

# EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO FOSFÓRICO CON ROCA TOGO EN TRIPOLIVEN C.A.

López, D.<sup>(1)</sup>; Bruce, J.<sup>(1)</sup>; González, N.<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Escuela de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo. Valencia. Estado Carabobo. Venezuela

<sup>(2)</sup> Escuela de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería. Universidad Experimental Francisco de Miranda. Coro. Estado Falcón. Venezuela  
email: delu1987@hotmail.com

**Resumen:** El objetivo de la investigación es evaluar el sistema de concentración de ácido fosfórico con roca Togo en Tripoliven C.A. Inicialmente se determinó la condición a la que operaba la planta, el estado en que se encontraban los equipos principales, y las características del producto terminado. De la misma forma se realizaron los balances de masa y energía en dicho sistema, información que puede ser usada para realizar diseños de proyectos posteriores, evaluaciones económicas, y optimizar el proceso. Lo obtenido de los balances permitió recomendar condiciones de operación para los flujos de vapor y recirculación de ácido y para la presión de vacío del evaporador, y la implementación de sistemas de control para el manejo de agua de enfriamiento y de temperatura del ácido. Adicionalmente, se recomendó como alternativa el uso de un filtro, un floculante o un surfactante a fin de reducir el contenido de sólidos en el ácido.

**Palabras clave:** Ácido fosfórico, balances, concentración, evaluación.

## EVALUATION OF PHOSPHORIC ACID CONCENTRATION SYSTEM WITH TOGO ROCK AT TRIPOLIVEN C.A.

**Abstract:** The objective of the research is evaluate the system of phosphoric acid concentration with Togo Rock in Tripoliven C.A. Initially were determined the condition which the plant was operating, the state the main equipment were, and characteristics of the finished product. In the same way were mass and energy balances in the system, information that can be used future project design, economic evaluation, and optimize the process. The proceeds of the balance allowed to recommend operating conditions for recirculating acid and vapor flows and vacuum pressure evaporator, and implementation of control systems for handling cooling water and acid temperature. Additionally, it was recommended as an alternative the use of the a filter, a flocculant or a surfactant to reduce the solids content in the acid.

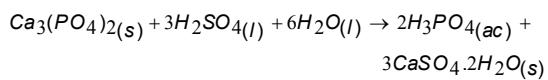
**Key words:** Evaluation, concentration, phosphoric acid, balances.

## INTRODUCCIÓN

El ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ) es el principal ácido inorgánico producido y consumido en cuanto a términos de valor de producción se refiere y el segundo en términos de volumen (después del ácido sulfúrico) (Chemical Economics Handbook, 1986).

Más del 80% del ácido fosfórico producido es usado principalmente en la producción de fertilizantes agrícolas; el resto en aditivos a detergentes, productos de limpieza, insecticidas y farmacéuticos. (González, 2004).

La reacción principal en la producción de ácido fosfórico por el proceso húmedo, a partir de roca fosfática y ácido sulfúrico, es la siguiente:



Inicialmente se hace pasar la roca por un proceso de molienda, con el objetivo de aumentar su superficie de contacto e incrementar su velocidad de reacción con el ácido. Luego se mezcla con ácido fosfórico al 17% proveniente de la segunda etapa de filtración y lodo procedente de los decantadores, con el fin de proporcionar las moléculas de agua necesarias para la formación del sulfato de calcio dihidratado. La mezcla resultante se hace reaccionar con ácido sulfúrico, manteniendo la temperatura cerca de 82 °C. Las sustancias formadas pasan por un proceso de filtración, donde se separa el ácido obtenido del yeso ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), la fase líquida se pone en contacto con roca fosfática para reducir la acidez sulfúrica, y se adiciona un floculante con el que precipita el sulfato de calcio suspendido. Finalmente, el ácido se almacena en unos decantadores para sedimentar los sólidos, obteniéndose un ácido fosfórico con una concentración de 28%  $P_2O_5$ . El ácido fosfórico proveniente del primer

filtrado o de los decantadores, pasa a un evaporador a vacío con recirculación forzada, provisto de una bomba axial, cuya función es hacer circular el ácido, proveniente del cono de descarga de la cámara de separación, en forma ascendente a través de los tubos de grafito del calentador. En dicho equipo, el ácido aumenta su temperatura gracias al vapor saturado que circula por la coraza; luego entra por la parte superior de la cámara de expansión, donde existe un vacío producido por dos eyectores, donde los gases calientes abandonan el ácido fosfórico, aumentando su concentración a un 52 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.



**Figura 1. Diagrama de proceso de producción de ácido fosfórico de Tripoliven C.A**

La conveniencia de esta investigación radica en el aporte de información actualizada a la empresa, sobre los equipos utilizados, lo cual contribuye a un uso más adecuado de los mismos. Así como también, sobre las condiciones de operación de dicho sistema, con lo que se planteará un empleo más apropiado de los servicios industriales y se podrá cuantificar la cantidad de producto no aprovechado.

Los objetivos de la presente investigación son los siguientes: evaluar la condición actual del proceso de concentración de ácido fosfórico, realizar los balances de masa y energía en el sistema de concentración de ácido fosfórico, indicar condiciones de operación en el sistema de concentración de ácido fosfórico, proponer mejoras en el sistema de concentración de ácido fosfórico y determinar la relación costo-beneficio de las mejoras propuestas.

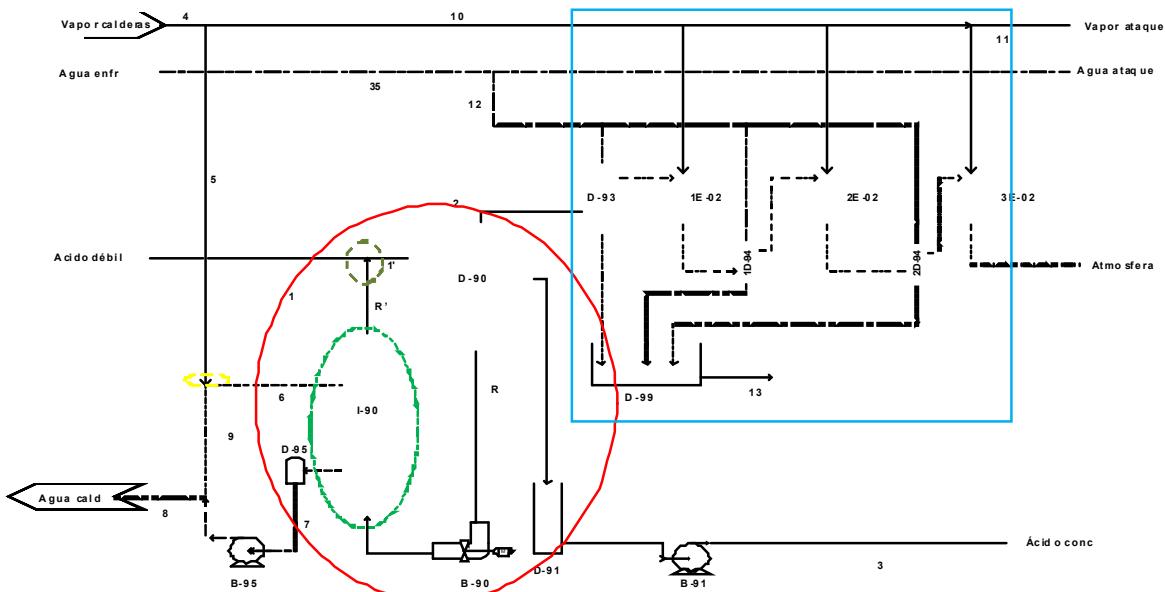
## METODOLOGÍA

### Evaluar las condiciones actuales del sistema de concentración de ácido fosfórico en Tripoliven C.A

Inicialmente, se realizó una revisión bibliográfica del funcionamiento de los principales equipos del sistema de concentración (evaporador, calentador y condensadores) y de los principales fenómenos que rigen los mismos. Para ello se buscó información en trabajos de grado de la Universidad de Carabobo relacionados con el problema en estudio, en las bases de datos EBSCO y PROQUEST, publicaciones en la web de sistemas similares al estudiado y libros de texto del área de ingeniería química. Posteriormente, se analizó el diagrama de flujo del sistema de concentración de ácido fosfórico suministrado por el servicio técnico de la empresa, para determinar la secuencia de cada una de las corrientes y comparar con lo ocurrido en la planta. Luego se revisó el manual técnico de la planta y se verificó el cumplimiento de cada una de las operaciones por parte del personal que labora en ella. Despues se hizo un seguimiento a cada línea del proceso (vapor, ácido fosfórico, agua de enfriamiento) con el fin de verificar la existencia de los equipos en tanto el diagrama de flujo como en el manual de operaciones y en el panel de control, la condición en que se encuentran éstos y la operatividad de los instrumentos de medición de variables locales. Seguidamente, se identificaron las variables medidas en el sistema y sus valores, además de determinar cuales se consideran controlantes del proceso.

### Realizar balances de masa y energía en el sistema de concentración de ácido fosfórico

Al revisar el diagrama de flujo del sistema de concentración de ácido fosfórico se identificaron los volúmenes de control (ver figura 2). Luego se observó el proceso en planta para identificar los puntos en los que se medirían las variables; debido a diversos factores, se decidió tomar estos valores desde el panel de control, donde se medían con una precisión aceptable. En la tabla N° 1 se presenta una lista de las variables medidas.



**Figura 2. Diagrama de volúmenes de control del sistema de concentración de ácido fosfórico**

**Tabla N°1. Variables medidas en el sistema de concentración**

Variable	Significado
$T_{1.1}$	Temperatura del ácido 28 % $P_2O_5$ en el decantador D-65, °C
$T_{1.2}$	Temperatura del ácido 28 % $P_2O_5$ en el decantador D-66, °C
$T_2$	Temperatura del agua evaporada, °C
$T_5$	Temperatura del vapor proveniente de servicios industriales, °C
$T_6$	Temperatura del vapor atemperado alimentado al calentador, °C
$T_{13}$	Temperatura del agua de enfriamiento alimentada a los condensadores, °C
$T_{17}$	Temperatura del agua caliente proveniente de los condensadores, °C
$T_R$	Temperatura del ácido 52% $P_2O_5$ alimentado al calentador, °C
$T_{R'}$	Temperatura del ácido 52% $P_2O_5$ que sale del calentador, °C
$P_2$	Presión de operación del evaporador por expansión, mmHg
$P_5$	Presión del vapor proveniente de servicios industriales, psia
$P_6$	Presión del vapor atemperado alimentado al calentador, psia
	Flujo másico total de vapor proveniente de servicios industriales, TM/h
	Flujo másico de vapor de servicios industriales alimentado a sistema, TM/h

Después se utilizó una herramienta estadística conocida como teorema central del límite, con el objetivo de determinar el tamaño necesario de la muestra para calcular el valor esperado de estas variables y estimar el intervalo de confianza. Para ello, se tomaron 31 datos de cada variable con el fin de aproximar el comportamiento a una distribución normal y estimar una desviación estándar. Después se tomaron los datos necesarios hasta completar el tamaño de la muestra (Johnson, 1997).

Luego se aplicaron los principios de conservación de la masa y la energía a cada volumen de control seleccionado y las expresiones obtenidas para cada caso se evaluaron utilizando los valores promedios de las variables, para obtener un valor representativo de las condiciones generales en que opera la planta.

Para realizar los balances se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Sistema estacionario, por lo tanto no existe acumulación de materia.
2. No existe variación de energía potencial ni cinética.
3. Las pérdidas de calor se atribuyen solamente al intercambiador de calor por lo tanto, los demás equipos y puntos de mezcla son adiabáticos.
4. Se considera que la solución está compuesta principalmente por agua y ácido fosfórico.
5. El flujo de vapor a los condensadores se fija en 4,60 TM/h (valor de diseño), pues no existe la instrumentación para medirlo.

6. Para el estudio del sistema de vacío, se considera el modelo de caja negra, por la poca instrumentación presente. Por lo que se recomienda aumentarla, para así realizar estudios más precisos.
7. Se considera despreciable la corriente de incondensables saliente del sistema de vacío.
8. La presión atmosférica es de 760 mmHg.
9. La concentración de  $P_2O_5$  en el ácido débil y el concentrado es 28 % y 52 %, respectivamente.

### **Condiciones de operación en el sistema de concentración de ácido fosfórico**

Para la realización de este objetivo, se determinaron las condiciones mínimas de operación en el sistema de concentración de ácido fosfórico, utilizando los balances de masa y energía y la información de presiones de vapor referentes al ácido fosfórico obtenido a partir de la roca Florida. Luego ésta se comparó con la obtenida para las condiciones actuales de operación y de diseño de planta, con el fin de determinar las condiciones más adecuadas en este sistema y las necesarias para obtener un producto dentro de especificación y con un mejor manejo de los servicios industriales.

Además, se recomendaron sistemas de control para la temperatura del ácido en el separador y para el manejo del agua de enfriamiento alimentada a los condensadores barométricos.

### **Proponer mejoras en el sistema de concentración de ácido fosfórico**

Inicialmente, se buscaron por internet las patentes que permitirían mejorar el sistema de concentración de ácido fosfórico (en el sitio web freepatentsonline) y donde se encontraron tres alternativas para reducir el contenido de sólidos en el ácido fosfórico concentrado. Posteriormente se verificó la factibilidad de obtener insumos en el mercado para implementar cada mejora; se determinó la capacidad de los equipos requeridos y la cantidad de reactivo requerido según cada caso. Finalmente, se aplicó una matriz de selección para determinar cual es la mejora más adecuada.

Para seleccionar la mejora, se establecieron y ponderaron criterios de selección. Estos son costos, requerimientos de mantenimiento, de operación y control, eficiencia del proceso y requerimientos de espacio físico. A cada uno se le asignó un porcentaje según su grado de importancia, y así cumplir con los requerimientos de la investigación. Finalmente, se evaluaron las propuestas tomando en cuenta cada criterio, asignándole un valor de 0 a 5, de acuerdo a

la forma en que satisficieran éstos. La alternativa seleccionada fue la que obtuvo la mayor puntuación.

Determinar relación costo - beneficio de las mejoras propuestas en el sistema de concentración de ácido fosfórico

Para la realización de este objetivo, se investigaron los costos de los materiales y reactivos requeridos para las mejoras. Luego se determinaron los beneficios económicos obtenidos para cada una de éstas, también se estimó el impacto económico que ellas ejercían sobre el proceso. Con dichos parámetros se determinó la relación costo - beneficio. El resultado obtenido se analiza, para determinar cual de las alternativas propuestas es más factible económicamente, y comprobar de esta manera los resultados arrojados por la matriz de selección.

## **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

### **Evaluación de las condiciones actuales del sistema de concentración de ácido fosfórico de Tripoliven C.A.**

A partir del seguimiento a las líneas del proceso y las entrevistas al personal de la planta se logró verificar que todas las operaciones se realizaban según lo descrito por el manual técnico. Lo único que se ejecuta de manera distinta es el proceso de mantenimiento, que según el manual de operaciones se utiliza una solución diluida de ácido sulfúrico, mientras que en realidad se utiliza un sistema de agua a alta presión (hidrojet), ver figura 3, donde se pueden ver algunos tubos taponados. Los instrumentos de medición se encontraban en buen estado exceptuando los medidores de presión y es de notar la ausencia de medidores de flujo de recirculación y de condensados. Por lo que se recomendó la reparación de los instrumentos dañados y la instalación de los no existentes.



**Figura 3. Limpieza de tubos del intercambiador I-90 utilizando hidrojet**

Otro factor de importancia, observado, es el alto contenido de sólidos en el ácido producto del proceso, consecuencia de la alta cantidad de impurezas presentes en el ácido 28% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> alimentado al sistema (Becker, 1989). Esto representa un problema para el sistema ya que la presencia de dichos sólidos aumenta la viscosidad del ácido, disminuyendo de esta forma la transferencia de calor en el intercambiador y generando un producto fuera de especificación. En algunos casos se obtiene un ácido con un contenido de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> de 50%.

Finalmente, se identificaron las principales oportunidades de mejoras, las cuales se describen a continuación:

- El flujo de recirculación no es cuantificado, se considera una de las variables controlantes del sistema pues de ella depende el valor del flujo de vapor de red alimentado; al circular una mayor cantidad de ácido a través de los tubos del intercambiador, se necesitará una mayor cantidad de vapor para lograr el aumento de temperatura requerido. La disminución del reciclo de ácido en el tiempo se puede deber a la formación de incrustaciones en el eje de la bomba axial, por lo que es un indicativo del estado de ésta.
- El flujo de agua de enfriamiento alimentado al arreglo de condensadores no es medido ni regulado, lo que afecta la temperatura del condesado que sale del arreglo (Becker, 1989). Al no ser una variable controlada podría utilizarse en exceso, generando una mayor cantidad de efluentes líquidos producidos a raíz de las impurezas presentes en los gases extraídos del ácido fosfórico.
- La ausencia de un mecanismo para disminuir el contenido de sólidos presentes en el producto (ácido producido a partir de la roca Togo) afectaría la operación del sistema, así como también los procesos productivos dependientes de éste, debido a incrustaciones en las líneas, y equipos de tales procesos, lo que al mismo tiempo incrementaría los ciclos de parada de planta reduciendo la producción.

#### **Realización de balances de masa y energía en el sistema de concentración de ácido fosfórico**

El tamaño de la muestra, necesario para estimar la media de cada variable, se estimó usando la ecuación (Johnson, 1997)

$$N = \left[ \frac{z_{\alpha/2} \cdot C_V}{E} \right]^2 \quad (1)$$

Donde:

C<sub>V</sub>: Coeficiente de variación, %

E: Error con respecto a la media, %

z<sub>α/2</sub>: Valor de la curva de distribución normal

Los resultados obtenidos se presentan en la tabla N° 2, estos valores se consideran representativos de la población y de esta manera se evaluaron los balances con una gran precisión.

**Tabla N°2. Datos utilizados para determinar tamaño de la muestra**

Variable	Valor promedio	Cv (%)	N (adim)
F <sub>1</sub> (L / min)	32,27	25,62	101
T <sub>1,1</sub> (°C)	38,29	14,19	31
T <sub>1,2</sub> (°C)	38,28	12,24	23
m <sub>4</sub> (TM / h)	6,31	15,97	39
T <sub>5</sub> (°C)	177,76	5,87	5
P <sub>5</sub> (psia)	130,36	0,47	0
m <sub>5</sub> (t/h)	4,87	16,71	43
P <sub>6</sub> (psia)	18,26	10,45	17
T <sub>6</sub> (°C)	107,04	2,80	1
P <sub>2</sub> (mmHg <sub>abs</sub> )	95,94	21,06	68
T <sub>R</sub> (°C)	77,29	2,46	1
T <sub>R'</sub> (°C)	80,71	2,29	1
T <sub>13</sub> (°C)	35,14	3,36	2
T <sub>17</sub> (°C)	41,05	4,51	3

Como se puede notar, el valor más elevado es el obtenido para el flujo de alimentación de ácido al 28% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, con un tamaño de muestra de 101. Por tanto se utilizó un total de 112 datos para todas las variables ya que éstas se midieron al mismo tiempo, exceptuando las correspondientes a las temperaturas del ácido en los decantadores D-65 y D-66 (T<sub>1,1</sub> y T<sub>1,2</sub>), que se midieron un total de 34 veces. Luego de completar el tamaño de la muestra, se determinó la media aritmética y el intervalo de confianza de ésta. Los resultados obtenidos, se muestran en la tabla N° 3.

**Tabla N°3. Valores promedio e intervalo de confianza de la media**

Variable	$\bar{x}$	?	Intervalo de confianza
$F_1(L / min)$	33,42	10,40	<b>31,49-35,35</b>
$T_{1,1}(^{\circ}C)$	38,54	5,23	33,31 – 43,77
$T_{1,2}(^{\circ}C)$	38,51	4,53	33,98 – 43,04
$m_4(TM / h)$	6,61	1,07	6,41 – 6,81
$T_5(^{\circ}C)$	178,49	5,65	172,49 – 184,14
$P_5(psia)$	127,03	2,46	124,57 – 129,49
$m_5(t/h)$	4,67	0,59	4,08 – 5,26
$P_6(psia)$	17,09	2,24	14,85 – 19,33
$T_6(^{\circ}C)$	104,94	3,68	101,23 – 108,59
$P_2(mmHg_{abs})$	99,02	13,69	85,33 – 112,71
$T_R(^{\circ}C)$	76,74	2,21	76,33 – 77,15
$T_{R'}(^{\circ}C)$	80,02	2,12	79,63 – 80,41
$T_{13}(^{\circ}C)$	38,29	3,87	37,51 – 39,07
$T_{17}(^{\circ}C)$	44,08	4,21	43,36 – 44,80

$\sigma$ : Desviación estándar; : Valor promedio

Entonces se puede decir, que los valores promedios de las variables presentadas, se encuentran dentro del intervalo de confianza con un 95 % de seguridad y son imprecisos en un 5%. Esto brinda una mayor confiabilidad en el uso de dichos resultados en la evaluación de balances de masa y energía, pues es representativo de la muestra en estudio y brinda una aproximación aceptable a las condiciones generales de operación de la planta.

A partir del análisis termodinámico del proceso se obtuvo, entre otras, una expresión para estimar el flujo de ácido recirculado (variable controlante del sistema):

$$\dot{m}_R = \frac{\dot{m}_6 \cdot (h_6|_{P_6,T_6} - h_7|_{P_6,T_6}) - \dot{Q}_{amb}}{Cp_a|_{T_3,fm_1} (T_{R'} - T_R)}$$

( López, 2004)

Donde:

- $\dot{m}_R$  : Flujo másico de recirculación de ácido fosfórico, TM/h

- $\dot{m}_6$  : Flujo másico de vapor alimentado al calentador, TM/h

$T_R$ : Temperatura del ácido fosfórico que entra al calentador,  $^{\circ}C$

$T_{R'}$ : Temperatura del ácido fosfórico que sale del calentador,  $^{\circ}C$

$Cp_a|_{T_3,fm_1}$  : Capacidad calorífica del ácido fosfórico a las condiciones de operación, Cal/g. $^{\circ}C$

$\dot{Q}_{amb}$  : Pérdidas de calor al ambiente, kJ/h

$h_6|_{P_6,T_6}$  : Entalpía del vapor alimentado al calentador, kJ/kg

$h_7|_{P_6,T_6}$  : Flujo másico de agua en estado líquido que sale del calentador, Cla/g. $^{\circ}C$

También se obtuvo una expresión que permitió determinar el calor perdido al ambiente en el intercambiador:

$$\dot{Q}_{amb} = \dot{m}_6 \cdot (h_6|_{P_6,T_6} - h_7|_{P_6,T_6}) + \dot{m}_1 \cdot h_1|_{fm_1,T_1} - \dot{m}_3 \cdot h_3|_{fm_3,T_3} - \dot{m}_2 \cdot h_2|_{P_2,T_2}$$

(López, 2004)

Donde:

- $\dot{m}_1$  : Flujo másico de ácido fosfórico a 28% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, TM/h

- $\dot{m}_2$  : Flujo másico de agua evaporada, TM/h

$h_3|_{fm_3,T_3}$  : Entalpía de la corriente de ácido fosfórico concentrado, kJ/kg

- $\dot{m}_3$  : Flujo másico de ácido fosfórico a 52% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, TM/h

$h_2|_{P_2,T_2}$  : Entalpía de la corriente de agua evaporada, kJ/kg

$h_1|_{fm_1,T_1}$  : Entalpía de la corriente de alimentación de ácido fosfórico, Cal/g

Los resultados obtenidos en el balance a las condiciones de diseño, se compararon con los valores reportados por el fabricante con el objeto de contrastar los modelos aplicados, observándose que se adaptaban considerablemente a los utilizados por Suministros Barreiros. La variable que presentó una mayor desviación fue el flujo de agua de enfriamiento a los condensadores, según el fabricante ese flujo es de 390 TM/h mientras que el calculado es de 386,48 TM/h, lo que representa una desviación del 0,9 %. (López, 2004).

También se estimaron las pérdidas de energía en el calentador de ácido fosfórico, obteniéndose un valor de 21,30% de la energía alimentada en el vapor. Este resultado es bastante lógico, ya que la cantidad de vapor suministrado a las condiciones de diseño (8,22 TM/h) es mayor al mínimo requerido a esta condición; dicho valor no tenía un parámetro de referencia con los balances dados por la empresa. Otro resultado importante es que la planta trabaja por debajo de la capacidad de diseño, utilizando un 68,87% de ésta, por lo cual se infiere que se puede aumentar la capacidad de operación. Además, el flujo de agua de

enfriamiento requerido es mayor a las condiciones de operación, esto se determina a partir de la diferencia de temperatura a la que están trabajando los condensadores. A estas condiciones se debería tener un valor de 10 °C, mientras que a las de operación es de 5,79 °C; entonces se puede decir que esta sección de la planta está siendo sobreutilizada, factor que puede reducir el tiempo de vida útil de los equipos.

De la misma manera se realizó un análisis térmico al intercambiador de calor a las condiciones de operación. Se obtuvo que el vapor cede una energía de 10932,08 MJ/h; mientras que el ácido absorbe 10389,52 MJ/h. Entonces las pérdidas al ambiente son de 542,56 MJ/h equivalente a un 4,96 % de la energía suministrada por el vapor.

### **Condiciones de operación en el sistema de concentración de ácido fosfórico**

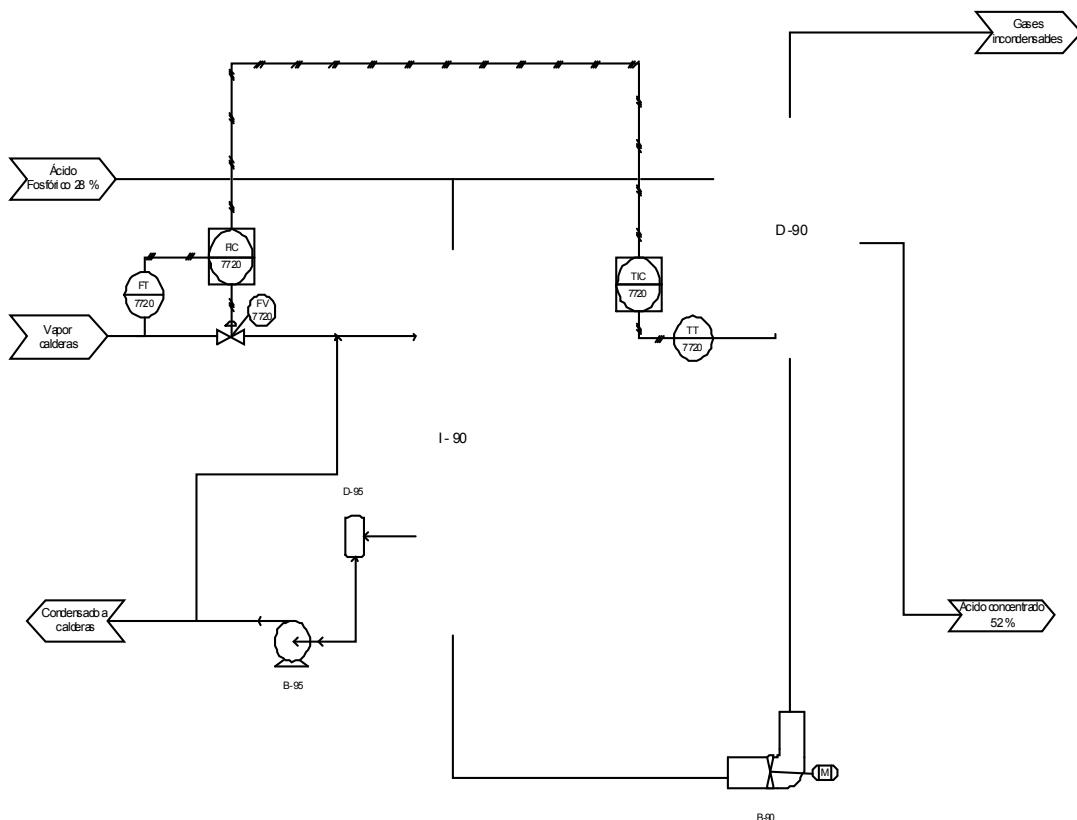
Inicialmente se determinaron las condiciones mínimas de operación a partir de los balances de masa y de energía, considerando que el sistema de concentración es adiabático, y se compararon con las condiciones de diseño y de operación obtenidas anteriormente para de esta forma determinar cuales eran las más apropiadas. Se seleccionó el flujo de vapor a las condiciones de operación, ya que se presentan pérdidas de energía relativamente bajas (se aprovecha

casi todo el vapor), pues las irreversibilidades del proceso hacen imposible cumplir la condición de adiabaticidad (mínima) y el diseño es utilizado para una mayor capacidad de producción. El flujo de recirculación seleccionado es para estas condiciones debido a su dependencia del vapor alimentado.

Por otra parte, se seleccionó la condición mínima para operar el evaporador (54,35 mmHg), porque este es valor mínimo de vacío para obtener un ácido de concentración 52% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, lo cual reducirá la probabilidad de obtener un ácido con una concentración fuera de especificación; de la misma forma la temperatura de salida del ácido concentrado está relacionada con este factor.

Finalmente, se plantea la utilización de una diferencia de temperatura condensado-agua de enfriamiento de 7,02 °C para no utilizar el equipo por encima de la condición de diseño (390 m<sup>3</sup>/h). También se podría utilizar el valor de 10 °C sin embargo se estaría trabajando con una mayor temperatura de salida del condensado.

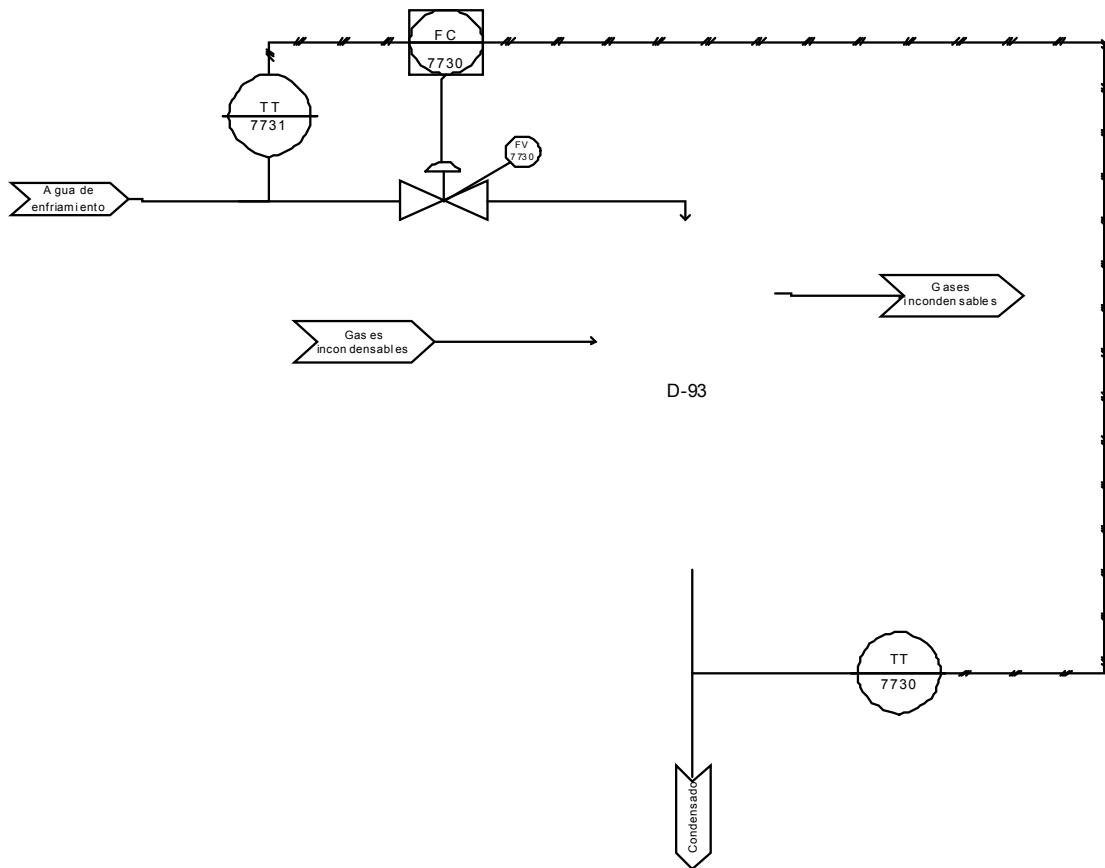
Además se proponen dos sistemas de control, uno diferente para el control de temperatura en el evaporador y otro adicional para el flujo de agua de enfriamiento a los condensadores, a fin de cumplir las proporciones anteriores con más eficacia.



**Figura 4. Control de temperatura del ácido concentrado en el evaporador**

En la figura 4 se muestra el lazo 20, para el control de temperatura en el evaporador, consta de un transmisor (TT7720) el cual envía la señal al controlador e indicador de temperatura (TIC7720); luego éste envía la señal al controlador indicador de flujo (FIC7720), que finalmente abrirá o cerrará la válvula de control de flujo (FV7720) si la temperatura está por encima o

por debajo del punto de ajuste. Este sistema de control es muy similar al utilizado actualmente; la única diferencia es que el controlador indicador de temperatura manda la señal al controlador indicador del flujo de alimentación de ácido al 28 % P2O5, que es un flujo muy pequeño por lo que no debe afectar considerablemente la temperatura en el evaporador.



**Figura 5. Control de flujo de agua de enfriamiento en los condensadores barométricos**

En el lazo de control 30, para regular el flujo de agua de enfriamiento a los condensadores, los transmisores de temperaturas TT7730 y TT7731 envían la señal de temperatura del condensado y del agua de enfriamiento respectivamente al controlador de flujo (FC7730), que abrirá o cerrará la válvula de control FV7730, en el caso de que la diferencia de temperatura esté por encima o por debajo del punto de ajuste. En la figura 5 se presenta una ilustración de dicho lazo de control.

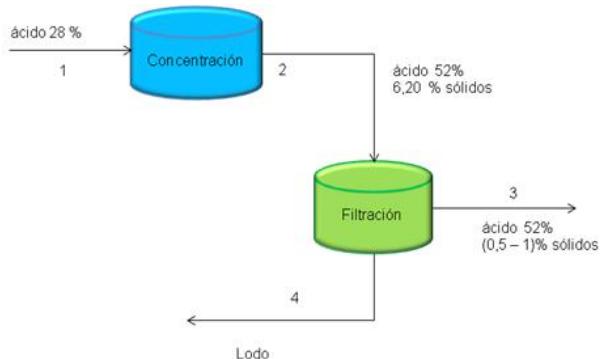
#### **Proposición de mejoras en el sistema de concentración de ácido fosfórico**

Las mejoras sugeridas están orientadas a minimizar la cantidad de sólidos presentes en el ácido fosfórico

concentrado producido, las alternativas a considerar son las siguientes:

Alternativa A: Proceso de filtración de sólidos del ácido fosfórico

Como su nombre lo indica, consiste en eliminar los sólidos en el ácido fosfórico concentrado utilizando el proceso de filtración. Para ello se colocará un filtro de bandas después de la etapa de concentración, que trabajará con un ácido concentrado a una temperatura en el rango (60 -70) °C, para obtener una mayor tasa de filtración (Wolstein, 1982). En la figura 6 se muestra un esquema de dicho proceso.



**Figura 6. Esquema de la alternativa de mejora A**

El lodo resultante de este proceso (4) se mezcla con agua y puede reutilizarse como agua de lavado en la etapa de filtración, debido a su contenido de fosfatos. También puede utilizarse en forma pura en la etapa de reacción. Para su implementación, además del filtro, se requieren dos bombas centrífugas, una destinada al despacho de ácido clarificado (3) y la otra a la reutilización de lodo en el proceso (como agua ácida).

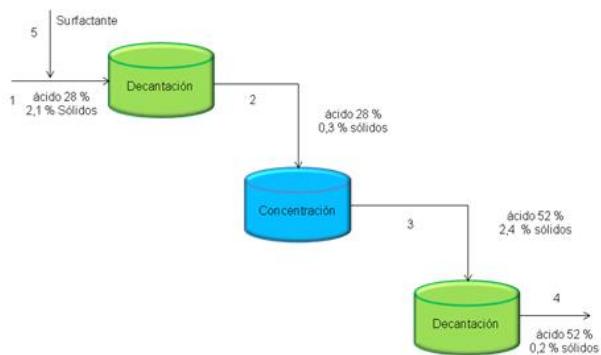
#### Alternativa B: Método de concentración de ácido fosfórico

El propósito general de esta patente (Kpilyleva, 1998) es mejorar el proceso de producción de ácido fosfórico y su clarificación. Consiste en llevar a cabo varias evaporaciones en presencia de una mezcla especial de tensoactivos aniónicos (surfactantes). Este proceso da lugar a un ácido de baja viscosidad, produce un cambio en la solubilidad de las impurezas, aumentando la eficiencia de la etapa de concentración. El esquema de esta mejora se presenta en la figura 7.

Según el proceso descrito en la figura 7, primero se agrega el surfactante (5) al ácido 28 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y un 2,1% de sólidos (1), luego se deja decantar durante 2 ó 3 h con el fin de obtener un contenido de sólidos cercano al 0,3%. Esta corriente (2) se alimenta al sistema de concentración, donde se obtiene un ácido con 52,3 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y 2,4% de sólidos (3). La tasa de evaporación es entre 30% y 80% mayor que cuando no se usa el surfactante. Luego se alimenta este ácido a un decantador, donde después de 2 ó 3 h se obtiene un ácido clarificado con un contenido de sólidos de 0,2% (4)

También se debe acotar que el procedimiento descrito con anterioridad se lleva a cabo con mayor velocidad en presencia de iones amonio, que pueden ser aportados por soluciones de amoníaco.

El surfactante se prepara con 6 g de ácidos monocarboxílicos alifáticos de cadena recta C<sub>6</sub> - C<sub>22</sub>;

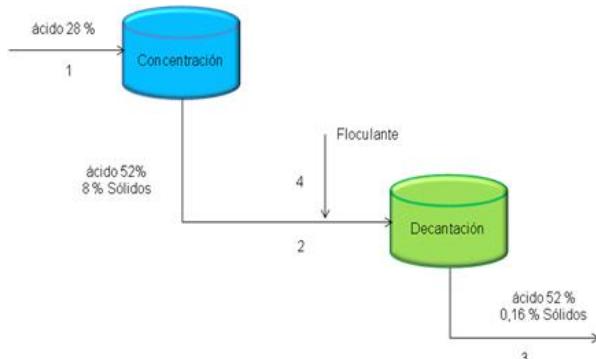


**Figura 7. Esquema de alternativa de mejora B**

1,5 g de ácidos monocarboxílicos cílicos C<sub>20</sub>; 0,8 g de alcoholes de alifáticos de cadena recta C<sub>14</sub> - C<sub>24</sub>; 1,7 g de alcoholes cílicos monohidratados con un peso molecular entre 300 y 450, mezclados para obtener sales de sodio. Esta mezcla se disuelve en agua y se obtiene una solución acuosa del tensoactivo multicomponente. Por último, se añade 1,8 g de una solución de sulfato de amonio al 20%. También se puede usar aceite de pino (subproducto de la fabricación de papel por el método Kraft) en presencia de una solución de amoníaco.

#### Alternativa C: Asentamiento de sólidos suspendidos en soluciones producto de ácido fosfórico.

Consiste en usar un floculante (copolímero) compuesto por 95% en mol de un monómero de acrilato de amonio y un 5% de un monómero de acrilamida, de peso molecular entre 9 y 15 millones, que remueve los sólidos con más eficacia que los floculantes que utilizan cantidades equivalentes de dichos componentes (Adrew C, 1981). El ácido obtenido del proceso de concentración, con un 54% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (2), se mezcla con una corriente de floculante (4) para luego pasar a la fase de decantación, donde se clarifica utilizando un tiempo de residencia de 30 min, obteniéndose un ácido con un porcentaje máximo de sólidos de 0,16%. Ver figura 8.



**Figura 8. Esquema de la alternativa de mejora C**

Luego se realizó una matriz de selección, para determinar la alternativa más apropiada (ver tabla N°4). Al comparar el resultado obtenido para cada una, se observó que la que cumple con la mayoría de los parámetros es la B, su implementación permitirá cumplir con los requerimientos del proceso y además puede incrementar la producción de ácido fosfórico.

**Tabla N°4. Matriz de selección empleada para escoger alternativa**

Parámetro	% Valoración (0-5)	Producto: %·x Valoración		
		A	B	C
		A	B	C
Costo	30	2	5	4
Mantenimiento	20	2	5	5
Operación Control	15	3	4	4
Eficiencia del proceso	20	3	5	5
Espacio físico	15	3	5	5
Total	100	250	485	455

Determinar la relación costo-beneficio de las mejoras propuestas en el sistema de concentración de ácido fosfórico

Se estimó aplicando el siguiente modelo matemático:

$$R_{BC} = \frac{B_{alt}}{C_{alt}}$$

(Giugni, Ettegui, González y Guerra, 1995)

Donde:

R<sub>BC</sub>: Relación costo beneficio para la alternativa de mejora, adim.

B: Beneficios económicos generados por la mejora, US\$

C: Costos requeridos para la implementación de la mejora, US\$

Para el desarrollo de este objetivo, se determinaron los precios de los insumos requeridos para la implementación de cada mejora. En el caso de la alternativa A se requirió el precio de los equipos principales, que se obtuvieron en la página web

matche.com; allí se encuentra disponible un programa iterativo que estima el costo de capital por el método de orden de magnitud, que calcula el valor de los equipos para el año 2007. Éste es un buen indicativo para la evaluación, ya que es una propuesta de proyecto. En caso de que la empresa requiera implementar esta opción se debe realizar un estudio más exhaustivo aplicando una evaluación económica, utilizando cotizaciones y precios más actualizados.

En conclusión todas las alternativas estudiadas son factibles económicamente, pues la relación costo-beneficio es mayor a la unidad (tal como se muestra en la tabla N°5). Por lo tanto los beneficios superan a la inversión. Los resultados obtenidos en esta sección y la anterior, son concordantes ya que se puede observar que la relación costo-beneficio más alta fue la de la alternativa B, entonces, se puede concluir que ésta es la más factible económicamente, y se recomienda su implementación durante el uso de roca fosfática Togo u otro tipo de materia prima, pues es muy útil en la obtención de ácido fosfórico destinado a la producción de fertilizantes.

**Tabla N°5. Relación costo-beneficio para cada propuesta**

	A	B	C
Costos (US\$/día)	820000*	3,76	24,79
Beneficios (US\$/día)	4950,00	42129,36	4950,00
Relación Costo - Beneficio	4,41	11174,90	199,68

\*: en US\$, Inversión inicial para un periodo dos años.

## REFERENCIAS

Becker, P. (1989). Phosphate and phosphoric acid: Raw Materials, Tecnology and economics of the wet-Process (2<sup>a</sup> ed). Francia.

González, N. (2004). Diseño de una planta piloto para producir ácido fosfórico. Trabajo de grado Universidad Experimental Politécnica. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química.

Giugni de A Luz, Corina Ettegui de B, Inés González de S y Venturina Guerra de T (1995). Evaluación de proyectos de inversión. Universidad de Carabobo.

Johnson, R. (1997). Estadística para ingenieros de Miller y Freund. (5<sup>a</sup> ed.). Prentice Hall.

Kopyleva, B. y Yiriy, S. (1997). Method of phosphoric acid concentration. [Documento en línea]. Consultado el día 30 de abril de 2009 desde: <http://www.freepatentsonline.com/5824132.pdf>.

López, D. (2009). Evaluación del sistema de concentración de ácido fosfórico, roca Togo, en Tripoliven C.A. Trabajo de grado Universidad de Carabobo. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química.

Poulos, A. y Thibodeau, M. (1981). Settling out suspended solids in phosphoric acid product solutions. Consultado el día 30 de Abril de 2009 desde <http://www.freepatentsonline.com/4291005.pdf>.

Wolstein, F., Hoffmann, E. y Epper, w. (1982). Process for the separation of solids from phosphoric acid. Consultado el día 30 de Abril de 2009 desde <http://www.freepatentsonline.com/4343780.pdf>.

Fecha de recepción: 11 de enero de 2011

Fecha de aceptación: 23 de marzo de 2011