevar a cabo estudios de Análisis de Sensibilidad e Incertidumbre en códigos computacionales complejos.

#### *3.3.2 Enseñanza de R y DAKOTA*

Las acciones llevadas a cabo han sido la introducción de los lenguajes de programación R y DAKOTA como software libre en Análisis de Sensibilidad e Incertidumbre en códigos computacionales complejos aplicables, no sólo en la industria nuclear, sino también en otros campos de la ingeniería. R es un lenguaje y entorno de programación para análisis estadístico y gráfico con posibilidad de cargar diferentes bibliotecas o paquetes con finalidades específicas de cálculo o gráfico. Se trata de un proyecto de software libre, que es actualmente muy utilizado en investigación por la comunidad estadística. Una de las características más sobresalientes de R es su enorme flexibilidad lo que lo hace muy adecuado para el uso del estudiante. DAKOTA es un software que sirve para aplicaciones específicas en el Análisis de Sensibilidad e Incertidumbre. La enseñanza de estas aplicaciones de software constituye un valor en sí mismo pues son de aplicación directa en la vida profesional del alumno.

### *3.3.3. Desarrollo de scripts mediante métodos Montecarlo*

Se han desarrollado scripts que generan mediante métodos Montecarlo simulaciones que son capaces de propagar la incertidumbre de variables y parámetros de entrada de un modelo computacional complejo y estudiar finalmente la sensibilidad de los resultados del modelo a las variables de entrada e identificar de este modo qué variables tienen un mayor impacto en los resultados finales. Para ello se han utilizado dos paquetes específicos para el Análisis de Sensibilidad e Incertidumbre: Package “Tolerance” que provee de funciones para estimar límites de tolerancia para todo tipo de distribuciones, y el Package “Sensitivity” que provee funciones para realizar el análisis de sensibilidad global de las salidas del modelo. Estos scripts son utilizados por los alumnos y se les enseña la capacidad de ampliarlos y modificarlos.

## **4. Resultados**

A continuación se exponen los resultados más relevantes obtenidos en las distintas experiencias.

### **4.1. Resultados de la introducción de software libre en el Área de Simulación de Procesos**

#### *4.1.2. Evaluación de software libre para modelado y Simulación de Procesos*

De la exploración de software libre alternativo, inicialmente muy amplia, se pasó a seleccionar las mejores alternativas de software libre (Tabla 1). En esa misma tabla se incluyen los puntos fuertes y puntos débiles más destacados, pudiéndose concluir lo siguiente:

- EXCEL podría llegar a ser sustituido por la aplicación CALC de OpenOffice, pero aún no resulta necesario.
- En cuanto a MATHCAD, que es nuestra herramienta principal, la única alternativa existente con notación matemática SMATH (Smath) no resulta viable por no disponer de los métodos numéricos que necesitamos. La única solución posible sería evolucionar hacia MATLAB o software libre equivalente, lo cual no es muy deseable pues se pierde la representación simbólica de MATHCAD.
- De las dos opciones para sustituir a MATLAB, OCTAVE podría ser la mejor opción por cuanto su sintaxis es muy similar a la de MATLAB lo que permitiría emplear con pequeñas modificaciones todo el abundante material realizado en ese entorno. No

obstante, SCILAB puede ser adecuado. Respecto de MATLAB ambas opciones pierden sobretodo la facilidad de depuración de errores y asistencia a la programación de la que disponen las últimas versiones.

- En cuanto a los Simuladores de Procesos parece que hay un abismo importante entre las versiones libres y las comerciales, mucho mayor que el existente con el software matemático. Las versiones libres resultaron más dificultosas para los alumnos, lentas y de difícil convergencia. Por otra parte, en el software libre muchas unidades no están implementadas y hay un déficit grande de datos termodinámicos. No obstante, en el caso de COCO la posibilidad de programar unidades en MATLAB se revela una gran ventaja pues permite proponer trabajos en los que el proceso esté ya definido por el ordenador y donde el alumno realiza la programación de una unidad específica. Eso sí, al ser la dificultad mucho mayor, recomendamos emplearlo en asignaturas de Máster.
- En cuanto a los programas de Multifísica y de Dinámica de Fluidos Computacional, existe una opción de software libre OPENFOAM viable a nivel de uso, pero que requiere la preparación de ejemplos elaborados previamente por el profesor para que sean factibles para una sesión de clase.

**Tabla 1. Equivalencias de software para Simulación de Procesos**

<b>Software comercial</b>	<b>Software libre</b>	<b>Puntos fuertes</b>	<b>Puntos débiles</b>
EXCEL	CALC (Open Office)	Muy similar a Excel	Inferior en algunas características
MATHCAD	SMATH STUDIO	Visualización en formato matemático	Faltan métodos matemáticos empleados en las asignaturas
MATLAB	OCTAVE	Sintaxis prácticamente similar a MATLAB	No tiene un equivalente de SIMULINK
MATLAB	SCILAB	Posee XCOS (una toolbox análoga a SIMULINK)	Menos parecido a MATLAB
CHEMCAD	DWSIM	Interfaz gráfica aceptable	Menos potente que Chemcad
	COCO	Posibilidad de implementar nuevas unidades	Menos potente que Chemcad
COMSOL	OPENFOAM	Potente y versátil	Difícil de utilizar

En resumen, en lo que respecta al software de análisis matemático y simulación de procesos, al menos podemos decir que, en el caso de indisponibilidad del software comercial, se podrían cubrir unos mínimos docentes. No obstante, se necesita realizar un esfuerzo importante en la preparación de guías y ejemplos para lograr una sustitución completa.

#### *4.1.3. Planteamiento de casos para resolver empleando software libre*

La realización de proyectos utilizando software libre, ha obtenido muy buenos resultados.

En el caso de la asignatura “Simulación y Optimización de Procesos Químicos” de Ingeniero Químico se aplicó la modalidad de trabajo en grupo en el curso 2012. Los alumnos podían decidir realizar el trabajo o evitarlo dando el porcentaje que representaba al examen (12%). Más del 90% de los alumnos escogió realizar el trabajo, además los alumnos mostraron satisfacción general el día de las presentaciones sobre los trabajos que habían sido capaces de realizar. La gran motivación alcanzada en la mayoría de grupos se explica por la sensación de logro obtenida al poder alcanzar dominio sobre un software antes desconocido y ser capaces de resolver un problema concreto prácticamente por sí mismos. Además, se contribuyó sin duda a la mejora de la interacción grupal y de habilidades de exposición de resultados.

En el caso de la asignatura “Modelización y Optimización de Procesos de Membrana y Medioambiente” donde se experimentó con la modalidad de proyecto más del 90% de los alumnos encuestados consideraron conveniente su introducción. La motivación fue muy alta, asistiéndose de manera generalizada a todas las clases de apoyo a la realización del trabajo. Además, valoraron de forma positiva disponer del software. Solo un porcentaje mínimo de los alumnos no presentó el trabajo (5%).

Podemos considerar que las perspectivas de esta metodología son satisfactorias. Los proyectos con software libre ya van a quedar establecidos como parte fundamental de la asignatura “Modelización y Optimización de Procesos de Membrana y Medioambiente” y en la nueva asignatura del Máster de Ingeniero Químico “Modelización y Optimización de Procesos Químicos” que sustituye a “Simulación y Optimización de Procesos Químicos”.

## **4.2. Resultados de la introducción de herramientas de software libre en Cinética Química y Reactores**

### *4.2.1. Resultados y perspectivas*

Considerar una alternativa como el formato CDF es atractivo por cuanto permite desarrollar aplicaciones potentes trasladables inmediatamente a diferentes entornos y sistemas operativos (MSWindows, Mac o Linux).

Los resultados derivados de la utilización de SIMULINK y XCOS han sido muy satisfactorios por cuanto que el alumno interioriza con facilidad la modelización de la dinámica de reactores. Esto es especialmente interesante en alumnos sin destrezas de programación plenamente desarrolladas. Adicionalmente, estas herramientas permiten explorar el comportamiento de sistemas no lineales y su correspondiente equivalente linealizado, lo cual es también de interés para el desarrollo de las materias relacionadas con el Control de Procesos.

## **4.3. Resultados de la introducción de herramientas para Análisis de Sensibilidad e Incertidumbre**

### *4.3.1. Resultados*

Se ha constatado que el alumno de nivel de máster y doctorado posee capacidad suficiente para la utilización de estas aplicaciones de software avanzadas.

El hecho de proporcionar al alumno herramientas que va a poder utilizar directamente en su vida profesional ha constituido un elemento de motivación muy importante.

### *4.3.2. Perspectivas*

La utilización de software estadístico libre está cada vez más extendida en la comunidad científica internacional proporcionando herramientas estadística avanzadas en tiempo casi real a los potenciales usuarios mucho antes que cualquier software comercial que además supone grandes inversiones. Por todo ello el futuro ingeniero va a poder contar con herramientas estadística ilimitadas totalmente accesibles, mantenidas y mejoradas por una comunidad científica sin ánimo de lucro.

## **5. Conclusiones**

Hemos presentado tres áreas de la ingeniería diferentes donde se ha aplicado software libre en la enseñanza, habiéndose observándose diferencias en función del nivel del alumnado y del tipo de aplicación.

Una de las limitaciones para implantar el software libre es que muchas veces las interfaces de las versiones libres en desarrollo no son tan atractivas como la del software comercial, lo cual requiere un esfuerzo adicional por parte del profesorado para clarificar el uso del entorno.

En un futuro cercano se tendrá que propiciar los métodos de aprendizaje a partir de dispositivos móviles, ampliamente utilizados por los alumnos.

En general, podemos decir que el software libre es cada vez más potente y que un futuro cercano podría llegar a cubrir por sí solo la mayor parte de las necesidades docentes, quedando el software comercial para cubrir necesidades específicas en la vida laboral.

## **Agradecimientos**

Los miembros del grupo ASEI agradecen a Vicerrectorado de Estudios y Convergencia Europea y al Instituto de Ciencias de Educación de la Universitat Politècnica de València la concesión del PIME A20-11 “*Utilización de herramientas de simulación en software libre como metodología de bajo coste para aumentar el rendimiento de la enseñanza (SIMULIB)*”

## **Referencias**

- AMSTERCHEM-COCO “Página de descarga del simulador COCO” <<http://www.cocosimulator.org/>> [Consulta : 11 de junio de 2014]
- AMSTERCHEM-CONNECTOR “Página de descarga de MATLAB-CAPE Open y SCILAB-CAPE Open” <<http://www.amsterchem.com/downloads.html>> [Consulta : 11 de junio de 2014] [institucional]
- APACHE OPENOFFICE “Página oficial de Open Office” <<http://www.openoffice.org/>> [Consulta : 11 de junio de 2014]
- ASEI (2012) “Constitución del blog ASEI” <<http://asei.blogs.upv.es/>> en ASEI (EICE de la UPV) [Consulta : 11 de junio de 2014]

*Experiencias de aplicación de la simulación empleando software libre y gratuito en la enseñanza de las ingenierías de la rama industrial*

- DOW “Página de descarga del software ROSA (Reverse Osmosis System Analysis) de Dow-Filmtec”  
<[http://www.dowwaterandprocess.com/en/resources/rosa\\_system\\_design\\_software](http://www.dowwaterandprocess.com/en/resources/rosa_system_design_software)> [Consulta : 11 de junio de 2014]
- DWSIM-WIKI “Página de descarga del software de Simulación de Procesos DWSIM”  
<[http://dwsim.inforside.com.br/wiki/index.php?title=Main\\_Page](http://dwsim.inforside.com.br/wiki/index.php?title=Main_Page)> [Consulta : 11 de junio de 2014]
- EPA-USA “Página de descarga de l software Tanks 4.09 y recomendaciones para Windows 7 o sistema superior” <<http://www.epa.gov/ttnchie1/software/tanks/>> [Consulta : 11 de junio de 2014]
- GOZÁLVEZ ZAFRILLA, J.M., SANTAFÉ MOROS, A. (2008) “Enseñanza de la simulación de procesos de membrana mediante objetos de aprendizaje y herramientas de cálculo”. *V Congreso Iberoamericano de Docencia Universitaria - Enseñar y aprender en la enseñanza del siglo XXI*. Valencia
- GOZÁLVEZ ZAFRILLA, J.M. (2009) “Objetos de aprendizaje (localizables en buscador)” <<http://riunet.upv.es/discover>> [Consulta : 11 de junio de 2014]
- GOZÁLVEZ ZAFRILLA, J.M. y SANTAFÉ MOROS, A. (2011). *Análisis y simulación con MATHCAD y MATLAB de procesos de parámetros globalizados*. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València
- GOZÁLVEZ ZAFRILLA, J.M., SANTAFÉ MOROS, A., SANCHIS, M., GOMIS, J. (2014) “Implementation of membrane models on a CAPE-open tool to simulate a process including reverse osmosis stages” *Iberoamerican Conference on Membrane Science and Technology (CITEM 2014)*. Santander : Universidad de Cantabria. 168-169
- HYDRANAUTICS “Página de descarga de IMSDESIGN”  
<<http://www.hydranautics.com/index.php?pagename=imsdesign>> [Consulta : 11 de junio de 2014]
- OCTAVE PROJECT “Página oficial del proyecto GNU Octave” <<http://www.gnu.org/software/octave/>> [Consulta : 11 de junio de 2014]
- RAWLINGS, J.B., EKERDT, J.G (2002). “Chemical reactor analysis and design fundamentals”. Madison (EEUU): Nob Hill Pub
- SANTAFÉ MOROS, A. (2009) “Objetos de aprendizaje (localizables en buscador)” <<http://riunet.upv.es/discover>> [Consulta : 11 de junio de 2014]
- SANTAFÉ MOROS, A., GOZÁLVEZ ZAFRILLA, J.M. y J. LORA (2013). *Cálculo de operaciones de separación con MATHCAD*. Valencia : Editorial Universitat Politècnica de València (versiones en papel y en e-book)
- SCILAB ENTERPRISES “Página oficial del proyecto SCILAB” <<http://www.SCILAB.org/>> [Consulta : 11 de junio de 2014]
- SMATH DEVELOPERS “Página oficial Smath Studio” <<http://smathstudio.com/>> [Consulta : 11 de junio de 2014]

*Asunción Santafé Moros, José M. Gozávez Zafrilla, Javier Navarro Laboulais,  
Salvador Cardona Navarrete, Rafael Miró Herrero, Juan Carlos García Díaz*

WIKIPEDIA (2012) “Listado de simuladores de procesos químicos”

<[http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_chemical\\_process\\_simulators](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_chemical_process_simulators)> [Consulta : 11 de junio de 2014]

WIKIPEDIA (2013) “Listado de software de análisis numérico”

<[http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_numerical\\_analysis\\_software](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_numerical_analysis_software)> [Consulta : 11 de junio de 2014]

WOLFRAM “Página oficial de Wolfram-Mathematica” <<http://www.wolfram.com/cdf-player/>> [Consulta : 11 de junio de 2014]