

DISEÑO DE UN SIMULADOR DE PROCESOS QUÍMICOS PARA USO COLABORATIVO Y DIDÁCTICO

AUTORES: Susana Martínez Riachi¹

Maximiliano Duarte²

Julián Andrés Scortechini³

DIRECCIÓN PARA CORRESPONDENCIA: Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales (FCEFN). Universidad Nacional de Córdoba (UNC). Argentina. E-mail: susanamartinezriachi@gmail.com

Fecha de recepción: 11-01-2014

Fecha de aceptación: 20-03-2014

RESUMEN

En muchas carreras de ingeniería química, los estudiantes aprenden a utilizar simuladores comerciales, por lo tanto el futuro ingeniero depende de ellos. En vez de usar un "paquete cerrado" sin conocer su principio de funcionamiento, es necesario realizar esfuerzos para diseñar un software de código abierto capaz de conectar operaciones unitarias, con módulos estándar para resolver las operaciones básicas de ingeniería química y lo suficientemente versátil para la incorporación de nuevos módulos de terceros (plugin), con un complemento opcional y educativo, definido por el desarrollador. El objetivo es crear una plataforma para fines académicos o industriales con documentación colaborativa a través de un Wiki, con mención de los créditos para los participantes, dada por un Comité científico tecnológico nombrado ad hoc. Habrá foros de ayuda y discusión. *Lazarus* se propone como herramienta de desarrollo, debido a su alta velocidad de cálculo y por ser multiplataforma. El análisis se realizará usando UML.

PALABRAS CLAVE: simuladores; abierto; operaciones unitarias; versátil; Lazarus

DESIGN OF A SIMULATOR OF CHEMICAL PROCESSES FOR COLLABORATIVE AND DIDACTIC USE

ABSTRACT

In many chemical engineering careers, students learn to use commercial simulators; therefore the future engineer depends on them. Instead of using

¹ Máster en Docencia Universitaria. Ingeniera Química. Docente Investigador Categoría II. FCEFN. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina.

² Analista de Sistemas. Profesor del Centro Educativo Santo Domingo. E-mail: maximiliano.duarte@gmail.com

³ Estudiante avanzado de la carrera de Ingeniería Química. FCEFN. Universidad Nacional de Córdoba. E-mail: jscortechini2012@gmail.com

a "closed package" without knowing its principle of operation, it is necessary to make efforts to design an open source software able to connect unit operations, with standard modules for solving chemical engineering basic operations and versatile enough for the incorporation of new third party modules (plugin), with an optional and educational complement, defined by the developer. The goal is to create a platform for either academic or industrial purposes with collaborative documentation through a Wiki, with mention of credits for the participants, given by a technological Scientific Committee appointed ad hoc. There will be help and discussion forums. Lazarus is proposed as development tool, due to its high speed of calculation and for being cross-platform. The analysis will be carried out using UML.

KEYWORDS: simulators; open source; unit operations; versatile; Lazarus

INTRODUCCIÓN

Ante un nuevo orden mundial, la globalización de la economía, avances vertiginosos en la ciencia, la tecnología, las comunicaciones y la información, cambios que afectan los sistemas de producción y la organización social de los países, el mundo laboral se muestra particularmente exigente y requiere profesionales con conocimientos, instrumentaciones, actitudes y valores acordes a estas exigencias. Éstas, por ende, son transferidas por vía curricular al proceso de formación de profesionales; por lo que las instituciones creadas con estos fines deben experimentar también una revolución en las formas y métodos para dirigir el aprendizaje de los estudiantes (Arias Labrad, L)

DESARROLLO

El empleo de la simulación en el proceso de formación de profesionales tiene sus particularidades, dadas en la explotación de simulaciones que modelan actividades de aplicación, preferiblemente incluyendo la presencia de instrumentos virtuales (Martín Rodríguez, A., et. al., 2001), funcionamiento de circuitos, dispositivos, procesos productivos, etc., con vistas a potenciar la actuación de los futuros profesionales conforme a los requerimientos de su futuro contexto laboral.

La simulación es "El estudio de un sistema o sus partes mediante manipulación de su representación matemática o de su modelo físico" (Himmelblau et al., 1976). La simulación es, entonces, una forma de abordar el estudio de cualquier sistema dinámico real en el que sea factible poder contar con un modelo de comportamiento y en el que se puedan distinguir las variables y parámetros que lo caracterizan (Ruiz Gutiérrez, J. M.). Así, modelizar es un proceso cognitivo que tiene como resultado una construcción conceptual, la cual constituye "una interpretación abstracta, simplificada e idealizada de un objeto del mundo real, de un sistema de relaciones o de un

proceso evolutivo que surge de una descripción de la realidad" (Henry, 1997).

Desde el punto de vista de la didáctica, la simulación "... resume toda la teoría relacionada con el proceso en el cual se sustituyen las situaciones reales por otras creadas artificialmente... y de las cuales el estudiante debe aprender ciertas acciones, habilidades, hábitos, etc., que posteriormente deberá transferir a la situación de la vida real con igual efectividad" (González Castro, V., 1990). Para este autor, la misma intenta romper la diferencia que hay entre el aprendizaje de conceptos en el ámbito teórico y su transferencia a situaciones prácticas. O sea que considera la simulación como una actividad en la que el estudiante no acumula información teórica, sino que la lleva a la práctica, con lo cual ésta se identifica con el entrenamiento puramente dicho.

La simulación, por tanto, se constituye en una estrategia válida tanto para la formación de conceptos y construcción en general de conocimientos, como para la aplicación de éstos a nuevos contextos a los que, por diversas razones, el estudiante no puede acceder desde el contexto metodológico donde se desarrolla su aprendizaje. De hecho, "buena parte de la ciencia puntera, de frontera, se basa cada vez más en el paradigma de la simulación, más que en el experimento en sí..." (Pozo, et. al, 2001).

Por otra parte, en los últimos años ha crecido la oferta de programas computacionales comerciales para simular el comportamiento de diferentes sistemas y procesos en ingeniería. En el área de la ingeniería química, estos programas enlatados, conocidos como "simuladores" han avanzado a pasos agigantados principalmente debido a tres aspectos; a) Computadoras con procesadores de mayor velocidad, interfaces gráficas que facilitan el manejo de gráficos, almacenamiento de gran cantidad de datos. b) Lenguajes de programación estructurados que facilitan que con pocas sentencias se realicen de forma más eficiente la solución de sistemas de ecuaciones. c) El desarrollo de modelos para el cálculo de propiedades de mezclas y componentes con menor desviación respecto a los datos obtenidos experimentalmente.

Los experimentos realizados en planta piloto se utilizan para obtener un modelo integral, ajustar parámetros y/o validar los resultados obtenidos al resolver el modelo o la simulación en sí. No se requiere una gran cantidad de experimentos reales, ya que si el modelo utilizado es el adecuado, la reproducibilidad de resultados puede ser muy buena.

Los modelos de simulación en el área de la ingeniería química producen una resolución factible de las ecuaciones de balance de materia y energía para procesos químicos en estado estacionario o dinámico; así como del dimensionamiento y la obtención de costos de los equipos involucrados en un proceso.

El reto del diseño tecnológico para el desarrollo de nuevos procesos y mejora de los existentes fue la principal motivación para el avance en la simulación de procesos. El comienzo fue lento y se dio en forma conceptual, experimental y académica en algunas compañías y universidades de Estados Unidos, Canadá y Europa. Entre los años 1966 y 1968, aparecieron los primeros paquetes de simulación de procesos, encaminados a la realización de balances de materia y de energía para redes de procesos en estado estacionario. Los primeros paquetes medianamente difundidos fueron el PACER y el CHESS (desarrollados en universidades norteamericanas) y el FLOWTRAN (desarrollado por Monsanto). Durante la década de los años setentas se presentó una evolución importante para alcanzar mayor estabilidad, sofisticación de cálculos y versatilidad; se refinaron los modelos de estimación de propiedades fisicoquímicas, etc. Aparecieron los paquetes CONCEPT y SYMBOL (de la firma CADCO), CHEMSHARE, CHEMTRAN y FLOWTRAN (de Monsanto), PROCESS (de Simulation Science), PROSPRO (del Instituto INTEC) y además otros como GEMCS, GEPOS, PDA y FLOWPACK. A finales de los 80's se inició el desarrollo de paquetes de simulación interactivos (Chemcad, Microchess, Hysim, Hysis, Aspen, etc.) y su comercialización marcó el comienzo de un uso más intensivo y generalizado en la industria y en la universidades.

La metodología de trabajo de los simuladores de procesos puede dividirse según la filosofía bajo la cual se plantea el modelo matemático que representa el proceso a simular; a) Simuladores globales u orientados a ecuaciones. b) Simuladores secuenciales modulares. c) Simuladores híbridos o modular secuencial-simultaneo.

Bajo el enfoque de la simulación global u orientada a ecuaciones, se plantea el modelo matemático que representa al proceso construyendo un gran sistema de ecuaciones algebraicas que representa a todo el conjunto o planta a simular. De esta forma el problema se traduce en resolver un gran sistema de ecuaciones algebraicas, por lo general altamente no lineales. El principal problema asociado a la filosofía de resolución global u orientada a ecuaciones es la convergencia del sistema y la consistencia de las soluciones que se encuentran, ya que pueden producir múltiples soluciones.

Los simuladores modulares secuenciales se basan, en módulos de simulación independientes que siguen aproximadamente la misma filosofía que las operaciones unitarias, es decir, cada equipo (bomba, válvula, intercambiador, reactor, etc.) es diseñado a través de modelos específicos; además, el sentido de la información coincide con el "flujo físico" en la planta. En esta filosofía se tiene como ventaja el hecho que cada sistema de ecuaciones es resuelto con una metodología que resulta adecuada para el mismo, ya que es posible analizar bajo todas las circunstancias posibles el

comportamiento del método de resolución propuesto, esto es, sistemas ideales, no ideales, topologías diversas del equipo, distintas variantes, etc.

Un caso interesante de analizar es el de CHEMCAD; este software nace en 1984 cuando un profesor universitario formó un equipo para desarrollar un simulador de procesos para computadoras personales PC.

Los simuladores híbridos son aquellos que se forman de combinar la estrategia modular y la orientada a ecuaciones de forma tal de aprovechar los aspectos positivos de ambas metodologías lo máximo posible.

Sin embargo hay simuladores no secuenciales, utilizan un concepto bidireccional de la información, ya que el flujo de información va en dos direcciones (hacia delante y hacia atrás). De esta forma, pueden calcular las condiciones de una corriente de entrada a una operación a partir de las correspondientes a la corriente de salida sin necesidad de cálculos iterativos; esto hace que sean mucho más flexibles y se asemejen más a los problemas reales de un proceso de la industria química, donde se dispone de algunos datos separados, no siempre factibles de ser ubicados para la resolución secuencial de los equipos.

En estos problemas de programación matemática convergen diversas corrientes del saber, como es el análisis de los métodos numéricos para la solución de ecuaciones tanto algebraicas como diferenciales, el modelado de procesos, operaciones unitarias y fenómenos de transporte, estimación de propiedades fisicoquímicas, cálculos de balance de materia y energía, etc.

Es interesante citar a uno de los señalamientos realizados por la Federación Europea de Ingeniería Química (EFCE) en su relevamiento basado en consultas a 28 importantes empresas químicas o empleadoras de Ingenieros Químicos, y que fue publicado en *Ind. Eng. Chem. Res.* 2010, 49, 11131–11141: "¿Cuál es el papel de la educación en la modelación termodinámica de procesos y diseño de productos? Hay un claro acuerdo entre los participantes en la encuesta que la educación es la clave para un uso adecuado de la termodinámica en la industria. Tres diferentes niveles de educación son relevantes en este contexto, cada una con diferentes requisitos. En la educación de pregrado es esencial que los ingenieros que operan en las empresas posean algunos conocimientos básicos de la termodinámica, pero aún más importante es que sean conscientes de las limitaciones de su comprensión. Esto es especialmente relevante como el tipo de simuladores de caja negra que se utilizan habitualmente en estos días".

No se encuentran aún simuladores de procesos químicos abiertos que sigan una filosofía sistémica de resolución basados en la generación de redes de operaciones que describen un proceso químico, y que obtenga una resultante emergente de la actuación conjunta de los mismos y de la incidencia que la

red tiene sobre una operación en particular, al trabajar conjuntamente. Esto indica la necesidad de destinar esfuerzos en el logro del diseño de un software capaz de realizar acoplamientos sistémicos de operaciones unitarias.

Importancia del proyecto

Actualmente muchas carreras de Ingeniería Química tienen en sus diseños curriculares el aprendizaje del uso de algunos de los simuladores comerciales más conocidos. Esto trae como consecuencia que el futuro ingeniero sale preparado para tener una relación de dependencia respecto del uso de simuladores, además de ser prácticamente un técnico que utiliza un "paquete cerrado", no conociendo su principio de funcionamiento.

La construcción de un software capaz de simular y modelar tanto operaciones unitarias como el acoplamiento sistémico de los mismos para el desarrollo de un proceso industrial es de sumo interés para el desarrollo de asignaturas de la carrera de Ingeniería Química, es por ello que debe ser planteado desde una perspectiva académica didáctica. Este software está orientado a la adquisición de capacidades de los estudiantes de ingeniería para modelar y simular operaciones unitarias desde un enfoque sistémico que colabore con la comprensión del comportamiento general de los procesos industriales complejos. Además, se favorece la efectiva integración de conocimientos de asignaturas.

Así también se espera consolidar el trabajo colaborativo e interdisciplinario entre estudiantes y docentes de Ingeniería Química de universidades de diversos países, para lo cual es menester constituir una red de comunicación entre los investigadores involucrados en el proyecto, pertenecientes a diferentes asignaturas y universidades.

Es necesario destinar esfuerzos en el diseño de un software que realice acoplamientos sistémicos de operaciones unitarias, que sea open source, con módulos estándares de resolución de operaciones básicas de IQ y con versatilidad en la incorporación de nuevos módulos de operaciones (plugin) de terceros, con un complemento didáctico opcional, definido por el desarrollador. Se busca una plataforma con objetivos académicos, con documentación colaborativa mediante una Wiki, con mención de créditos para los participantes, otorgada por un comité científico tecnológico designado ad hoc. Contará con foros de ayuda y de debates.

Finalmente, consolidar objetivos comunes entre distintas carreras universitarias es una situación poco usual; las experiencias exitosas en este asunto favorecerán la confianza para alentar la formación de grupos interdisciplinarios.

Avances

Los proyectos interdisciplinarios tienen una carga extra relacionada con las diferencias de formación y lenguajes utilizados para comunicarse entre los distintos especialistas involucrados. La creencia de no poder interactuar en temáticas en las que no se es un experto, lleva a decidir apresuradamente a no participar de los mismos. En este sentido, resulta bastante difícil completar un equipo plural que genere una sinergia en el desarrollo del mismo.

Sin embargo, hubo una muy buena acogida de parte de los estudiantes de Ingeniería Química para participar. Se realizaron encuestas y entrevistas semiestructuradas en donde se evidenció la falta de conocimiento del tema, a pesar de ser conscientes que es una temática que no puede ser ignorada por los futuros ingenieros, ya que, siendo ellos "nativos informáticos", no dudan que cada vez más se da el uso cotidiano de herramientas computacionales para resolver los problemas y dar respuestas a quienes lo solicitan; desde un simple procesador de texto o una planilla de cálculo, pasando por el uso de utilitarios matemáticos más potentes y sofisticados, y llegando a los simuladores de procesos.

Se realizaron preguntas genéricas como qué piensan que es un simulador de procesos, para qué se usan, cuáles son las ventajas y desventajas de su uso, entre otras; y otras más específicas como el empleo de simuladores de manera didáctica en el aula, y si opinan que los estudiantes e ingenieros químicos están capacitados para comprender y diseñar un simulador.

Algunas de las respuestas mencionan que para fines didácticos los simuladores son una herramienta muy poderosa, ya que permiten diseñar distintos procesos, observar cómo se aplican distintas leyes químicas a través de distintas operaciones, etc., y son muy utilizados en la resolución de problemas reales.

Acotaron que trabajar con componentes dinámicos (por la versatilidad para redefinir los problemas y buscar nuevas soluciones), seguramente incentivará a los estudiantes en sus instancias de aprendizaje, aumentará el interés por comprender más profundamente los conceptos y contenidos curriculares, y llevará a fomentar el mayor uso de la computadora. Son conscientes que no tendrían que disponer sólo del lápiz, papel y calculadora para resolver los problemas básicos de ingeniería, ya que no serán los instrumentos a utilizar en la industria o en investigación cuando ellos se desarrollen como profesionales.

Para la pregunta: ¿En qué cambiaría en el aprendizaje de los alumnos usar o no el simulador?, respondieron que al estudiarse los procesos de producción en un diagrama de flujo, se da una idea general de cómo funciona el mismo pero si a esto lo pudiéramos hacer en un simulador, se podría conocer mejor

el comportamiento de dicho proceso. Sería una herramienta muy útil ya que puede estimular al estudiante a diseñar su propio proceso y poder ver los resultados de ese diseño.

Cito una de las respuestas de un estudiante frente a la pregunta: Cómo futuros ingenieros químicos, ¿estamos capacitados para comprender y diseñar nuevos simuladores de procesos químicos? - "Cuándo leí el llamado de la ayudantía me interesó y "sorprendió" que como ingenieros químicos podamos diseñar simuladores, y no sólo utilizarlos. Creo que es importante que conozcamos que estamos capacitados para diseñar. Obviamente, trabajando en conjunto y dispuestos a investigar. Si se aplica por ejemplo el uso de simuladores para resolver algún problema en clase, me parece que sería importante que los alumnos sepamos que como futuros ingenieros estamos en condiciones de realizar este tipo de diseños."

Por otro lado, dado que para muchos problemas todavía es más efectiva la resolución gráfica, debido a la no idealidad y a la gran cantidad de datos experimentales que se dispone en forma de tabla, se logró diseñar una aplicación para resolver casos de columnas de destilación de platos por el método de Ponchon Savarit. Esto abre un abanico de posibilidades de diseño de aplicaciones para la resolución de separaciones de mezclas multicomponentes, entre otras resoluciones gráficas.

Se muestra a continuación la captura de imágenes de dicha aplicación donde se puede apreciar la versatilidad del modo de introducción de datos y la demostración didáctica del método mencionado, realizado a través de Autocad, sin necesidad de tener que generar las propias gráficas de curva de equilibrio, entalpías de líquido y vapor de la mezcla, y la engorrosa traza de rectas entre los dos gráficos para la determinación del número de platos teóricos, ubicación del plato de alimentación, etc.

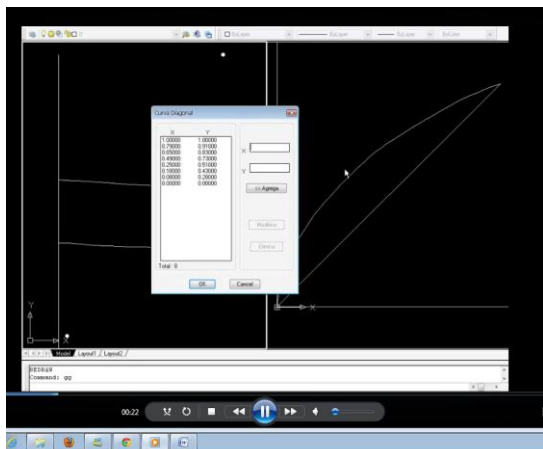


Figura 1. Caso de llenado de datos a partir de tablas con datos de equilibrio líquido-vapor en función de la fracción molar de uno de los componentes de una mezcla binaria para la confección de la gráfica correspondiente.

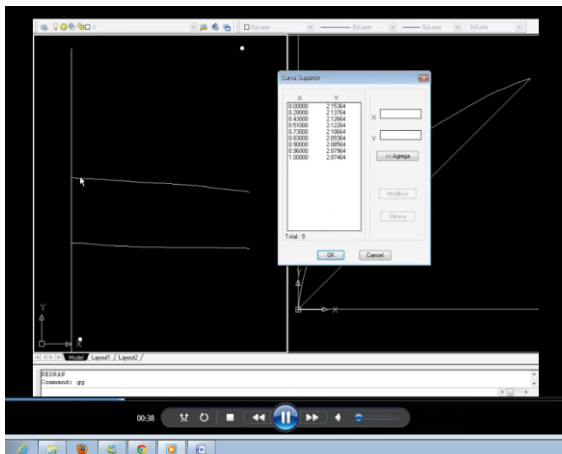


Figura 2. Caso de llenado de datos a partir de tablas de entalpías de líquido y de vapor de una mezcla binaria para la confección de la gráfica correspondiente.

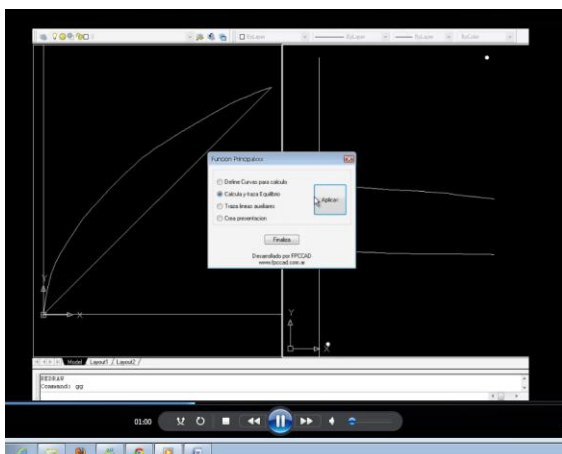


Figura 3. Inicio de la aplicación del método de Ponchon Savarit para la resolución de la destilación en una columna de platos.

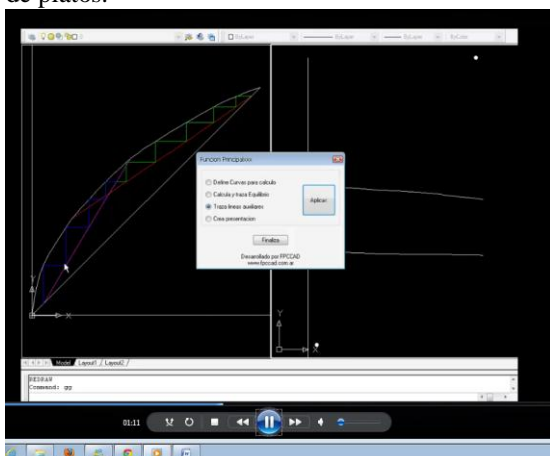


Figura 4. Resultado de la aplicación del método de Ponchon Savarit para la resolución del número de platos de la columna

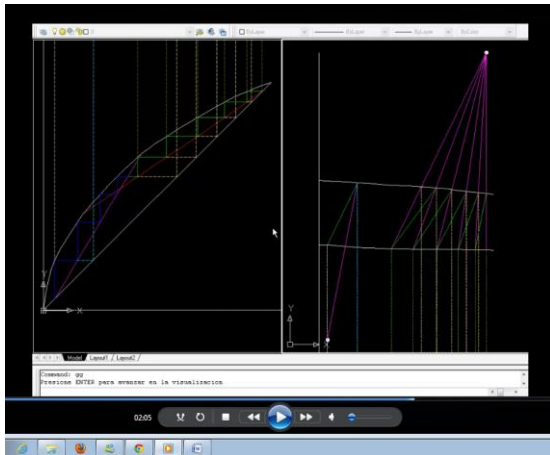


Figura 5. Muestra didáctica de la aplicación del método de Ponchon Savarit.

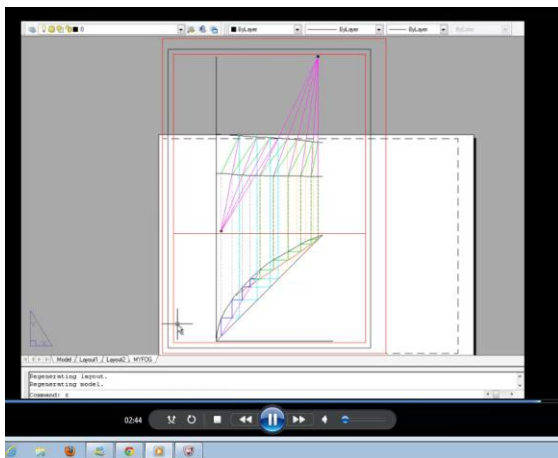


Figura 6. Imagen final de la estrategia de aplicación del método de Ponchon Savarit.

En referencia a la elección del diseño de un simulador abierto con recurso Wiki, podemos afirmar que el uso de software de código abierto es la metodología más acertada para el fin que queremos obtener, una herramienta comunitaria que permita el desarrollo y uso en universidades, permitiendo la colaboración mundial. Lazarus, Postgres, Firebird, por nombrar algunas, son herramienta Open Source, así como otras herramientas que permite la formación de empresas que prestan servicios y colaboran en la mejora continua.

Al permitir la colaboración desde distintos usuarios, se debe coordinar las mejoras y los cambios. Esto no limita el uso, sino que dota al desarrollo de estabilidad y prestigio mediante homologaciones de universidades o entidades reguladoras.

¿Donde se alojará el programa? Existen varios sitios de alojamiento, como SourceForge, GitHub, Google Code, que dan la posibilidad de llevar el control de versiones, colaboradores, publicación y página web de presentación, y seguimiento de errores. Además de redundancia de datos para evitar la

pérdida de los programas fuentes. La elección de alguno de estos servicios, dependerá de las licencias y el tipo de software que puedan alojar.

Como herramienta de desarrollo se propone Lazarus, por el alto poder de cálculo, velocidad, y ser multiplataforma. Es una herramienta de desarrollo rápido de aplicaciones (RAD) basada en el lenguaje de programación Object Pascal, el cual está disponible para los sistemas operativos Windows, GNU/Linux y Mac OS X, Unix, Androide. Se trata de una alternativa libre y gratuita a Delphi, desarrollada como proyecto de software libre a partir de Free Pascal. Dispone de una excelente documentación y traducciones a varios idiomas.

¿Porque usar Lazarus? Además de lo mencionado anteriormente y a muchos les parecerá antiguo, comparado a lenguajes más modernos como Python, pero la diferencia en potencia de cálculos y el poder generar código maquina nativo, permite producir aplicaciones veloces. Pascal es un lenguaje antiguo desarrollado para ser fácil de aprender, y tan potente como C.

Como esta aplicación está orientada a Estudiantes de Ingeniería Química, el uso de lenguajes complejos restringiría el aporte tan sólo a programadores.

Aunque el software Lazarus está licenciado bajo la GPL, el software desarrollado mediante el uso de esta herramienta puede ser distribuido bajo alguna otra licencia. La biblioteca de componentes de Lazarus (LCL) se vincula estáticamente dentro de los programas y es licenciada usando una versión modificada de la LGPL diseñada especialmente para permitir vinculaciones estáticas a programas propietarios. Traducido esto dice que nuestro RAD, permite que podamos vender, compartir o ceder nuestra aplicación sin pagar licencias por la Herramienta. Esto, con el uso de una Herramienta privativa, se debería pagar un canon por cada aplicación generada y vendida.

El análisis será mediante UML. El Lenguaje de Modelado Unificado incluye un conjunto de técnicas de notación gráfica para crear modelos visuales de software orientado a objetos de sistemas intensivos.

Desde el principio de la simulación, la propagación de la información será hacia delante y hacia atrás, a través del diagrama de flujo. Esto da flexibilidad en la resolución y permite comenzar a especificar un problema desde el lugar más conveniente sin tener que preocuparse acerca de las secuencias de cálculo específicos, que es la forma más real de cómo se presentan los problemas de ingeniería.

La plataforma debe asegurar independencia de la interfaz, con respecto al proceso de cálculo. Esto permite que otros desarrolladores incorporen mejoras y ampliaciones de modelos de cálculo.

CONCLUSIONES

Nuestras universidades cuentan con especialistas en modelado y simulación, sin embargo, la falta de una amplia difusión de herramientas de simulación de bajo costo hace que no haya mayor desarrollo en estos temas. Si agregamos ahora la incorporación de software de código abierto, donde se encuentran herramientas que han demostrado su robustez y confiabilidad, estamos convencidos que podremos contar con el aporte valioso de mucha información existente y no sistematizada.

Es muy largo el camino que nos queda, pero estamos convencidos que la búsqueda de soluciones para informatizar y mejorar el proceso de enseñanza y de aprendizaje en las carreras de Ingeniería Química es el gran desafío que tenemos que afrontar, logrando una gran sinergia de nuestras potencialidades actuales.

BIBLIOGRAFÍA

ARIAS LABRAD, L. en: <http://www.ilustrados.com/tema/3575/simulacion-computarizada-proceso-ensenanza-aprendizaje-Electronica.html>. búsqueda: 18/11/2011

BOGOYA M., D. en http://www.ing.unal.edu.co/catedras/trabajar_ciencia07/documentos/soportemodelacionySimulacionMatingeneriaquimica/modelamientoySimulacionProcesosQuimicos_Texto.pdf. búsqueda: 18/11/2011

GONZÁLEZ CASTRO, V. (1990). Teoría y práctica de los medios de enseñanza. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de La Habana.

HENRY, M. (1997). Notion de modele et modélization en l'enseignement. En: Enseigner les probabilités au lycée. Reims: Commission Inter-IREM. pp. 77-84.

HIMMELBLAU, D.; BISCHOFF, K. (1976). Análisis y Simulación de Procesos. Ed Reverté. España.

MARTÍN RODRÍGUEZ, A. [et. al.]. (2001). Laboratorios simulados en Física para Ingenieros Eléctricos: experiencias y propuestas. En Revista Cubana de Física. Vol. 18, N. 2. Ciudad de La Habana.

POZO, J. I. Y GÓMEZ CRESPO, M. A. (2001). Aprender y enseñar ciencia. Ediciones Morata S. L. Madrid.

RUIZ GUTIÉRREZ, J. M. en <http://mami.uclm.es/jmruiz/materiales/Documentos/simulacion.PDF> búsqueda: 18/12/2011.