

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA APLICACIÓN DE SIMULADORES DE  
PROCESO EN LAS ASIGNATURAS DE INGENIERÍA DE PROCESOS

MARCELA MARÍA POSADA MEJÍA  
NATALIA ZAPATA ZAPATA

UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS  
MEDELLÍN  
2006

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA APLICACIÓN DE SIMULADORES DE  
PROCESO EN LAS ASIGNATURAS DE INGENIERÍA DE PROCESOS

MARCELA MARÍA POSADA MEJÍA  
NATALIA ZAPATA ZAPATA

Proyecto de Grado  
Como parte de los requerimientos para la obtención del título

Asesor  
I.Q. Jaime Alberto Escobar Arango  
Docente Ingeniería de Procesos  
Director del grupo de investigación DDP

UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS  
MEDELLÍN  
2006

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Jurado

---

Jurado

Medellín, Octubre de 2006

## **AGRADECIMIENTOS**

Primero, a Dios por darnos la oportunidad de terminar nuestro ciclo profesional. A nuestro asesor, Jaime Alberto Escobar, que nos apoyó incondicionalmente en la idea y desarrollo de este proyecto. A nuestras familias y a todos los profesores y aquellas personas que de alguna forma contribuyeron a la realización de este proyecto de grado.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>9</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>11</b>
<b>1. SIMULACIÓN DE PROCESOS</b>	<b>12</b>
1.1 VENTAJAS DE LA SIMULACIÓN DE PROCESOS	12
1.1.1 Ventajas según autores de este proyecto de grado	13
1.1.2 Otras ventajas según diferentes autores	13
1.2 DESVENTAJAS DE LA SIMULACIÓN DE PROCESOS	14
1.2.1 Desventajas según autores de este proyecto de grado	14
1.2.2 Otras desventajas según diferentes autores	15
1.3 ESCOGENCIA DEL SIMULADOR DE PROCESOS A UTILIZAR EN LA PROPUESTA METODOLÓGICA	15
<b>2. COMPETENCIAS QUE DEBE DESARROLLAR UN INGENIERO DE PROCESOS</b>	<b>18</b>
<b>3. SOPORTE PARA LA FORMACIÓN DE INGENIEROS DE PROCESOS FUNDAMENTADOS EN EL DISEÑO, LA INNOVACIÓN Y LA EVALUACIÓN CRÍTICA DE PROCESOS</b>	<b>21</b>
3.1 ANTECEDENTES DE LA INTEGRACIÓN DEL USO DE SIMULADORES DE PROCESOS DENTRO DEL PROCESO EDUCATIVO	24
<b>4. DESARROLLO DE LA PROPUESTA METODOLÓGICA</b>	<b>26</b>
4.1 METODOLOGÍA EMPLEADA	26
4.2 ASIGNATURAS PROPUESTAS PARA LAS CUALES ES FACTIBLE LA APLICACIÓN DE SIMULADORES DE PROCESO	28
4.3 SELECCIÓN DE LAS ASIGNATURAS A LAS CUALES SE LES CONSTRUIRÁ UNA GUÍA PARA LOS ESTUDIANTES	31
4.4 ESTRUCTURA DE LA GUÍA	32
4.4.1 Guía para Físicoquímica	34
4.4.2 Guía para Termodinámica I	35
4.5 EXPERIENCIAS PERSONALES DE LOS AUTORES EN LA ELABORACIÓN DE LA GUÍA PARA LOS ESTUDIANTES	36
4.6 EXPERIENCIA EN LA APLICACIÓN DE LA GUÍA DENTRO DEL LABORATORIO DE FÍSICOQUÍMICA	38

<b>CONCLUSIONES</b>	<b>40</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>43</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>44</b>

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Modelo sistémico de Bédard Reneé [8]	21
Figura 2. Pirámide de Miller [8]	22
Figura 3. Taxonomía de Bloom de los objetivos educacionales [10]	23
Figura 4. Diagrama esquemático de la metodología	27
Figura 5. Contenido de la guía para los estudiantes	33

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1. PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA DE PROCESOS	46
ANEXO 2. ENLACES WEB DE TUTORIALES DE ASPEN	47
ANEXO 3. GUÍAS PARA LA COMPRESIÓN DE CONCEPTOS FISICOQUÍMICOS Y TERMODINÁMICOS UTILIZANDO ASPEN PLUS	48

## INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos más importantes del currículo de Ingeniería de Procesos es la formación de profesionales, que basados en la integración de sus conocimientos, sean capaces de abordar el diseño y la optimización de procesos, y adopten además, una posición crítica y de evaluación de aquellos ya diseñados. Para el logro de éste objetivo, es necesario procurar que los estudiantes alcancen los seis niveles cognitivos planteados en la Taxonomía de Bloom para los objetivos educacionales los cuales se explican en el capítulo 2.

El bajo desarrollo que se presenta en Colombia en el área de ingeniería e investigación es un síntoma de diferentes causas, una de ellas son las metodologías pedagógicas poco adecuadas del sistema educativo que no coadyuvan en el desarrollo de habilidades y competencias que los profesionales de hoy en día requieren, como lo son la síntesis y la evaluación y que aplicadas al diseño impulsan la creación de ideas y procesos innovadores capaces de competir en el mercado internacional, que proporcionen empleo y que fortalezcan el crecimiento y formación de las empresas colombianas. Para contribuir a la mejora del proceso educativo, es necesario entonces comenzar por proporcionar a los estudiantes las herramientas necesarias para su adecuada formación, y más importante aún, que se realice desde el comienzo de sus estudios de modo que en los últimos años del proceso educativo se desarrollen las habilidades cognitivas de la evaluación y la síntesis. En esto último, radica la importancia de esta propuesta, pues varios autores (como Seider et al.) han reconocido que el uso de las herramientas computacionales (tales como simuladores de proceso) en el proceso formativo, favorece el logro de este objetivo.

El objetivo de este proyecto es entonces proponer una alternativa metodológica que ayude a desarrollar en los ingenieros de procesos competencias en el manejo de herramientas computacionales, aprovechando al máximo las potencialidades que ofrecen las licencias educativas de software de simulación, a través su uso práctico dentro del currículo de Ingeniería de Procesos. Conforme a este objetivo, el presente documento desarrolla una fundamentación teórica acerca del uso de los simuladores como una herramienta de apoyo al proceso de aprendizaje, la cual va acompañada de dos guías para la comprensión de algunos conceptos básicos de las asignaturas de Fisicoquímica y Termodinámica I correspondientes al área de las ciencias básicas de ingeniería<sup>1</sup> mediante el uso del simulador de proceso

---

<sup>1</sup> Elemento de la clasificación de las áreas del conocimiento presentada en el documento "Contenidos programáticos de la ingeniería de procesos" de Jaime Escobar Arango. 2005

Aspen Plus. Esto se logró tras una revisión del plan de estudios de Ingeniería de Procesos y de los currículos de cada asignatura perteneciente al departamento. Se examinó teniendo en cuenta una gradualidad en los conocimientos, aquellos cursos que por su contenido son factibles para la aplicación de simuladores de proceso. De estos cursos estudiados, se seleccionaron Físicoquímica y Termodinámica I para la construcción de las guías para los estudiantes, esto a través de un estudio del posible desarrollo de algunos temas específicos de cada asignatura con ayuda del simulador de procesos.

Dentro de la guía tanto estudiantes como profesores encuentran una ayuda para lograr una mejor comprensión de conceptos básicos vistos en clase y para el desarrollo de competencias en el manejo de herramientas computacionales, contribuyendo de esta manera al desarrollo de profesionales con habilidades en el diseño, la creación e innovación y con una posición crítica y de evaluación ante los retos del mundo laboral.

## **OBJETIVOS**

Proponer una metodología para la utilización de software de simulación de proceso en las diferentes asignaturas del currículo de Ingeniería de Procesos, a través de ejemplos aplicados.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Con la ayuda de una previa revisión bibliográfica, describir qué competencias puede desarrollar el Ingeniero de Procesos a través del uso de herramientas computacionales y qué ventajas y desventajas tiene el empleo del simulador.
2. Determinar mediante la revisión de los microcurrículos en cuáles asignaturas de la carrera de Ingeniería de Procesos resulta factible la aplicación de un simulador de proceso.
3. Proponer qué usos del simulador diferentes a la simulación de procesos aplican para los contenidos de los microcurrículos propuestos.
4. Desarrollar una guía para el estudiante en donde encuentre los pasos detallados a seguir para la solución y análisis de ejemplos aplicados y el desarrollo de nuevos ejercicios mediante la utilización del simulador de proceso.

## **1. SIMULACIÓN DE PROCESOS**

“Simulación es la imitación de la operación de un proceso del mundo real o de un sistema en el tiempo”<sup>1</sup> o definido de otra forma, la simulación es una técnica, donde un modelo, tal como una hoja de cálculo, es iterado con diferentes valores de entrada, con la intención de conseguir una completa representación de todos los escenarios que podrían ocurrir en una situación incierta.

La simulación de procesos ya sea a través de simuladores comerciales (Aspen Plus, Hysys, Chemcad, PRO/II, etc.) o la programación en Excel, MatLab, Visual Basic o cualquier otro lenguaje de programación, es una herramienta que proporciona innumerables facilidades a la industria química, petrolera, energética y demás, contribuyendo a convertir los objetivos de una compañía en realidad, esto ya que una “planta virtual” construida con simuladores es según Broussard<sup>2</sup>, la mejor forma de ahorrar dinero y tiempo, y de proteger el medio ambiente y las vidas humanas de quienes trabajan en las plantas, esto se consigue puesto que es posible plantear escenarios “what if” y de este modo evitar problemas y consecuencias desastrosas.

Ante el gran uso de simuladores de procesos dentro de la industria a nivel mundial y con el fin de que los estudiantes de ingeniería adquieran competencias en el manejo de simuladores, y por tanto tengan un mejor desempeño en su vida profesional, el uso de simuladores se ha venido introduciendo desde la década pasada dentro de los cursos de pregrado de las facultades de Ingeniería.

A continuación se exponen las ventajas y desventajas encontradas por los autores de este proyecto de grado como producto de la experiencia en el desarrollo de la propuesta metodológica, además se complementan con las referencias que educadores e industriales han publicado al respecto.

### **1.1 VENTAJAS DE LA SIMULACIÓN DE PROCESOS**

Las siguientes son las ventajas del uso de los simuladores dentro del proceso educativo y dentro de la práctica como profesional:

### 1.1.1 Ventajas según autores de este proyecto de grado

- Los simuladores de procesos permiten acceder a amplias bases de datos termodinámicos útiles en el desarrollo y análisis de experimentos, resolución de problemas, diseño de procesos, etc. Esta cualidad puede ser usada por los estudiantes como una fuente de consulta permanente.
- Algunos problemas que necesitan una gran cantidad de cálculos, pueden volverse complejos para los estudiantes, consumiendo mucho tiempo y finalmente haciendo que el tiempo dedicado para el análisis no sea suficiente. La simulación de procesos permite resolver problemas de este tipo en forma rápida, proporcionando al estudiante más tiempo y herramientas para el análisis del problema.
- Varios simuladores de proceso permiten realizar optimizaciones de procesos, estimaciones de costos y estudio de los factores ambientales de un proceso con el fin de establecer comparaciones entre alternativas para seleccionar la que mejor se acomode a las especificaciones técnicas, económicas y ambientales de un proceso. Esto desarrolla potencialmente los niveles de síntesis y evaluación en los estudiantes de cursos avanzados y es muy útil dentro de la industria puesto que ayuda a reducir costos en el desarrollo de proyectos.
- Los simuladores de proceso permiten al estudiante desarrollar competencias relacionadas con la *“habilidad para usar las herramientas modernas de la ingeniería para la práctica de ésta”* [6] que se discutirá más a fondo en el siguiente capítulo. Por medio del uso de los simuladores, se desarrollan competencias para resolver balances de materia y energía, crear diagramas de flujo, interpretar resultados y gráficos, seleccionar equipos y dispositivos de ingeniería, definir restricciones del sistema, emplear datos y ecuaciones de la heurística, realizar evaluaciones económicas y ambientales, y demás elementos que hacen parte del diseño de procesos y que son necesarios para diseñar desde una unidad de proceso, hasta una planta de procesos químicos o biotecnológicos.
- La simulación de procesos es una práctica integradora de las diferentes asignaturas de la carrera, lo cual ayuda a que el estudiante tenga la capacidad de resolver y definir problemas de ingeniería reales.

### 1.1.2 Otras ventajas según diferentes autores

- Mejor comprensión de los procesos: Con la simulación de procesos es posible responder preguntas del tipo “Por qué” reconstruyendo la escena y

examinando “microscópicamente” el sistema para determinar el por qué ocurren los fenómenos. [1]

- La simulación de procesos da a los estudiantes una prueba de ingeniería real y los prepara para la práctica en el mundo laboral. [3]
- Es posible contrarrestar métodos y cálculos vistos en clase y comparar con el simulador problemas cuya solución fue previamente encontrada en forma manual. Si los resultados son similares, se puede proceder a variar con el simulador las condiciones del sistema y con esto responder preguntas del tipo “What if” (qué pasaría si se varía la presión,...), y de este modo ayudar a una mayor comprensión de los conceptos. Si las soluciones no concuerdan, se ayuda a entender que los simuladores no son perfectos [3]. Este tipo de análisis “What if” son muy usados en la industria para el diseño y el rediseño de sistemas, por tanto se convierte en una herramienta muy importante para el Ingeniero de Procesos. [1]
- Dentro de la industria, los simuladores son útiles en investigación y desarrollo al agilizar los ensayos en laboratorios y en plantas piloto porque permite predecir resultados o rangos de trabajo óptimo lo cual ahorra mucho tiempo en la experimentación; y en la etapa de diseño, al ofrecer una manera rápida de diseñar un proceso para establecer comparaciones entre diferentes alternativas. [4]
- Experimentación rápida y económica aún en condiciones extremas (estudios paramétricos) [5]. El costo típico de una simulación es menos del 1% del costo total de la implementación de un diseño o de un rediseño [1].
- Los simuladores son muy útiles en el entrenamiento de personal. Los operadores de las plantas pueden aprender de sus errores y de este modo, aprender a operar mejor [1].

## **1.2 DESVENTAJAS DE LA SIMULACIÓN DE PROCESOS**

A pesar de la gran acogida de los simuladores, se debe tener en cuenta que se corren algunos peligros en el empleo de éstos. A continuación se citan algunas desventajas propias de los autores de este proyecto y de otros autores dentro del proceso educativo y dentro de la práctica como profesional.

### **1.2.1 Desventajas según autores de este proyecto de grado**

- Para principiantes, la simulación de procesos les puede parecer muy difícil y tienden a desanimarse cuando no obtienen los resultados esperados. Son

necesarias mucha paciencia y persistencia, además, si el estudiante empieza a familiarizarse con estas herramientas desde los primeros cursos de una forma gradual, en asignaturas avanzadas se pueden obtener resultados satisfactorios.

- El simulador de procesos tiende a ser visto como una caja negra si no se conocen los modelos de cálculos que el simulador utiliza y si no se estudian previamente a su uso los conceptos y algoritmos necesarios para resolver el problema en cuestión. El profesor Wankat<sup>3</sup> propone que para reducir esta tendencia, se debe procurar que las prácticas con el simulador se realicen inmediatamente se hayan estudiado en clase los conceptos teóricos y de este modo, lograr que una vez el estudiante se enfrente a la simulación, entienda qué métodos o cálculos fueron llevados a cabo.

### **1.2.2 Otras desventajas según diferentes autores**

- Según Fogler<sup>4</sup>, en la solución de problemas, no hay siempre una interacción detallada con el problema tal como se hace en la solución manual en donde el que resuelve el problema es forzado a pensar profundamente en éste, a encontrar aproximaciones para resolverlo, y a evaluar y reevaluar las suposiciones hechas. Muchas veces la simulación esconde la complejidad del problema y por tanto, esconde también aspectos importantes de su entendimiento.
- Según Banks<sup>1</sup>, los resultados que arrojan los simuladores pueden ser en ocasiones difíciles de interpretar, esto ya que muchas salidas son esencialmente variables aleatorias basadas usualmente en entradas aleatorias, por tanto puede ser difícil determinar cuándo una observación es un resultado de las interrelaciones del sistema o cuándo es aleatoriedad.
- Se puede caer en optar por la simulación en casos donde una solución analítica es posible o incluso preferible. [1]

### **1.3 ESCOGENCIA DEL SIMULADOR DE PROCESOS A UTILIZAR EN LA PROPUESTA METODOLÓGICA**

Aunque la metodología propuesta en este proyecto aplica para cualquier software de simulación de procesos, se escogió trabajar con el simulador Aspen Plus puesto que se desea utilizar la licencia educativa que posee EAFIT de este software, aprovechar sus potencialidades y porque es entre los simuladores comerciales el más robusto y dinámico, además de poseer otras cualidades tales como:

- Versatilidad, pues incluye varias interfases o paquetes especializados de acuerdo al tipo de proceso específico que se desee simular y múltiples modelos termodinámicos.
- Transparencia en los cálculos, puesto que muestra al usuario a través del lenguaje Fortran, de qué forma fueron llevados a cabo los cálculos y proporciona al usuario una guía de ayuda para cada paso del proceso de simulación.
- Posee además la interfase *Property Analysis* como herramienta adicional a la simulación de procesos con la cual se analizan gráficamente las propiedades termodinámicas y de transporte, se generan diagramas binarios y se tabulan resultados, tareas muy útiles para introducir el uso de simuladores dentro de los primeros cursos del plan de estudios de Ingeniería de Procesos.
- Por último, atendiendo a la desventaja anteriormente mencionada, de la tendencia a ver al simulador como una caja negra, la ayuda al usuario de Aspen Plus muestra para algunas unidades y propiedades las ecuaciones más importantes que el simulador utiliza para realizar los cálculos. Adicionalmente, este simulador trae como documentación anexa una guía llamada "Physical Property Methods and Models" que contiene los modelos y métodos que utiliza Aspen Plus para llevar a cabo el cálculo de propiedades físicas.

Se pudo así mismo escoger el simulador de procesos HYSYS para el cual la Universidad EAFIT posee también la licencia educativa. Se descartó este simulador porque aunque al igual que Aspen Plus, maneja principalmente procesos continuos no estacionarios por medio de diagramas de flujo en los que se interconectan diferentes unidades de proceso (equipos, válvulas, líneas de tuberías, etc.), no cuenta con una interfase o aplicación diferente a la simulación de procesos como lo es el análisis de propiedades para componentes puros y binarios que dentro de Aspen Plus lleva el nombre de *Property Analysis*, la cual ya se introdujo anteriormente. Esta interfase es pues de gran importancia para abordar los cursos de primer y segundo año del pregrado puesto que en éstos se tratan temas que son explicados comúnmente y de manera satisfactoria en el proceso de aprendizaje por medio de gráficas, tales como Presión de vapor vs. Temperatura, Equilibrio de fases, etc., apoyando de esta manera la comprensión de muchos temas que se estudian en asignaturas como Físicoquímica y Termodinámica. Es por esta gran ventaja del simulador Aspen Plus sobre HYSYS que el primero es seleccionado para apoyar esta propuesta metodológica, sin embargo, Hysys y otras herramientas computacionales como ChemCad, MatLab, Simulink, etc., pueden así mismo ser empleados dentro de varias asignaturas de Ingeniería de Procesos.

Aspen Tech provee los muy conocidos software de simulación y optimización de procesos Aspen HYSYS® y Aspen Plus™ entre otros, y de los cuales EAFIT tiene licencia educativa. Con el password asignado a la universidad como parte de los derechos por tener las licencias educativas, es posible acceder a varios tutoriales que se encuentran en su sitio web y que pueden ser útiles para apoyar la comprensión de temas de varios cursos de Ingeniería de Procesos. Para conocer más acerca de estos tutoriales remítase al ANEXO 2.

## **2. COMPETENCIAS QUE DEBE DESARROLLAR UN INGENIERO DE PROCESOS**

El Ingeniero de Procesos de hoy se enfrenta a un mundo de grandes retos, donde el entorno cambia constantemente y exige que los ingenieros asimilen rápidamente nuevas y emergentes tecnologías. Para poder sobrevivir a este mercado laboral tan competitivo, el Ingeniero de Procesos debe desarrollar ciertas habilidades y competencias, con las que responda eficiente y eficazmente a los requerimientos en la práctica de su profesión, para esto los estudiantes y egresados deben desarrollar dichas habilidades y competencias durante su formación universitaria. Harb<sup>6</sup> propone un listado de atributos que se desglosan en competencias específicas para los estudiantes y egresados de Ingeniería de Procesos;

A continuación se listan de forma general los atributos propuestos que debe desarrollar el Ingeniero de Procesos:

1. Entendimiento de la carrera ingeniería procesos y de su ejercicio profesional.
2. Entendimiento de los principios fundamentales de la ciencia y la matemática.
3. Entendimiento de los fundamentos de la Ingeniería de Procesos.
4. Tener experiencia práctica con los equipos, el manejo y el análisis químico y la instrumentación de los procesos químicos y biotecnológicos.
5. Habilidad para usar las herramientas modernas de la ingeniería para la práctica de ésta.
6. Habilidad para definir y resolver problemas de ingeniería.
7. Conciencia y sensibilidad para los asuntos ambientales y de seguridad.
8. Habilidad para comunicar ideas efectivamente en forma oral y escrita.
9. Habilidad para trabajar en equipo para lograr metas comunes.
10. Habilidad para aplicar los fundamentos de Ingeniería de Procesos para resolver problemas abiertos, diseñar unidades de proceso y sistemas de unidades de proceso incluyendo operaciones múltiples.

11. Apreciación y compromiso por las responsabilidades éticas y profesionales.
12. Apreciación y compromiso para la continua búsqueda de la excelencia y la completa realización del potencial humano.

El desarrollo de este proyecto apunta principalmente a reforzar en el sistema educativo el atributo 5 "*habilidad para usar las herramientas modernas de la ingeniería para la práctica de ésta*", el cual puede describirse de la siguiente manera [6]: Cuando el estudiante o egresado se enfrenta a un problema de ingeniería debe estar en la capacidad de usar y seleccionar las herramientas necesarias para solucionar el problema. Estas herramientas incluyen hojas de cálculo, software avanzados de matemáticas y simuladores de proceso.

En el marco conceptual del atributo 5, Harb<sup>6</sup> describe que las competencias específicas que se desarrollan mediante el uso de los paquetes de simulación son las siguientes:

- Tener la habilidad para el desarrollo de diagramas de flujo de procesos (Flowsheet).
- Ser capaz de resolver balances de materia y energía.
- Tener la habilidad para diseñar procesos abarcando desde una sola unidad de operación hasta una planta completa.
- Ser capaz de interpretar cálculos de ingeniería, los cuales incluyen análisis económico, datos del proceso y análisis gráfico.

También muy ligado a la propuesta metodológica planteada en el presente proyecto, se encuentra el atributo 6 (*Habilidad para definir y resolver problemas de ingeniería*), pues busca que los estudiantes encuentren estrategias para la solución de diferentes problemas de ingeniería y además tengan experiencia en su aplicación, lo cual desarrolla la habilidad de pensar crítica y creativamente.

Las competencias específicas que se desarrollan en este atributo son [6]:

- Ser capaz de usar una estrategia para resolver y definir problemas de ingeniería.
- Ser capaz de integrar temas de los diferentes cursos de la carrera para resolver problemas reales.

- Usar habilidades críticas y creativas para el análisis y evaluación de problemas y las relaciones causa efecto.
- Ser capaz de obtener y evaluar información y datos de entrada de una base de datos, un manual, la literatura o de un simulador de proceso.

El uso de los simuladores de proceso en las clases aporta significativamente en el desarrollo de las competencias descritas anteriormente, puesto que los estudiantes pasan de ser consumidores pasivos de información, que sólo necesitan recordar hasta el próximo examen, a ser los participantes activos en la adquisición y utilización de conocimiento. En este ambiente ellos se auto-motivan para ampliar la información que han aprendido [7]. Lo anterior se puede resumir en la siguiente frase enunciada por Martin<sup>7</sup>:

**“Cuéntamelo y lo olvidaré”. “Muéstramelo y quizás lo recuerde”.  
“Involúcrame y lo entenderé”**

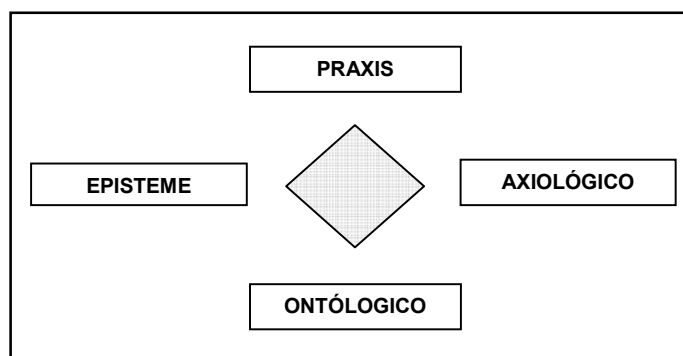
Por último vale la pena recalcar, como lo explica Wankat<sup>3</sup>, que para preparar a los estudiantes para la práctica profesional, el sistema educativo necesita enseñarles a los estudiantes cómo utilizar por lo menos uno de los simuladores comerciales. Puesto que si los egresados y estudiantes no tienen la experiencia práctica en el manejo de un simulador comúnmente usado en la industria, se encontrará en desventaja competitiva con sus compañeros y colegas de trabajo.

### 3. SOPORTE PARA LA FORMACIÓN DE INGENIEROS DE PROCESOS FUNDAMENTADOS EN EL DISEÑO, LA INNOVACIÓN Y LA EVALUACIÓN CRÍTICA DE PROCESOS

El Ingeniero de Procesos del mundo actual debe poseer una formación en la que se le prepare para enfrentar los nuevos desafíos y exigencias que impone la industria tras el avance tecnológico y científico del nuevo milenio. Debe poseer la habilidad de asimilar rápidamente nuevas y emergentes tecnologías de modo que provea soluciones en menor tiempo y bajo los requerimientos exigidos, debe a su vez, mejorar la calidad de los productos al tiempo que reduce los costos operacionales, mejorar la seguridad de los procesos, optimizar y disminuir los impactos al medio ambiente.

De esto, surge la necesidad de formar profesionales integrales, con una visión sistémica. Es por esto, que la Ingeniería de Procesos ha basado su estructura en el modelo sistémico de Bédard René [8] que propone las cuatro dimensiones filosóficas que un currículo de ingeniería debe tener en su estructura Figura 1.

**Figura 1. Modelo sistémico de Bédard René [8]**



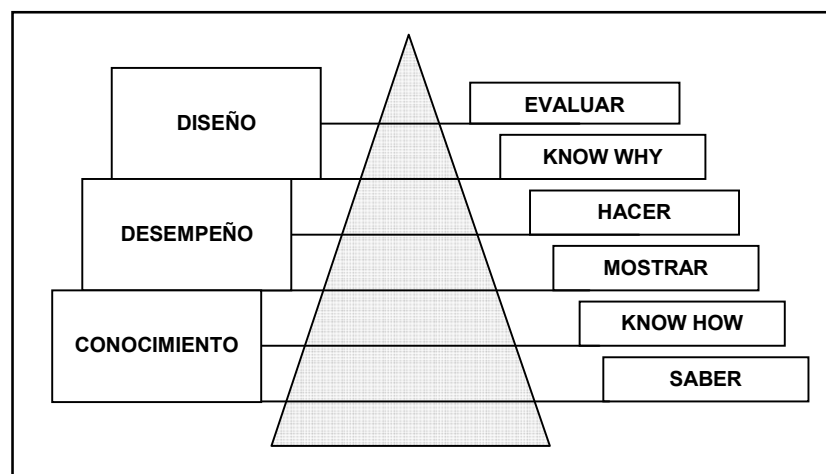
La base del modelo es la dimensión Ontológica, la cual indica la razón de ser del Ingeniero de Procesos. Continuando con el modelo se encuentra la dimensión Axiológica, la cual lleva a anteponer los valores, a formar ciudadanos de bien. Esta dimensión va alineada con la visión, la misión y los propósitos institucionales de la Universidad EAFIT. En la parte superior se encuentra la dimensión de la Praxis, o sea el ejercicio de la profesión en un entorno social, entorno globalizado que exige formar profesionales de talla mundial con conocimientos, actitudes, destrezas y habilidades que deben ser adquiridas dentro del programa de formación. Por

último, aparece la dimensión Epistemológica, la cual indica las divisiones curriculares, que en la Ingeniería de Procesos tienen los siguientes pilares:

- Enfoque sistémico e integral
- Integración de los procesos
- Gestión de operaciones industriales
- Operaciones y procesos unitarios (físicoquímicos y biotecnológicos)

Como dice el autor de la referencia [8], el ingeniero que Colombia necesita, debe romper con el círculo vicioso del subdesarrollo y la dependencia tecnológica de otros países, esto se logra solamente con la producción de conocimiento propio, generando tecnología y soluciones a nuestros problemas. Esta generación de conocimiento se da en el momento en que seamos capaces de relacionar los conocimientos de diferentes áreas y descubrir el “porqué” (Know Why), como podemos ver en la pirámide de conocimiento tecnológico de Miller (Figura 2). Es a partir de allí donde se ve la importancia del diseño, pues éste exige un conocimiento a fondo de los procesos que se manejan.

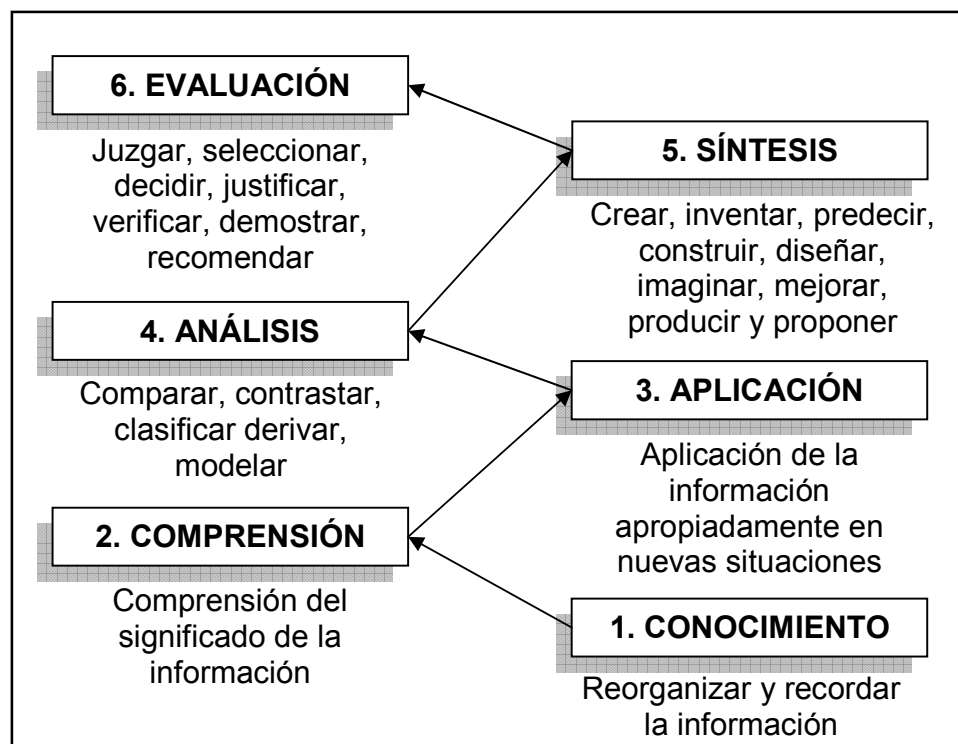
**Figura 2. Pirámide de Miller [8]**



Para lograr el objetivo de la generación de conocimiento, los educadores deben entonces, proveer un moderno currículo orientado al diseño de procesos que responda a las necesidades de este milenio, donde exista una conexión entre cada asignatura del programa de ingeniería a través de la disciplina del diseño, como gran disciplina integradora. Seider<sup>9</sup> y otros autores que han experimentado la integración del uso de simuladores dentro de los cursos del pregrado inferiores a los cursos avanzados de diseño, coinciden en que esta herramienta no solo provee competencias a los estudiantes en el manejo de simuladores sino que

ayuda además a un mejor entendimiento de los conceptos vistos en clase. Esto contribuye a la formación de profesionales críticos y capaces de diseñar, evaluar y resolver los problemas a los que se ve enfrentado en su actividad diaria. El desarrollo de estas habilidades hace parte de un importante objetivo en la formación del Ingeniero de Procesos el cual es *desarrollar la integración de conceptos, el diseño y la evaluación*, y que se alcanza en forma gradual a lo largo del programa de ingeniería, mediante el desarrollo de las habilidades cognitivas, las cuales se explican detalladamente en la *Taxonomía de Bloom* (Bloom, 1956) para los objetivos educativos (Ver. Figura 3).

**Figura 3. Taxonomía de Bloom de los objetivos educativos [9]**



Esta figura explica los seis niveles cognitivos que se deben alcanzar en la educación. Los niveles, uno a cuatro proporcionan una base para los dos últimos niveles, la síntesis y la evaluación, los cuales son los más importantes para que el profesional tenga un desempeño efectivo en el mundo laboral y en consecuencia, son los que representan un mayor desafío en la formación del ingeniero. No menos importantes que éstos, se encuentran los niveles previos a los niveles 5 y 6, los cuales son en orden descendente el Análisis (Nivel 4), la Aplicación (Nivel 3), la Comprensión (Nivel 2) y el Conocimiento (Nivel 1). Estos, soportan y proporcionan la base para alcanzar los dos últimos niveles cognitivos. La clave

para lograr estos últimos niveles, está pues en proveer las herramientas adecuadas que incrementen las habilidades de síntesis y evaluación en los estudiantes y que sean proporcionadas desde los primeros cursos de la carrera. Una de las herramientas aplicables a este propósito son los simuladores de proceso. La efectividad de éstos se puede sustentar de la siguiente forma: Para realizar el diseño de un proceso se requiere determinar su factibilidad técnica, económica y ambiental, además de la seguridad. La escala del problema, da cuenta de que para el logro de estos objetivos, el uso de los simuladores de proceso dinamiza el proceso de aprendizaje sobre áreas complejas y proporciona una posición crítica y de evaluación de los resultados obtenidos. Esto es reafirmado por Seider et al. [9] y señala además que el nivel de habilidades en simulación necesario para que un estudiante complete un problema de diseño a escala industrial, es alcanzado si hay una suficiente exposición al uso de simuladores en los cursos más bajos que los avanzados del programa de ingeniería.

### **3.1 ANTECEDENTES DE LA INTEGRACIÓN DEL USO DE SIMULADORES DE PROCESOS DENTRO DEL PROCESO EDUCATIVO**

Varias universidades del mundo tales como el Massachusetts Institute of Technology (MIT), Purdue University (Ver referencia 3), entre otras, ya tienen adoptado el modelo de integración del uso de simuladores dentro de los cursos de pregrado con resultados muy favorables en la comprensión por parte de los estudiantes de conceptos estudiados en las clases teóricas y en el aprendizaje de un simulador comercial. Cerca de 600 universidades del mundo, entre ellas EAFIT, tienen la licencia educativa del simulador de procesos ASPEN y muchas más poseen licencias de otros simuladores comerciales, lo cual demuestra la gran acogida de estas herramientas en las universidades del mundo.

Algunos experimentos de la incorporación de simuladores en un curso de pregrado fueron llevados a cabo por el profesor de la universidad de Purdue, Phillip C. Wankat [3]. Los experimentos comenzaron desde finales de la década de los 90 en un curso de ingeniería química en el cual se trataban temas de métodos de separación. Con la ayuda del simulador Aspen Plus, se estudiaron varios métodos de solución (basados en matrices) alternativos a los métodos gráficos y short-cut que eran enseñados previamente en clase.

Tras varios semestres de rediseño de la metodología de incorporación del simulador dentro del curso, la experiencia trajo consigo resultados muy satisfactorios tanto para la universidad como para la comunidad estudiantil. Los estudiantes estuvieron muy motivados a aprender a cómo manejar el simulador

porque era, en parte retador y divertido, y en parte porque sabían que era preferible conocer cómo manejar el simulador antes del curso de diseño, y porque es utilizado en la industria y por tanto les permite aproximarse a procesos industriales reales. Estos problemas fueron diseñados por Wankat de modo que cumplieran con algunos objetivos de la taxonomía de Bloom, tal como sostiene en la referencia [3]. Los estudiantes que vieron el curso manifestaron haber tenido más tiempo para explorar otros paquetes que trae Aspen Plus necesarios para el curso de diseño que actualmente cursaban o que habían cursado. Wankat asegura también que la incorporación del simulador dentro de su curso teórico fue posible sin necesidad de que el uso de este ocupara mucho tiempo de su clase.

Esta experiencia se relata, junto a algunos ejemplos y una encuesta a los estudiantes acerca del curso, en la referencia [3].

En diferentes artículos se han publicado otras experiencias del uso de herramientas computacionales como apoyo de la educación. Algunas de estas son:

- Uso del software Aspen Plus en el pregrado de ingeniería química de la universidad de Tuskegee, Alabama, para resolver problemas individuales en cursos desde el primer año de estudios. Además realiza talleres complementarios extras al currículo obligatorio donde se da una visión holística de todos los beneficios y paquetes del software de simulación Aspen Plus [10].
- Aplicación de un simulador de realidad virtual como una herramienta en la educación en el curso de ingeniería de las reacciones de la Universidad de Michigan [11].

## **4. DESARROLLO DE LA PROPUESTA METODOLÓGICA**

En este capítulo se presenta la metodología adoptada en el desarrollo de este proyecto de grado, la justificación de la selección de las asignaturas a las cuales se les construye una guía para los estudiantes, se explica cómo es la estructura general de las guías y su contenido y finalmente se comentan algunas experiencias propias a lo largo de la elaboración de las guías y el manejo del software de simulación.

### **4.1 METODOLOGÍA EMPLEADA**

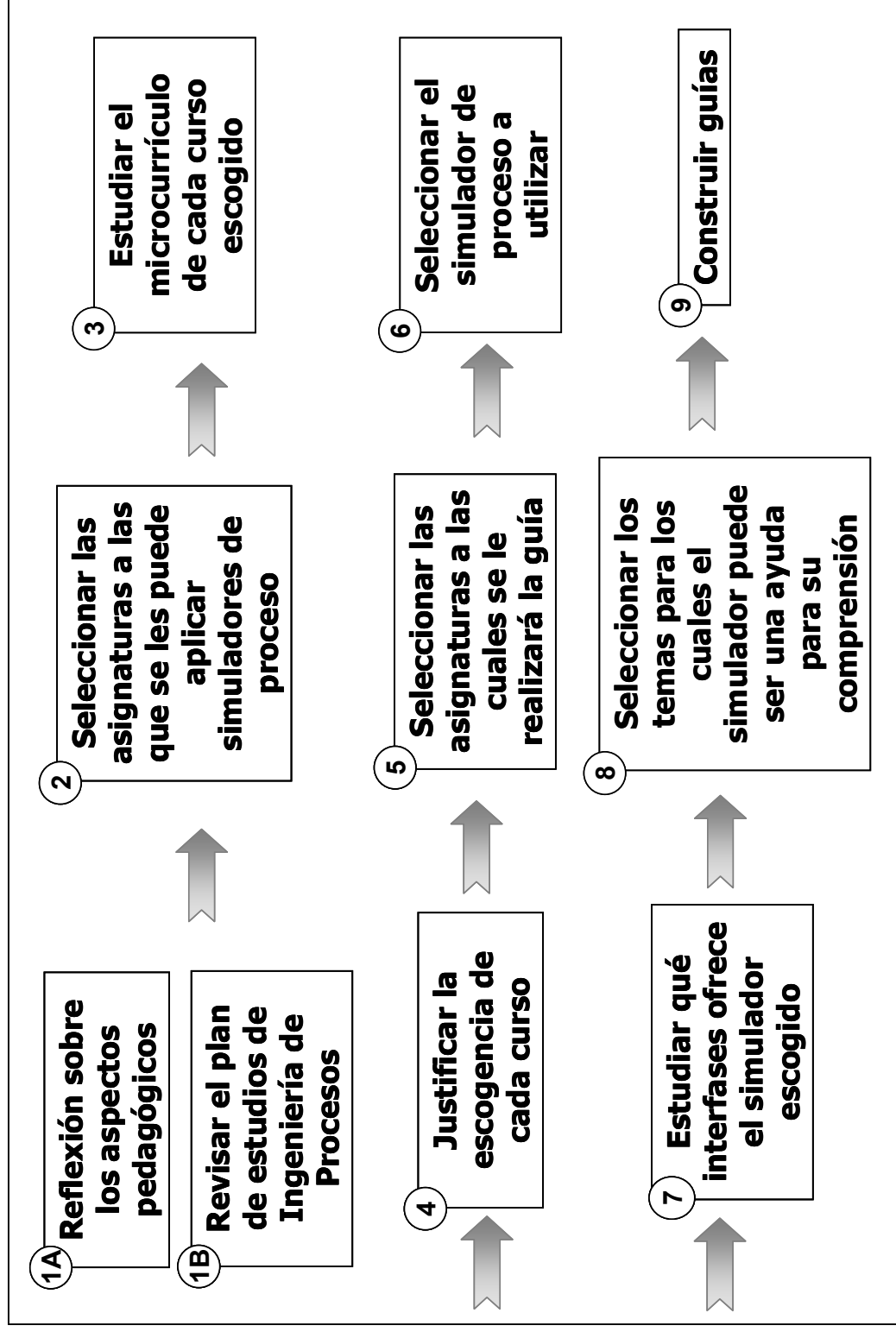
A continuación se explica la metodología adoptada para la realización del proyecto la cual se encuentra también esquematizada en la Figura 4.

En un comienzo, se realiza una reflexión sobre los aspectos pedagógicos a tener en cuenta en la elaboración de la guía para los estudiantes a la vez que se examina el plan de estudios de Ingeniería de Procesos vigente a la fecha para el cual se seleccionan, teniendo en cuenta una gradualidad en los conocimientos, aquellos cursos en los cuales, por su contenido es factible aplicar simuladores de proceso como herramienta de aprendizaje. Para cada caso, se realiza un estudio del microcurrículo o metodología del curso y se procede a justificar su escogencia, tal como se muestra en la sección 4.2.

Habiendo realizado el anterior análisis se procede a realizar una segunda selección de las asignaturas a las cuales se le construirá la guía, como se explica en la sección 4.3. El ANEXO 1 muestra el mapa que resume el plan de estudios de Ingeniería de Procesos y se señala allí las asignaturas propuestas para la aplicación de simuladores y aquellas a las cuales se les construye la guía para los estudiantes.

A continuación, a través de un análisis comparativo con los simuladores comerciales que la universidad EAFIT tiene a la disposición de los estudiantes, se selecciona ASPEN PLUS®, porque como ya se explicó en la sección 1.3, este software posee características apropiadas para la implementación de este proyecto. Luego de la selección, se estudia en detalle qué interfases ofrece Aspen Plus y qué propiedades o sistemas específicos, que se desarrollan en las asignaturas seleccionadas, son posibles trabajar. Finalmente después de definir claramente los temas, se procede a construir la guía para la comprensión de conceptos utilizando ASPEN plus.

Figura 4. Diagrama esquemático de la metodología del proyecto



## **4.2 ASIGNATURAS PROPUESTAS PARA LAS CUALES ES FACTIBLE LA APLICACIÓN DE SIMULADORES DE PROCESO**

A continuación se presentan los cursos por semestre que ofrece el departamento de Ingeniería de Procesos, en los cuales por su contenido, se considera que es factible aplicar simuladores de proceso, como Aspen Plus, como herramienta de aprendizaje. El ANEXO 1 muestra mediante un diagrama del programa académico de Ingeniería de Procesos, las siguientes asignaturas.

### ***TERCER SEMESTRE***

#### **Fisicoquímica (PR-042):**

La asignatura de Fisicoquímica constituye una base de fundamentación para la comprensión de los conceptos asociados a las operaciones unitarias y demás asignaturas relacionadas con los procesos químicos y de diseño.

El objetivo general de esta materia consiste en “evaluar y predecir el comportamiento de las sustancias en los procesos fisicoquímicos, tanto desde el punto de vista de la dinámica de sus reacciones como de sus características en el equilibrio” [12]. El alcance de este objetivo proporciona a los estudiantes una fuerte base y conceptos fundamentales para afrontar las asignaturas siguientes del currículo de Ingeniería de Procesos.

Temas como propiedades fisicoquímicas para componente puro y sistemas de dos componentes (equilibrio de fases), que hacen parte del contenido de esta asignatura, pueden ser abordados con la ayuda de un simulador de proceso para afianzar los conceptos adquiridos en clase.

### ***CUARTO SEMESTRE***

#### **Termodinámica I (PR-050):**

“La Termodinámica es la ciencia que estudia las transformaciones de la energía y el cambio de las propiedades de las sustancias que intervienen en las transformaciones” [13]. y es una base fundamental para el posterior estudio de asignaturas como Balances de Materia y Energía y las Operaciones Unitarias. Sus principios y leyes son además aplicados a otras áreas académicas como los procesos químicos y biotecnológicos y diseño de procesos, al igual que las áreas relacionadas con el medio ambiente.

Algunos de los conocimientos adquiridos en clase, tales como propiedades termodinámicas, sistemas de compresión, turbinas y sistemas de refrigeración,

máquinas térmicas y bombas de calor, pueden ser aplicados y por tanto afianzados con la ayuda de los simuladores de proceso.

## **QUINTO SEMESTRE**

### **Termodinámica II (PR-214):**

En la asignatura de Termodinámica II se estudian y analizan conceptos termodinámicos que son la base para explicar el equilibrio de fases y el equilibrio en reacciones, además de varios modelos termodinámicos que se convertirán en herramientas para realizar predicciones de las propiedades termodinámicas.

En este curso los estudiantes pueden encontrar en el simulador Aspen Plus, los diferentes métodos termodinámicos aprendidos en clase, además de muchos más modelos y/o sus modificaciones. Se puede también corroborar los resultados de las propiedades termodinámicas obtenidos a través de los algoritmos desarrollados en clase con los resultados de un simulador.

Los estudiantes estarán entonces en la capacidad de utilizar un simulador de proceso para comparar los resultados obtenidos con los diferentes métodos termodinámicos y concluir cual es el más indicado según el sistema.

### **Balances de Materia y Energía (PR-066):**

Los balances de masa y energía son operaciones básicas que el Ingeniero de Procesos debe realizar para corroborar la conservación de masa y energía de un proceso y como parte fundamental en el proceso de síntesis y construcción del PFD, para desarrollar, diseñar, operar, modificar o determinar su eficiencia.

Los balances de materia y energía se aplican tanto para las diferentes operaciones unitarias, como para aquellos procesos unitarios donde se presentan reacciones químicas y bioquímicas, por tanto, las variables incógnitas calculadas a partir de la solución de los balances pueden ser corroboradas con la ayuda de los simuladores de proceso al definir en éstos el sistema completo y los grados de libertad. El simulador de proceso muestra además los resultados del balance de materia y energía para cada unidad o equipo y las propiedades termodinámicas y fisicoquímicas calculadas.

### **Mecánica de Fluidos (PR-062):**

En la asignatura de Mecánica de fluidos uno de los objetivos más importantes es el de evaluar el comportamiento de los fluidos más utilizados en los procesos industriales, cuando éstos se conducen a través de tuberías o son impulsados mediante maquinaria hidráulica. Los simuladores de proceso permiten al estudiante comprender el funcionamiento dinámico de equipos como bombas,

válvulas, turbinas y compresores y además lo familiarizan en la forma de cómo éstos se especifican y se escogen. Además, Aspen plus tiene la opción de simular tramos de tubería y especificar desde longitud y diámetro, hasta el material de construcción.

## ***SEXTO SEMESTRE***

### **Transferencia de Calor (PR-070):**

El curso de Transferencia de Calor, tiene gran importancia dentro de la formación de ingenieros de procesos, por su amplia aplicación en la industria.

Esta asignatura dentro de su objetivo general resalta lo siguiente: “al terminar el curso el estudiante deberá estar en capacidad de resolver problemas y aplicar los conocimientos adquiridos para analizar procesos, seleccionar y diseñar equipos relacionados con la transferencia de calor”.

En el módulo 5 del microcurrículo se abordan los diferentes equipos de transferencia de calor y algunos criterios de aplicación y selección.

Con el uso de un simulador de procesos, se puede ayudar al estudiante a visualizar y comprender estos criterios e integrar los equipos de transferencia de calor dentro de un proceso. La aplicación de simuladores de proceso desde esta asignatura ayudará a estudiante a familiarizarse con el concepto de integración de calor que es abordado en cursos posteriores.

## ***SÉPTIMO SEMESTRE***

### **Transferencia de Masa (PR-080):**

Las técnicas de separación son de gran utilización en la industria, sobre todo las que involucran transferencia de masa. El Ingeniero de Procesos al terminar el curso estará en la capacidad de: “Evaluar los fundamentos de las diversas operaciones de separación convencionales que involucran la transferencia de masa, aplicando las técnicas generales de dimensionamiento de equipos para los casos de contacto diferencial y por etapas, incluyendo la concepción, selección, especificación de diseño de los diferentes equipos”.

Los simuladores de proceso permiten la aplicación de los conocimientos teóricos estudiados no solo en la asignatura, sino en fisicoquímica, termodinámica y balances de materia y energía. Permitiendo que los estudiantes se centren en el análisis y evaluación de los procesos de transferencia de masa.

El uso de simuladores de proceso en esta asignatura permite resolver separaciones con mezclas multicomponentes, que son las mezclas más utilizadas en la industria, a diferencia de los métodos gráficos que sólo permiten el estudio de mezclas binarias y ternarias.

## **OCTAVO SEMESTRE**

### **Manejo de sólidos (PR-072):**

Las operaciones unitarias con sólidos son muy comunes en la industria, por tanto la asignatura de Manejo de sólidos representa gran importancia en la formación de ingenieros de procesos. Este curso tiene por objeto la selección y diseño de equipos que implican el manejo de materiales sólidos. Aspen Plus ofrece dentro de su librería de equipos disponibles para simular una sección relacionada con sólidos, donde se pueden modelar diferentes operaciones vistas en el curso como desintegración mecánica de sólidos, filtración y ciclones.

Sin embargo, es importante advertir que Aspen Plus, tiene deficiencia con los modelos matemáticos que involucran sólidos, por tanto el análisis de los resultados obtenidos debe ser muy crítico.

### **4.3 SELECCIÓN DE LAS ASIGNATURAS A LAS CUALES SE LES CONSTRUIRÁ UNA GUÍA PARA LOS ESTUDIANTES**

A continuación se describen los criterios de selección de las asignaturas para las cuales se construye la guía para los estudiantes:

Las asignaturas deben preferiblemente corresponder a los primeros semestres del pregrado de Ingeniería de Procesos. Para esto, se estudia la Clasificación de las Áreas del Conocimiento según Escobar<sup>14</sup>. Dentro de esta clasificación, Escobar realiza una diferenciación de todos los cursos del programa de Ingeniería de Procesos en cuatro grandes grupos:

- 1) Área de Ciencias Básicas: la cual es el núcleo de las Ciencias Formales y las Ciencias Naturales. Entre ellas se encuentran los cálculos, las físicas y las químicas.
- 2) Área de Ciencias Básicas de Ingeniería: El estudio de estas provee la conexión entre las Ciencias Formales y la aplicación y práctica en la ingeniería. Contiene las asignaturas Fisicoquímica, las termodinámicas, balances de materia y energía, entre otros.
- 3) Área de Ingeniería Aplicada: Esta área es específica del programa de Ingeniería de Procesos y suministra las herramientas de aplicación profesional. Contiene los cursos avanzados de ingeniería tales como las operaciones unitarias entre otros.

- 4) Área de Formación Profesional Contextualizada: Comprende los componentes en Ciencias Sociales (Las humanidades y los cursos relacionados con el área administrativa y de gestión)

Esta clasificación da cuenta que el Área de Ciencias Básicas de Ingeniería reúne los criterios más importantes de selección de las asignaturas a las cuales es factible la construcción de la guía para los estudiantes, a saber:

- Contiene los cursos de primer y segundo año de pregrado.
- Enseña los fundamentos teóricos y prácticos en química e ingeniería como tal.
- Los conceptos adquiridos en estos cursos pueden ser comprendidos de una mejor forma con la ayuda del simulador de procesos.

Del área escogida, se seleccionan a su vez dos asignaturas a las cuales se les construye la guía: Físicoquímica y Termodinámica I.

Se escogen estos dos cursos principalmente por que es aquí donde se dan conceptos fundamentales en la formación del Ingeniero de Procesos, que son la base para la comprensión de asignaturas siguientes como lo son las Operaciones Unitarias y porque además la incorporación de simuladores dentro de estas asignaturas representan una innovación puesto que en la literatura no se encuentra que se haya desarrollado talleres aplicados con simuladores de procesos específicos a estas áreas, en cambio se encuentra ejemplos para las demás asignaturas tales como Transferencia de calor, Transferencia de masa, Manejo de fluidos, Ingeniería de los reactores, etc. Sin embargo, construir una guía para dos de las posibles asignaturas estudiadas en la sección 4.2 no representa una preocupación puesto que uno de los objetivos más importantes de los autores de este proyecto es dar a conocer por medio de este informe final la Propuesta Metodológica a docentes y directivos del departamento de Ingeniería de Procesos para que entonces sean éstos quienes continúen, con la ayuda de estudiantes, la aplicación de la propuesta metodológica extendiéndola a las demás asignaturas de la carrera.

#### **4.4 ESTRUCTURA DE LA GUÍA**

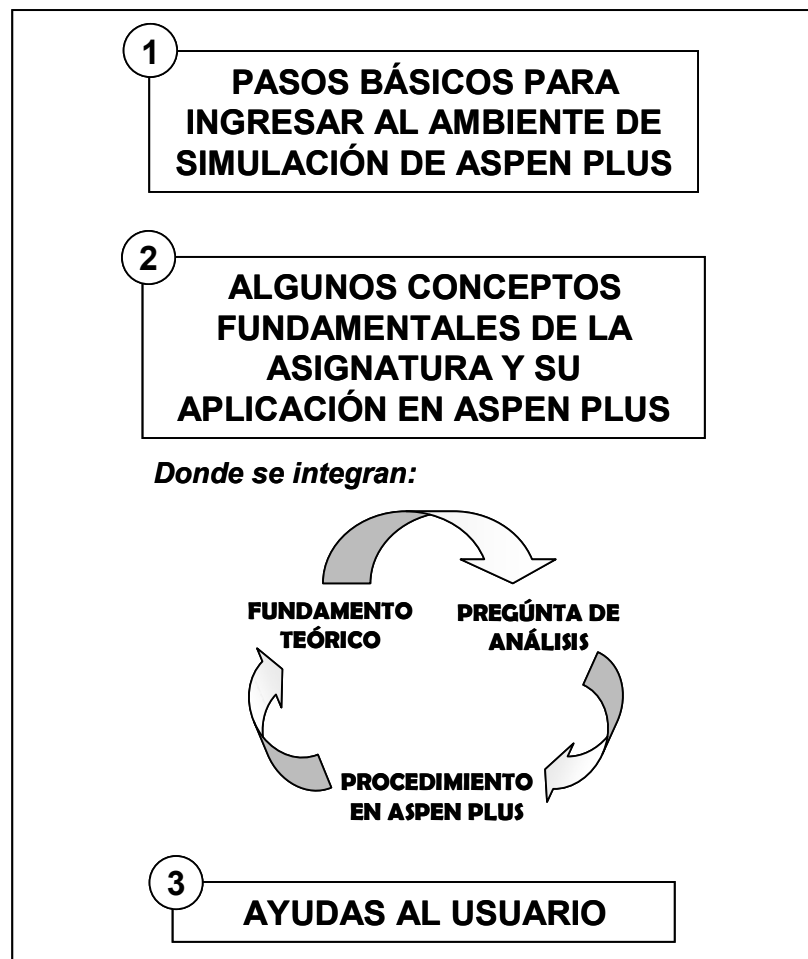
Se elaboran dos guías para la comprensión de algunos conceptos vistos en las asignaturas de Físicoquímica y Termodinámica I, llamadas “Guía para la Comprensión de Conceptos Físicoquímicos Utilizando Aspen Plus®” y “Guía para

la Comprensión de Conceptos Termodinámicos Utilizando Aspen Plus®” respectivamente.

Las guías están estructuradas de la forma que se muestra en la Figura 5.

Cada guía contiene los pasos básicos para ingresar al ambiente de simulación de Aspen Plus seguido de una parte teórica dentro de la cual se realizan varias preguntas de análisis y se explica la forma de resolverlas mediante el simulador de procesos. Por último se plantean ejercicios propuestos. Como anexos se encuentran algunas “ayudas al usuario” con las cuales el estudiante aprende a desenvolverse de manera más sencilla dentro del simulador y adquiere experiencia en el manejo de las herramientas más básicas de Aspen Plus.

**Figura 5. Contenido de la guía para los estudiantes**



#### 4.4.1 Guía para Fisicoquímica

La asignatura de Fisicoquímica (PR-042) se ubica en el tercer semestre del plan de estudios de Ingeniería de Procesos. (Ver ANEXO 1). Dentro de este curso se ven cuatro módulos generales:

- Equilibrio químico
- Regla de fases
- Cinética química
- Fenómenos de superficie

Para la construcción de la guía se toman temas específicos del módulo de regla de fases y una propiedad de fenómenos de superficie.

En esta guía se abordan separadamente los temas “Sistemas de un componente” dentro del cual se realiza un análisis de algunas propiedades fisicoquímicas, y “Sistemas de dos componentes” en donde el estudiante descubre cómo el simulador ayuda a comprender los conceptos asociados al Equilibrio de Fases.

Aspen Plus dentro de su modo de *Properties Analysis* ofrece la posibilidad de construir diferentes diagramas de propiedades fisicoquímicas que se ven dentro de la asignatura, tales como presión de vapor, potencial químico, energía libre de Gibbs, entalpía de vaporización y tensión superficial. Estas propiedades fisicoquímicas son explicadas una a una, dando algunos ejemplos de cómo éstas se pueden asociar a la naturaleza. En conjunto con el tratamiento teórico, se plantean preguntas de análisis y se explica paso a paso cómo encontrar en Aspen Plus la solución a estas preguntas. Al final de la sección, se proponen ejercicios.

Dentro de la sección de Sistemas de dos componentes, se exploran mezclas con comportamiento ideal y no ideal. Esta sección comienza explicando cómo determinar los grados de libertad, tema que es necesario entender para que el estudiante una vez se enfrente a la simulación, comprenda cuáles son los grados de libertad que el simulador requiere para llevar a cabo los cálculos. Se explica a continuación cómo leer los diagramas de T-x y P-x y se le indica al estudiante cómo realizar los diagramas en la interfase *Property Analysis* de Aspen Plus. De igual forma al Sistema de un componente, se plantean preguntas de análisis en conjunto con la explicación teórica seguida del procedimiento en Aspen Plus para darle respuesta a las preguntas. Finalmente, se proponen ejercicios con diferentes sistemas para que el estudiante practique lo aprendido.

Con la metodología anteriormente descrita se busca que, gracias a que el simulador de procesos permite comparar propiedades entre diferentes

compuestos dentro de amplios rangos de temperatura y analizar el comportamiento de sistemas de uno y dos componentes cuando se varía la presión y la temperatura, el estudiante tiene la oportunidad de aplicar los conceptos vistos en clase y de este modo comprender mucho mejor los conocimientos fundamentales de la asignatura.

#### 4.4.2 Guía para Termodinámica I

El curso de Termodinámica I (PR-050) está ubicado el plan de estudios de Ingeniería de Procesos dentro del cuarto semestre (Ver ANEXO 1). Dentro de la asignatura se estudian los siguientes módulos:

- Conceptos básicos de la Termodinámica.
- Sustancias puras.
- Primera Ley de la Termodinámica.
- Volúmenes de control: Primera Ley.
- Segunda Ley de la Termodinámica.
- Entropía.
- Ciclos de Potencia.
- Exergía e Irreversibilidad.

En la guía se estudian los temas: “Propiedades termodinámicas para sistemas de un componente”, “Dispositivos de ingeniería de flujo permanente: Compresores y Turbinas” y “Máquinas térmicas, refrigeradores y bombas de calor”, los cuales hacen parte del programa académico de la asignatura en los módulos de “Sustancias puras”, “Segunda ley de la termodinámica” y “Entropía”.

El tratamiento que se le da al tema de propiedades termodinámicas para sistemas de un componente es similar al que se le da al tema de propiedades fisicoquímicas en la guía anterior. Aquí, las propiedades termodinámicas que se estudiaron son: Capacidad calorífica y Energía interna. Se explica cómo construir diagramas de Capacidad calorífica y Energía interna vs. Temperatura, y se plantean preguntas de análisis seguido del procedimiento en la interfase *Property Analysis* de Aspen Plus.

Como una segunda sección temática, se estudian las turbinas y compresores: Sistemas politrópicos e isentrópicos. Se explica cómo construir en el *Flowsheet* (o diagrama de flujo) los sistemas de compresión y de generación de potencia, cómo simularlos e interpretar los resultados que arroja Aspen Plus para dar respuesta a las preguntas de análisis. Se proponen también ejercicios.

Finalmente, se estudian las máquinas térmicas, bombas de calor y ciclos de refrigeración. En conjunto con el repaso de los conceptos fundamentales de estos temas, se simulan en Aspen Plus diferentes ciclos asociados a la segunda ley de la termodinámica. Se plantean también preguntas de análisis.

La simulación de equipos y ciclos básicos termodinámicos, permite que el estudiante construya el Flowsheet del sistema e ingrese los datos necesarios para especificarlo, esto según los grados de libertad del sistema. Las actividades anteriores llevan al estudiante a interiorizar en las características, componentes y funciones del proceso que está simulando, y de esta forma, al integrar la teoría con la práctica, los alumnos desarrollan las habilidades de recordar los componentes del sistema, asociarlo con procesos industriales reales y comprender los fenómenos que allí ocurren. Como una extensión a las preguntas y ejercicios propuestos en la guía y en caso de que el estudiante se encuentre estimulado a explorar más el simulador, tiene la oportunidad de proponer variaciones de los sistemas simulados anteriormente de forma que sean optimizados, y con un poco más de curiosidad, buscar otras alternativas de proceso y cambiar de componentes o de equipos por otros de iguales características o especificaciones y con mejor desempeño, etc.; todo esto es posible gracias a al gran dinamismo que tienen los simuladores de proceso.

Tal como se había dicho anteriormente, en forma adicional al tratamiento teórico y a la resolución de preguntas y ejercicios propuestos, se incluye dentro de ambas guías varios anexos como una “guía al usuario” para que el estudiante se desenvuelva más fácilmente dentro del simulador. Estos anexos son:

ANEXO 1. Modelos termodinámicos utilizados en esta guía.

ANEXO 2. ¿Cómo adicionar o eliminar componentes?

ANEXO 3. Lectura de gráficos

ANEXO 4. Construcción de diagramas de flujo en Aspen Plus

El último Anexo no se incluye en la guía de Físicoquímica porque en ésta solo se aplica la interfase Property Analysis la cual no requiere de un Flowsheet.

#### **4.5 EXPERIENCIAS PERSONALES DE LOS AUTORES EN LA ELABORACIÓN DE LA GUÍA PARA LOS ESTUDIANTES**

La construcción de una guía para estudiantes por estudiantes de la misma carrera es un trabajo desafiante puesto que éstos no se encuentran usualmente del “otro lado” del aula de clases, es decir, no en muchas oportunidades el estudiante desempeña el papel de profesor. En el comienzo de la elaboración de las guías,

se pensó en cómo construir un texto que fuera para los estudiantes una forma sencilla de aplicar los conceptos aprendidos en clase, que emplee una nueva metodología de enseñanza (o hasta el momento no muy aplicada), que cumpla con los objetivos propuestos dentro de cada guía y que a su vez contribuya a un acercamiento gradual hacia los niveles más altos de la taxonomía de Bloom de los objetivos de la educación. Esta es una fase muy representativa dentro del proyecto y tal como se dijo anteriormente, muy desafiante para los autores de este proyecto por ser estudiantes y adoptar el papel de profesores. Por esta misma dificultad, la metodología empleada en las guías fue rediseñada una y otra vez hasta encontrar la que más se acercara a los objetivos del proyecto.

Paralelamente a esta reflexión sobre los aspectos pedagógicos y una vez seleccionados los temas a simular en Aspen Plus, es necesario hacer un repaso de los mismos, actividad que toma bastante tiempo y trabajo porque es importante abarcar varias referencias bibliográficas. Esta actividad demandó más tiempo de lo que se tenía planeado en el cronograma inicial, pero fue una gran oportunidad de revisar los apuntes de estos cursos y consultar otros autores diferentes a los usualmente consultados.

En la construcción de las guías se encontraron varias restricciones relacionadas con el simulador de procesos Aspen Plus. Algunas de ellas son:

- Aspen Plus no simula los equilibrios sólido-líquido y sólido-gas. Por tanto no es posible analizar fenómenos tan importantes como el de sublimación y procesos tan interesantes como la liofilización, entre otros.
- Aspen Plus no reconoce los puntos de ebullición y de fusión en la generación de gráficas de propiedades en la interfase *Property Analysis*. Esto quiere decir que las curvas graficadas, por ejemplo en el análisis del diagrama Entalpía de vaporización vs. Temperatura, son continuas a lo largo de todo el intervalo de temperatura, es decir, no son interrumpidas cuando cambia de fase.
- Aspen Plus realiza los cálculos en la dirección del flujo, pero no en la dirección inversa, lo cual significa que sólo se puede especificar las corrientes de entrada a un equipo. Esto representa que los grados de libertad que se pueden escoger son muy limitados. Esta restricción hace que algunos problemas no sean fácilmente adaptados para que el simulador Aspen Plus los solucione.
- La interfase *Property Analysis* no construye diagramas ternarios. En un comienzo se tenían muchas expectativas con la construcción de estos diagramas, pero para ello se necesita un paquete especial de Aspen, Aspen Split.

- A partir del mes de Julio, la licencia de Aspen Plus se venció, hecho que influye en la intención de extender la metodología a otras propiedades termodinámicas y a la asignatura Termodinámica II. Así mismo, se tuvo la intención de probar las guías con estudiantes de Ingeniería de Procesos, pero no se pudo llevar a cabo debido a la dificultad con la licencia.

Estas limitaciones del simulador anteriormente citadas (con excepción de la última) son por supuesto advertidas a los estudiantes en las guías.

Finalmente, como apreciación personal, como estudiantes de Ingeniería de Procesos, se encuentra en los simuladores una excepcional oportunidad de comprender mucho mejor los conceptos estudiados en clase y de adquirir competencias computacionales y una visión sistémica de los diferentes conceptos que se estudian a lo largo de la carrera.

#### **4.6 EXPERIENCIA EN LA APLICACIÓN DE LA GUÍA DENTRO DEL LABORATORIO DE FISICOQUÍMICA**

La profesora del laboratorio de fisicoquímica, Ana Sofía Hincapié, abrió un espacio dentro de su asignatura para que en la última clase del semestre se desarrollara el módulo de Sistema Binario de la guía de fisicoquímica.

En un comienzo de la clase, se realizó una rápida introducción al ambiente de simulación y a la consulta de propiedades termodinámicas en la base de datos que posee Aspen Plus y finalmente, se trataron en la mayor parte de la sesión los temas Equilibrio de fases y mezclas azeotrópicas.

Esta fue una experiencia muy enriquecedora no sólo para los estudiantes sino para los autores de este proyecto puesto que en el rol de profesores se pudo percibir el grado de aceptación y de entendimiento de la guía por parte de los estudiantes y la motivación de estos a continuar usando el simulador en posteriores laboratorios y en sus asignaturas teóricas.

Los estudiantes descubrieron en el simulador una poderosa herramienta de consulta de varios datos termodinámicos, una ayuda para la construcción de diagramas binarios y un complemento de las clases teóricas y prácticas al ser posible aplicar muchos de los conceptos aprendidos en las asignaturas que cursan en el momento.

Esta clase en particular, fue para los estudiantes su primer acercamiento a los simuladores comerciales por lo que se mostraron muy entusiastas e interesados en seguir explorando este software. Es evidente además que estas nuevas

generaciones son más hábiles en el manejo de herramientas computacionales que las generaciones pasadas, por lo que resulta muy conveniente sacar provecho de estas habilidades introduciendo el uso de software de simulación desde el comienzo de la carrera para finalmente traducir este esfuerzo en una ventaja competitiva frente a otros programas de ingeniería.

## CONCLUSIONES

1. Con base en el documento que trata sobre las competencias que deben poseer los ingenieros químicos y de procesos según Harb<sup>6</sup>, se describen en el Capítulo 2 qué competencias puede desarrollar un Ingeniero de Procesos con la ayuda de herramientas computacionales como los simuladores de proceso, con el fin de formar profesionales críticos y con la capacidad de creación de conocimiento propio.

A través de una revisión bibliográfica, se describen en el capítulo uno qué ventajas y desventajas implican el uso de simuladores. En el descubrimiento de estas potencialidades y limitaciones, se advierte al estudiante que se debe ser muy cuidadoso con los resultados generados por el simulador y que se requiere de un análisis crítico.

Tras la construcción de las guías se concluye que:

La comprensión de los conceptos fundamentales de las asignaturas Físicoquímica y Termodinámica I, se logra gracias a las ventajas que presenta el uso de los simuladores, tales como:

- Poder establecer comparaciones entre el comportamiento de diferentes compuestos cuando se analiza una propiedad termodinámica.
  - La posibilidad de analizar el perfil de las propiedades termodinámicas y de transporte al trabajar con amplios rangos de temperatura y realizar diferentes corridas de un sistema a varias presiones para estudiar su comportamiento.
  - Mostrar al estudiante cómo es el comportamiento de algunas propiedades termodinámicas a condiciones de trabajo diferentes a las estándar encontradas en la literatura, tales como las condiciones del sitio.
2. Se estudió mediante la revisión de los microcurrículos de las asignaturas de Ingeniería de Procesos, en cuáles cursos es posible aplicar los simuladores de proceso para apoyar la comprensión de los conceptos estudiados en clase. A través de esta revisión se escogieron las asignaturas para realizar la propuesta metodológica aquí descrita. Además con este estudio se evidenció la versatilidad que ofrecen los simuladores de proceso y su función integradora entre los conceptos vistos en diferentes cursos. Se recomienda entonces que esta propuesta sea extendida a las demás asignaturas por el profesorado del departamento de Ingeniería de Procesos.

3. A través de un estudio de las aplicaciones que ofrece Aspen Plus, se encuentra que la interfase *Property Analysis* brinda una opción adicional a la simulación de procesos a través de una amplia base de datos termodinámicos que permite la construcción de gráficos de propiedades termodinámicas y de transporte vs. Temperatura y la construcción de sistemas binarios (equilibrio de fases), aplicaciones que pueden ser empleadas para una mejor comprensión de algunos temas dentro de las asignaturas Fisicoquímica y Termodinámica I, tal como se trata en el capítulo 4.
4. Finalmente, se logró desarrollar una guía que ayuda a la comprensión de conceptos estudiados en clase mediante la solución de preguntas de análisis en el simulador de procesos Aspen Plus; esto en conjunto con una breve explicación teórica y un procedimiento detallado de los pasos a seguir en el simulador para resolver el problema en cuestión. Se proponen además ejercicios. (Ver ANEXOS 2 y 3 y Capítulo 4).

La estructura de las guías formulada en el presente proyecto, aporta una innovación en el planteamiento de talleres prácticos, pues se conjugó la teoría con la práctica por medio de la inclusión dentro de la teoría de preguntas con su respectivo procedimiento en Aspen Plus.

Adicional al estudio de los objetivos de este proyecto y a partir de la experiencia en el desarrollo de este proyecto, se concluye:

5. El simulador de procesos puede ser utilizado como una herramienta que acompañe al estudiante durante su proceso de aprendizaje de las ciencias básicas de ingeniería, podría ayudar a una mayor comprensión de los conceptos vistos en clase; lo cual aplicado en forma gradual de los conocimientos del estudiante, contribuirá al desarrollo de una posición crítica y de evaluación en cursos más avanzados.
6. Para los autores de este proyecto la realización de la guía representa un reto y un aporte muy importante en su desarrollo profesional, por tomar el “rol de profesores”, pudiendo así profundizar en los temas no sólo de simulación, sino de las áreas de fisicoquímica y termodinámica, como de temas pedagógicos.
7. En la posición como estudiantes de Ingeniería de Procesos, se considera que el uso de simuladores de proceso dentro de varias asignaturas de la carrera, no solo desarrolla habilidades computacionales útiles en el desempeño como profesionales, sino que proporciona además una gran ayuda para comprender mejor los temas estudiados, para analizar los problemas desde diferentes ángulos, para proponer nuevas soluciones y con todo ello, generar conocimiento. Los simuladores integran las asignaturas fundamentales de la ingeniería y permiten diseñar y optimizar procesos complejos, lo cual posibilita

formar ingenieros competitivos y sobresalientes, esta hipótesis se plantea si el estudiante tiene la oportunidad de estar en contacto con la simulación de procesos desde cursos inferiores. En conclusión, se encuentra en los simuladores una herramienta avanzada que contribuye a que los estudiantes de Ingeniería de Procesos alcancen a desarrollar gradualmente a lo largo de su carrera todos los niveles cognitivos propuestos por Bloom y por lo tanto contribuya a prepararse para enfrentar los nuevos retos que le depara el mundo actual.

## RECOMENDACIONES

A continuación se describen algunas recomendaciones que los autores de este proyecto de grado proponen al departamento de Ingeniería de procesos:

1. Se recomienda tomar como ejemplo la propuesta aquí planteada para que se diseñen las guías aplicadas a otras materias del currículo de Ingeniería de Procesos: Termodinámica II, Balances de Materia y Energía, Mecánica de Fluidos, Transferencia de Calor, Transferencia de Masa, Manejo de Sólidos, Control Automático de Procesos y Procesos Industriales. Si se desea hacer uso del simulador de procesos Aspen Plus o Hysys, se tiene la alternativa de recurrir a talleres ya desarrollados por otros autores tales como los que se encuentran en la página de Aspen Tech (Ver ANEXO 2).
2. Se recomienda integrar el uso de simuladores no solo con las asignaturas teóricas sino también con las prácticas de laboratorio para que con esto los estudiantes asuman una posición crítica y de evaluación al confrontar los resultados teóricos arrojados por el simulador con los resultados experimentales, o de otro lado, para que integren la experimentación con los software de simulación al convertir los resultados experimentales en los datos de entrada al simulador y de esta forma llevar a cabo diferentes estudios y predicciones del sistema en cuestión.
3. Se recomienda adquirir el paquete de ASPEN Split, necesario para hacer diagramas terciarios, y además la interfase entre Excel y ASPEN, para permitir al usuario modificar los modelos de cálculo y así crear sus propios programas y corregir algunas de las limitaciones que presenta el software. Adicional a esto también se recomienda la compra de los cursos on-line que dispone la página de Aspen-Tech, con el fin de acceder a más aplicaciones a las comúnmente conocidas, y así aprovechar mejor el simulador.
4. Se recomienda que en la asignatura de *Programación de computadores*, se puedan dar algunas bases para la programación en el lenguaje Fortran, puesto que éste es el lenguaje operativo de Aspen, de esta manera los estudiantes estarán en la capacidad de modificar los modelos de cálculo del software, para obtener mejores resultados.
5. Se recomienda inculcar en los estudiantes el hábito de realizar sus propios programas de simulación, en lenguajes de programación como Matlab y Excel, para así ir creando conocimiento y para que una vez se enfrenten a simuladores comerciales, comprendan qué sucede detrás de cada iteración.

## BIBLIOGRAFÍA

1. BANKS, Jerry. (1998). Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice. New York: John Wiley & Sons. p. 849 (Classics in applied mathematics). ISBN 0471134031.
2. BROUSSARD, M. (2002). Maximizing Simulation's Reach. En: Chemical Engineering. No. (May. 2002); p. 50-55.
3. WANKAT, P. (2002). Integrating the Use of Comercial Simulators into Lecture Courses. Purde University. En: Journal of Engineering Education. No. (Ene. 2002); p.19-23.
4. FOGLER, H. Scout. GURMEN, Nihat M. (2002). Aspen Plus<sup>TM</sup> Workshop for Reaction Engineering and Design. Ann Arbor, MI. University of Michigan. Department of Chemical Engineering.
5. MORA, Marcela. (2005). Simulación de procesos industriales en ASPEN. Medellín: Universidad Eafit. 4 p.
6. HARB, John, et al. 1999. "Attributes and Competences of C.E. Graduates", Brigham Young University
7. MARTIN, Lesli. (1997). El primer paso. Proyecto de Dinámica de sistemas en la educación del MIT.
8. ESCOBAR, Jaime. (2005). Modelo sistémico para la formación de un ingeniero clase mundial en Colombia. Medellín: Universidad Eafit.
9. D.R. Lewin, W.D. Seider, J.D. Seader. 2002. Integrated process design instruction. Computers and Chemical Engineering 26. p.p. 295-306.
10. JOSEPHSON, William. (2004). A self assessment of computer science education in Chemical Engineering curriculum. Tuskegee University. Chemical Engineering Department.)
11. BELL, John, FOGLER, Scout. (1995). The Investigation and Application of Virtual Reality as an Educational Tool. University of Michigan. Department of Chemical Engineering.

---

**12.** Programa académico de ingeniería de procesos para la asignatura de Físicoquímica, PR-042.

**13.** Programa académico de ingeniería de procesos para la asignatura de Termodinámica, PR-050.

**14.** ESCOBAR, Jaime. (2005). Contenidos Programáticos de la Ingeniería de Procesos. Medellín: Universidad Eafit. 79 p.