

## **SIMULACIÓN Y ANÁLISIS ECONÓMICO PRELIMINAR DE UN COMPLEJO DE FERTILIZANTES USANDO GAS DE CAMISEA**

**J. Porlles L.<sup>1</sup>, J. Cárdenas R.<sup>2</sup>**

### **RESUMEN**

El hecho de que el Perú cuente con importantes reservas de gas natural como el de Camisea abre oportunidades potenciales para el desarrollo de la gasoquímica. En el marco de una mayor competencia empresarial en la industria, cada vez es más generalizado contar con herramientas como soporte para el mejoramiento de procesos y ahorro de costos. La simulación y optimización de procesos industriales con ayuda de computadora es una poderosa alternativa. El propósito de este trabajo es realizar el diseño de procesos y análisis económico con carácter preliminar de un complejo de fertilizantes integrado por diversas plantas: amoníaco, ácido nítrico, nitrato de amonio y urea. La complejidad de abordar la simulación en procesos en donde se suceden reacciones de transformación en todas las etapas de la planta, como es el caso de ácido nítrico, requiere gran dominio, no solo en el uso de un simulador potente, sino profundo conocimiento de la cinética de las reacciones y de la termodinámica del proceso tecnológico en todas las etapas. El análisis económico preliminar efectuado indica que los índices de rentabilidad son bajos, reflejo de condiciones de operación que tienen que mejorarse en una etapa posterior contando con una mayor información técnica.

**Palabras clave:** Simulación, análisis, procesos, costos, rentabilidad.

### **SIMULATION AND PRELIMINARY ECONOMIC ANALYSIS OF A COMPLEX OF NUTRIENTS USING CAMISEA GAS**

#### **ABSTRACT**

Peru is in fact a country with important reservoirs of natural gas as Camisea and it opens potential opportunities for gas chemical development. In a mark of a higher enterprise competitiveness, in industry any time is more generalized to account with tools as support for enhanced of process and cost savings. The simulation and optimization of industrial process aided by computer is a powerful alternative. This work has as propose to make the design of a process an economical analysis with preliminary character of an integrated fertilizer complex for several plants: ammonia, nitric acid, ammonia nitrate and urea. The complex to treat the simulation in process where the transformation reactions happen in all steps of the plant, as is the case of nitric acid; it requires a great domain, not alone in the use of a powerful simulator, but a deeper knowledge of reaction kinetics and the thermodynamics of technological process in all steps. The preliminary economical analysis made it indicates that the profitability indexes are low; it reflexes conditions of operation that it has to be improve in another step with more technical information.

**Keywords:** Simulation, analysis, processes, costs, profitability.

1 Departamento Académico de de Análisis y Diseño de Procesos, FQIQ-UNMSM. joseporlles@yahoo.com

2 Departamento Académico de de Análisis y Diseño de Procesos, FQIQ-UNMSM. jcardenasr@terra.com

## INTRODUCCIÓN

El Perú contaba con tres plantas de producción de fertilizantes nitrogenados (Fertisa S.A. en el Callao; Industrial Cachimayo S.A. en el Cusco, ambas producían nitrato de amonio; y PETROPERU, que fabricaba urea, en Talara), estas fueron desactivadas a inicios del 90 para ser privatizadas. Sus infraestructuras actuales tienen otros usos, habida cuenta que los procesos tecnológicos configuraban antieconómico, razón por la cual dejaron de ser operadas.

Desde esa fecha hasta la actualidad, el Perú viene importando dichos fertilizantes que son de uso extensivo en el sector agrícola. Los consumos promedios en los últimos años alcanzan, aproximadamente, las 400 000 toneladas de urea y cerca de 40 000 toneladas de nitrato de amonio, equivalente a una salida de divisas que arriba a los 100 millones de dólares anuales.

Con la ampliación de la frontera agrícola del país y la dinámica de la producción y exportación de productos agrícolas, las perspectivas de la demanda de dichos productos se configuran como alentadoras, justificando que el Perú nuevamente analice la posibilidad de instalar plantas productivas.

De otra parte, la reciente puesta en marcha de la explotación y desarrollo del gas de Camisea abre nuevas fronteras para el país, para el desarrollo de una futura industria petroquímica. En una primera etapa y por conveniencia económica, se proyecta la conveniencia de instalar las plantas productivas de fertilizantes (urea, nitrato de amonio agrícola y técnico) sobre la base del gas natural y el amoniaco, producto que corresponde a la primera etapa de explotación industrial del gas natural y que sirve como materia prima para la producción de fertilizantes nitrogenados.

El dimensionamiento de las plantas productivas no solo estaría orientado a satisfacer las necesidades de un mercado interno creciente, sino, también, a cubrir estos re-

querimientos en el mercado internacional, debiéndose indicar las crecientes necesidades de Argentina y Brasil, para sostener sus incrementos importantes en la ampliación de su frontera agrícola.

Diversos estudios indican que a pesar que Brasil, Venezuela y Argentina son importantes productores en América Latina, resulta que tanto Brasil como México y Argentina también importan fertilizantes en volúmenes importantes. Así, por ejemplo, se estima que Brasil registra una demanda insatisfecha de 1700 miles ton/año. Según la Chemical Engineering (octubre de 1998); para el año 2005, se necesitaba implementar por lo menos unas 45 nuevas plantas con una capacidad de 1750 miles ton/año cada una, para satisfacer la fuerte expansión del mercado de la urea en este caso; de manera similar, el panorama se presenta para el caso de nitrato de amonio agrícola y nitrato de amonio técnico grado ANFO para uso en minería.

El gas de Camisea ofrece una oportunidad para obtener materia prima en cantidad suficiente y a un precio competitivo que permita elevar el nivel de productividad de una planta de amoniaco, y por tanto la producción de urea y nitrato de amonio, posibilitando de esta manera construir una industria nacional de fertilizantes, que permitirá a su vez crear un polo de desarrollo en la localidad en donde se ubique esta industria (prevista en la localidad de Pisco), desarrollando puestos de trabajo, aumento del valor agregado del gas natural, apoyo al desarrollo de la agricultura y la agroindustria, generación de divisas e, indirectamente, la generación de tecnologías vinculadas a la industria de procesos.

Es más conveniente para el país darle valor agregado al gas natural, frente a la alternativa de exportarlo como materia prima. En el Perú, a largo plazo, se debe contar, como mínimo, con un complejo petroquímico de fertilizantes como el que se señala en la Figura N.º 1.

## DISEÑO EXPERIMENTAL

### Propuesta metodológica

No obstante la producción de nitrato de amonio y ácido nítrico están regidas por ecuaciones estequiométricas y por leyes y principios termodinámicos, esta información no es suficiente para lograr el funcionamiento de cada una de las etapas del proceso completo, en las cuales se producen fenómenos que caen en el campo de las Operaciones Unitarias y Procesos Unitarios. Se requiere un conocimiento profundo y amplio de estas materias que corresponden a la gran amplitud de la Ingeniería Química, lo que configura, en cierta manera, la complejidad del proyecto.

Como se desprende de lo anterior, no es suficiente saber usar el simulador para realizar las corridas experimentales. Entonces, al margen de la necesidad de contar con información teórica y las condiciones de operación que rigen en las plantas industriales en operación, se requiere contar con un método.

### Marco conceptual del trabajo

Comprende la metodología siguiente:

1. Previamente se realizó el estudio del mercado mundial incluyendo la región de América Latina y el Perú, para proyectar la capacidad productiva del Complejo.
2. Recopilar información descriptiva del proceso que permita construir el diagrama de flujo de procesos (PFD), incluyendo las condiciones de operación (variables operativas); así como la estequiometría, la cinética de la reacción y condiciones de equilibrio y termodinámica de los procesos de transformación físico-química y química.
3. Construir la topología del proceso, con indicación de las principales corrientes de proceso y servicios generales (utilities) e identificación de los principales equipos.
4. Realizar, a nivel manual, el balance de materiales y energía (BME) a nivel de cada etapa y a nivel global.
5. Proceder a la simulación a nivel de equipo, ingresando la información (input) y contrastando los resultados (output) que arroja el simulador, con los datos obtenidos en el BME. Se utilizaron los programas CHEMCAD, HYSYS y ASPEN.
6. Una vez verificada la simulación de los equipos del PFD, se procede a la simulación a nivel de la planta global.
7. Dimensionar los equipos en función del BME.
8. Mediante la técnica Bare Module Cost (BMC), se estiman los costos de equipos en función de su escala, material de construcción y la presión de trabajo del sistema. Luego, se calcula el plan de inversión fija. No se ha considerado el capital de trabajo.
9. Estimar los costos operativos bajo la forma de costo variable unitario (CVU) y costos fijos.
10. Estimar la inversión a nivel de planta de procesos, vale decir, en Límite de Batería. Este costo será calculado a precios actuales puesto la planta en el Perú.
11. Estimar la rentabilidad económica preliminar como retorno de la inversión (ROI)

### Marco teórico

#### **La estrategia de procesos y la simulación de procesos**

Dentro de la estrategia general de la ingeniería de procesos, el diseño de procesos puede considerarse constituido por tres etapas: síntesis de procesos, simulación de procesos y optimización.

La síntesis de procesos es la etapa en la que se crea la estructura básica del diagrama de flujo; esto es, se seleccionan los equipos a ser utilizados, con sus correspondientes interconexiones, y se establecen los valores iniciales de las condiciones de operación.

La Simulación de procesos es la etapa en la cual se requiere solucionar balances de materia y energía para un proceso en estado estacionario, calcular dimensiones y costos de los equipos y efectuar una evaluación económica preliminar del proceso.

La optimización puede ser paramétrica, modificando parámetros tales como presión o temperatura; o estructural, cuando se hacen modificaciones al diagrama de flujo involucrando a los equipos y sus interconexiones.

La aplicación de la simulación de procesos químicos, se enfoca en:

- Detección de cuellos de botella en la producción.
- Predicción de los efectos de cambio en las condiciones de operación y capacidad de planta.
- Optimización de las variables de operación.
- Transformación de un proceso para desarrollar otras materias primas.
- Optimización del proceso cuando cambian las características de los insumos y las condiciones económicas del mercado.
- Análisis de condiciones críticas de operación de procesos.
- Análisis de nuevos procesos para nuevos productos.
- Análisis de factibilidad y viabilidad de nuevos procesos.
- Optimizar el proceso para minimizar costos de producción.
- Entrenamiento de operadores e ingenieros de planta.
- Investigación de la factibilidad de automatización del proceso.

#### ***Elección del modelo termodinámico usado en el proceso***

El modelo termodinámico que describe el comportamiento de las propiedades físicas de las sustancias involucradas en el proce-

so, es uno de los análisis iniciales antes de empezar la simulación de este, debido a que este predice, de manera aproximada, el comportamiento termodinámico de las diferentes fases involucradas en el proceso, por tanto, es de suma importancia elegir bien el modelo termodinámico a usar.

Los pasos para elegir el modelo apropiado para predecir las propiedades físicas se encuentran en diferentes trabajos de investigación en el área de simulación de procesos, los cuales se resumen de la siguiente manera: El paso inicial es definir la polaridad de las sustancias, de acuerdo a la Figura N.º 2 si la sustancia es polar, entonces se define si son electrolitos o no, en caso de ser electrolitos el modelo a usar es el de Electrolyte NRTL o Pitzer.

Para el caso del amoniaco, por ejemplo, de la Figura N.º 1, se obtiene que para compuestos no polares se cuenta con dos opciones, trabajar con pseudocomponentes o con componentes reales. En este caso, se selecciona la opción de componentes reales, lo cual da como resultado el modelo de Peng-Robinson.

Estas reglas son de gran ayuda para la predicción del comportamiento termodinámico de los componentes en la simulación.

## **MÉTODOS Y RESULTADOS**

A continuación se desarrolla el Proyecto, para lo cual se han utilizado una serie de herramientas de análisis y técnicas de la ingeniería de procesos para arribar a determinados resultados.

### ***Dimensionamiento del complejo***

Era necesario realizar la simulación de los procesos pero con un sentido aplicativo, vale decir, los tamaños de planta tenían que responder a las necesidades del mercado. En este sentido, se ha efectuado un estudio de mercado a nivel mundial, tomando como base la información de International Fertilizer Association (IFA)

que reúne a los principales productores de fertilizantes a nivel mundial. Asimismo, se ha contado con datos sueltos de la demanda en Brasil y Argentina. En el caso del Perú, la data se ha encontrado a partir de la información de importaciones.

Con este análisis, se ha logrado dimensionar las plantas del complejo, tal como se aprecia en el Cuadro N.º 1.

### **Resultados de la simulación y análisis económico preliminar de las plantas**

El desarrollo del trabajo ha sido amplio. Los detalles se encuentran en los documentos anexos al Informe Técnico presentado a la Unidad de Investigación de la Facultad de Química e Ingeniería Química de la UNMSM, en el año 2006.

Como se ha mencionado, dentro de la complejidad de este proyecto, dada la envergadura de sus alcances, se ha logrado los avances siguientes:

- a) Concretar la simulación con ayuda de software de las plantas siguientes: nitrato de amonio grado agrícola, además de las plantas: amoniaco y urea; habiéndose realizado el análisis económico preliminar para conocer si estos resultados corresponden a un proceso con características de viabilidad comercial.
- b) Estimar solo el análisis económico preliminar de la planta de ácido nítrico, debido a su altísima complejidad para su simulación, habida cuenta que se producen reacciones desde que ingresa el amoniaco. Esto se debe a que la reacción principal que se lleva a cabo con catalizadores a base de platino, por la naturaleza del diseño del proceso, el catalizador es arrastrado en todas las corrientes del proceso, lo que da lugar a que se produzcan reacciones no solo en el reactor, sino también en diferentes etapas del proceso global. Todas son reacciones cinéticas, no de conversión, salvo en el reactor. Para dominar la simulación, se

requiere conocer, entre otros datos, la cinética química (constante de equilibrio a diferentes presiones) en cada equipo o etapa de separación; lo que ha sido imposible de obtener en esta etapa.

Para salvar esta situación, se requiere de mayor información termodinámica en profundidad de estos fenómenos que se suceden, sin las cuales es difícil avanzar.

- c) La simulación de tres plantas es un logro mucho mayor de lo previsto, a pesar de no haberlo conseguido para el caso de ácido nítrico.
- d) Los indicadores económicos solo muestran que se requiere continuar en una segunda etapa correspondiente a la optimización, precisamente para optimizar las condiciones de operación y obtener un proceso que proporcione ventaja de su viabilidad comercial. La tarea de optimización requiere un mayor tiempo de trabajo.
- e) Demostrar que en esta nueva línea de investigación "Simulación y Estrategias en Ingeniería de Procesos", que es amplísimo y de envergadura, por cuanto integra variados conceptos y técnicas de la Ingeniería Química, es factible de incursionar, para convertirse en una de las fortalezas futuras del área de Ingeniería Química en la UNMSM.
- f) Incremento de las capacidades, es decir, know how, a nivel docente y plana estudiantil de Colaboradores del proyecto, en el manejo de herramientas computacionales como: Chemcad, Hysys y otras.
- g) Demostrar a la comunidad universitaria y empresarial que la universidad cuenta con las capacidades para ofrecer servicios en esta área de la ingeniería de procesos.

En resumen, en el Cuadro N.º 2 se presentan los parámetros de medición más representativos.

### **Limitaciones en el Trabajo**

- Tiempo que se requiere invertir en el proceso de aprendizaje inicial para conocer y, en cierta manera, dominar las herramientas que proporciona el simulador.
- Limitada posibilidad de acceso a fuentes de información de artículos de investigación científica vinculadas con tópicos específicos que corresponden a las etapas de proceso de las plantas en mención; muchos de los cuales se ubican en distintos países (USA, Inglaterra, Australia, etc.).
- Limitada capacidad en recursos económicos para adquirir libros y revistas que describen con amplitud tópicos termodinámicos, cinética de la reacción y aspectos específicos de los procesos de las plantas en mención. La inversión en estos documentos rebasa la asignación presupuestal asignada para el proyecto en el año 2006.
- Complejidad en la simulación de un proceso que implica fluidos y sólidos. Ejemplo, casos de nitrato de amonio y urea. Sucede que en la parte final de la producción de nitrato de amonio se obtiene un fluido líquido, que mediante el proceso de prilling, se genera un cambio de la condición física y se obtiene un producto final granulado. El simulador usado no respondía esta conectividad de pasar de líquido a sólido. Al final, se ha tenido que optar por hacer la simulación solo hasta la etapa de líquido. Caso similar sucede con la urea.
- Complejidad en el caso que se producen reacciones de transformación en diferentes partes del proceso. Ejemplo, caso de ácido nítrico, aspecto que se desconocía cuando se eligió el tema.

### **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN**

El trabajo ha permitido ingresar en firme a un proceso de aprendizaje en la investigación de la ingeniería de procesos con ayuda de software (construcción del diagrama de flujo

de procesos, su topología, precisando las condiciones de operación que aseguren que en una situación real funcione la planta, área que hasta la fecha no había sido abordada en la facultad), para tratar de cerrar la brecha en relación con otras universidades de América Latina, como la Universidad del Valle (Colombia) y universidades de México y Argentina; marcando, además, un liderazgo a nivel de las universidades nacionales.

Asimismo, se ha logrado recopilar otras herramientas informáticas complementarias al Chemcad, como el Super Pro Designer, HYSYS y el ASPEN PLUS, como simuladores más potentes que el Chemcad; permitiendo en el futuro, junto con el primero, facilitar la simulación de los cálculos técnicos y económicos. La ventaja de estos simuladores es que tienen incorporados una diversidad de modelos termodinámicos que permiten una mayor holgura y seguridad durante el análisis; de modo tal que hay más confiabilidad en los resultados obtenidos. Al respecto, debe anotarse que no es suficiente con encontrar o identificar dichas herramientas, la clave es saber usarlas y dominarlas, lo que implica, a su vez, todo un proceso de aprendizaje adicional.

### **CONCLUSIONES**

Se ha demostrado un gran esfuerzo al concretar la simulación con ayuda de software, de tres plantas industriales, pasando de un nivel de conocimiento prácticamente cero en esta área de investigación, a un nivel relevante.

Se cuenta con capacidad académica, y técnico-científica para abordar temas complejos en trabajos de investigación similares en el campo de la simulación, que requiere un amplio conocimiento de las Operaciones y Procesos Unitarios que forman parte de la médula central de la Ingeniería Química.

La rentabilidad medida como retorno sobre la inversión (ROI) proporciona una primera aproximación sobre la bondad del proyecto como complejo industrial.

En consecuencia, es importante que los avances obtenidos continúen en una segunda etapa denominada etapa de optimización de procesos, para lograr condiciones de operación viables comercialmente.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Rudd F, Watson Ch. Estrategia en Ingeniería de Procesos. Ed. Alhambra S.A., 1982.
- [2] Beveridge & Schechter. Optimization: Theory and Practice. McGraw-Hill Chemical Engineering Series, 1970.
- [3] Chemstations, Inc. CHEMCAD - User Guide, Texas, USA.
- [4] Turton, Bailie y Whiting. Analysis, Synthesis and Design of Chemical Process. Prentice Hall, 1999.
- [5] Peters & Timmerhaus. Economics and Plant Design for Chemical Engineers. McGraw-Hill, 1991.
- [6] Porlles J. Serie Economía Aplicada a los Procesos. Parte 1, 2, y 3, Vols 7 (2004) y 8 (2005). Rev Per Quím e Ing Quím. UNMSM.
- [7] Martínez V et al. Simulación de Procesos en Ingeniería Química. México: Plaza y Valdés Editores, 2000.
- [8] Couper J. Process Engineering Economics. New York: Marcel Dekker, Inc. 2003.
- [9] Baasel W. Preliminary Chemical Engineering Plant Design. New York: Editorial El Sevier, 1974.
- [10] Consejo Superior de Investigación - UNMSM. Informe Técnico del Estudio de Investigación 2006: Simulación y optimización de los procesos de ácido nítrico y nitrato de amonio en un complejo de fertilizantes usando gas de Camisea. 2006.

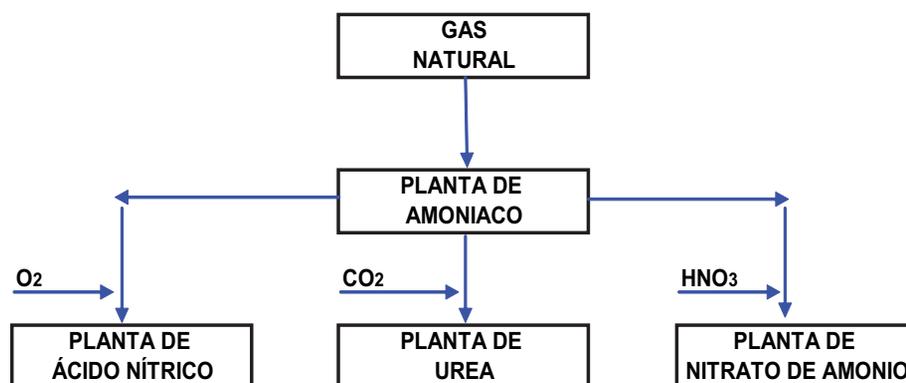
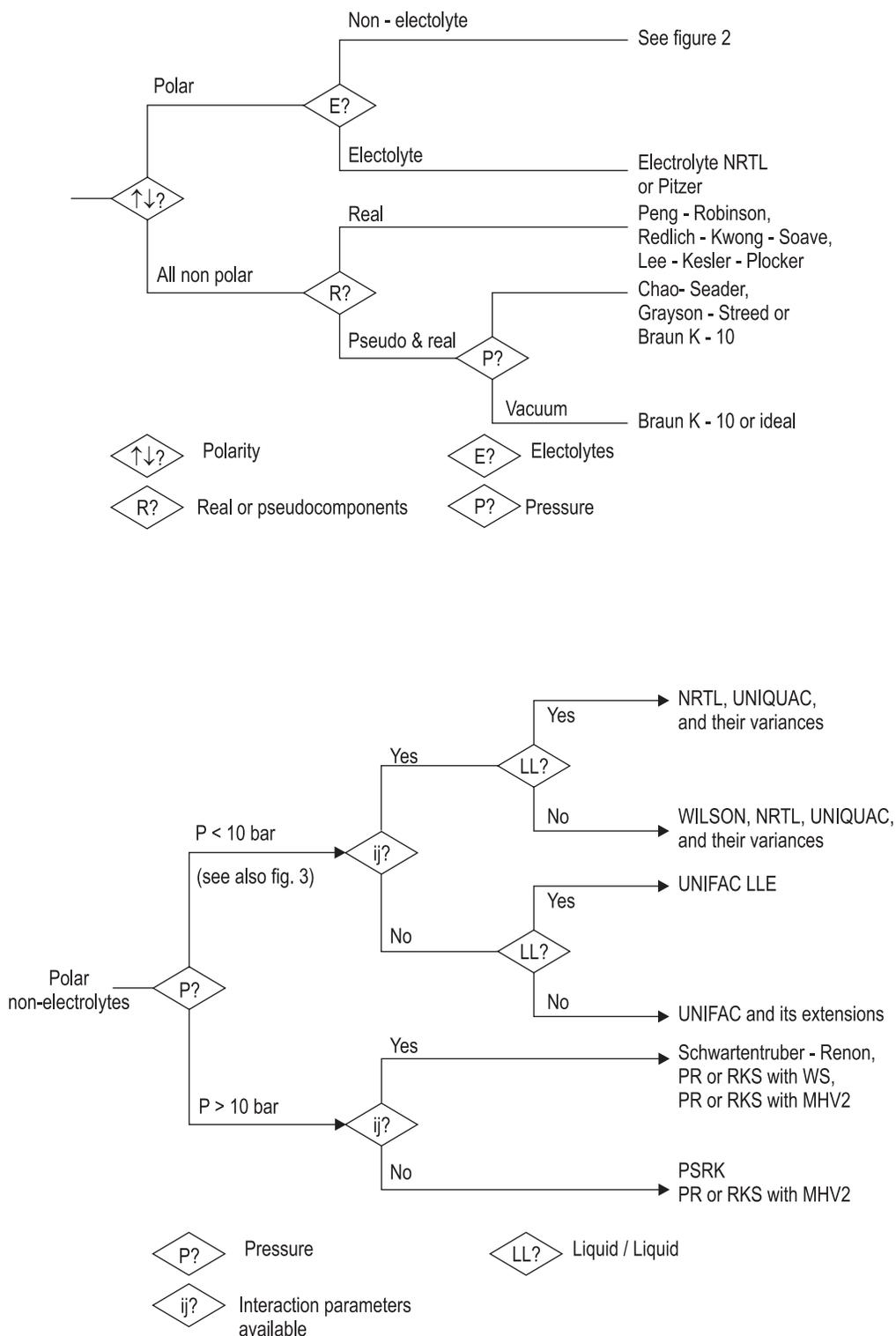
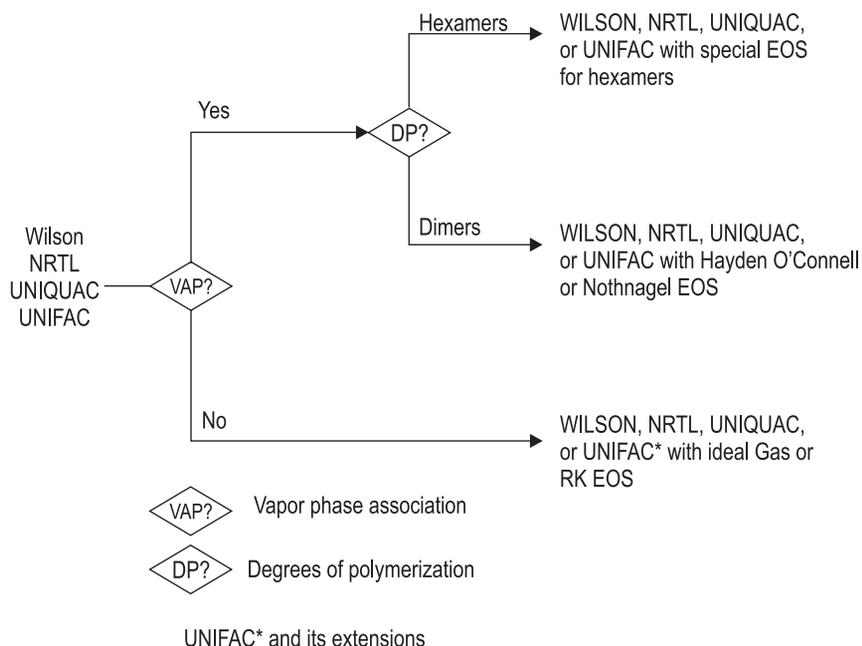


Figura N.º 1. Esquema del complejo de fertilizantes.

**Figura N.º 2.** Diagrama para ayudar la selección del modelo termodinámico (Fuente: Martínez, V. y otros; Simulación de Procesos en Ingeniería Química. Edición Plaza y Valdés Editores, México, 2000)





**Cuadro N.º 1.** Diseño de capacidad del complejo de fertilizantes usando gas de Camisea (Proyecto de Investigación, Código CSI-UNMSM 060702101) 3 julio de 2006.

Base: Resumen ejecutivo - Estudio de mercado de fertilizantes						
Base: Condiciones de operación:					330	días / año
Producto	Tamaño de planta	Insumos	Insumo / producto	Necesidades / Insumos		
	Ton/año    Ton/día	Clave	por 1 kg	Ton / año	Ton / día	
Amoniaco	NH <sub>3</sub>	1,500	Gas natural			
Urea	NH <sub>4</sub> CO	792,000    2,400	Amoniaco, kg	0.570	451,440	1,368
			CO <sub>2</sub> , kg	0.750	594,000	1,800
Nitrato de amonio	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	60,000    182	Amoniaco, kg	0.251	15,060	46
			Ácido nítrico	0.914	54,840	166
Acido nítrico	HNO <sub>3</sub>	55,000    167	Amoniaco, kg	0.287	15,785	48
			O <sub>2</sub> del aire, 5.15 kg	5.150	283,248	858
		Total	Amoniaco		482,285	1,461

**Anotaciones:**

- 1) Planta de amoniaco: Desde el punto de vista económico y técnico, la tendencia mundial apunta a construir plantas con un tamaño razonable promedio de de 1,500 ton/día.  
La planta abastecería a las plantas terminales: urea, nitrato de amonio agrícola y ácido nítrico.
- 2) La planta de urea está dimensionada para satisfacer una demanda: 1,500 ton/día mercado interno y 900 ton / día para el mercado de exportación.
- 3) La planta de nitrato de amonio agrícola dimensionada para atender principalmente el mercado interno y parte para exportación.

**Cuadro N.º 2.** Parámetros de resultados de medición más representativos.

<b>Parámetros</b>	<b>Amoniaco</b>	<b>Ácido nítrico</b>	<b>Nitrato de amonio</b>	<b>Urea</b>
Simulación	Concretado	No concretado	Concretado	Concretado
Evidencia	Reporte del simulador Hysys 3.1		Reporte del simulador Chemcad 5.2	Reporte del simulador Aspen plus
Modelo termodinámico	Peng Robinson		Wizard	Unifac
Tamaño de planta (ton / día)	1200	167	182	2400
Inversión total límite de batería (miles de dólares)	38 268	Aprox. 17 000	3974	105 000
Rentabilidad: TIR Que refleja las condiciones de operación en la simulación lograda	23,0%	Aprox 15%	9.70%	4,0%