



UNIVERSIDAD
TECNOLÓGICA
NACIONAL
FACULTAD
REGIONAL
DELTA

PROCESO PRODUCTIVO DE FOSFATO DIAMÓNICO

SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA

Antúñez Rosell, Candela
Guerra, Maya
Magalú, Iara Belén
Pelloli, María del Pilar



Índice

5.1 Tecnologías evaluadas	2
5.1.1 Producción de fosfatos mono y diamónicos cristalinos.....	2
5.1.2 Producción de fosfatos de amonio granulados	3
5.1.2.1 Proceso Tennessee Valley Authority – TVA	3
5.1.2.2 Proceso Dorr-Oliver.....	5
5.2 Aspectos relevantes sobre el ácido fosfórico empleado	6
5.2.1 Producción de ácido fosfórico vía proceso húmedo.....	6
5.2.2 Producción de ácido fosfórico por método de horno eléctrico (vía seca).....	6
5.3 Comparación de Tecnologías – Producción Fosfato Diamónico	8
5.4 Evaluación de las tecnologías desarrolladas.....	8
Referencias	10

Selección de la Tecnología

5.1 Tecnologías evaluadas

5.1.1 Producción de fosfatos mono y diamónicos cristalinos

La obtención de fosfatos mono y diamónicos cristalinos de elevada pureza se lleva a cabo por medio de la reacción que tiene lugar entre el ácido fosfórico de horno eléctrico con amoníaco anhidro¹. La formulación N-P-K del fosfato monoamónico es 12-61-0, mientras que el del fosfato diamónico es 21-53-0. En este proceso de producción, los cristales de fosfato de amonio se obtienen en un cristalizador de tipo convencional². Posteriormente, los cristales de tamaño adecuado [0,2 mm y 1 mm de diámetro aproximadamente – (Forestales, 2015)] se extraen, centrifugan, secan y tamizan, para su posterior embolsado y comercialización.

El agua se evapora completamente en el cristalizador, como consecuencia del calor de reacción. No obstante, se adiciona una cantidad de agua determinada durante el proceso para la elaboración que, al igual que la presión del vapor en la cámara de reacción, constituye el control principal para la eliminación de la humedad. Variables de operación tales como pH, temperatura y densidad del magma cristalino representan controles críticos del bloque de reacción, para así obtener cristales de tamaño apropiado y minimizar las pérdidas durante el proceso. El mayor inconveniente que presenta este proceso es la prevención de la nucleación³ excesiva, que se produce debido a la presencia de otras partículas dentro del cristalizador (nucleación en fase heterogénea). La cristalización puede tener dos tipos de nucleación: la primaria y la secundaria.

- **Nucleación primaria:** se refiere a los procesos de nucleación que ocurren en una solución previamente libre de cristales.
- **Nucleación secundaria:** es la generación de nuevos cristales por otros ya presentes en la suspensión.

(Principios de Ingeniería de Bioprocesos, 2013, Segunda Edición).

La nucleación excesiva hará que un equipo de cristalización continuo tenga un período extremadamente largo debido a que la etapa de nucleación llevará más tiempo. Por este motivo, el producto egresará del mismo antes de poder lograr el tamaño de cristal deseado. Debido a que el tamaño del cristal es una característica muy importante de calidad del producto, la nucleación excesiva es indeseable ya que provocará una disminución del tamaño medio del producto final (Fermentation and Biochemical Engineering Handbook, 2014, Tercera Edición).

Cuando el fosfato diamónico se produce mediante el proceso de cristalización al vacío, la relación molar amoníaco:ácido fosfórico del slurry en el cristalizador se mantiene entre 1,7 – 1,8 y el pH alrededor de 6,5. El contenido de sólidos del slurry en el cristalizador se mantiene entre 27% y 30%.

¹ El amoníaco anhidro se refiere al amoníaco puro, exento de agua, y que se presenta en estado líquido a temperatura ambiente.

² El cristalizador convencional consta de una tolva aislada con un agitador impulsado por un motor de engranaje y un calentador/soplador. El material amorfo se carga en la parte superior de la tolva y se calienta mientras se agita para evitar aglomeración.

³ La nucleación es la etapa de la cristalización en donde se produce la formación del cristal a partir de una fase líquida o amorfa. Se define como el nacimiento de cuerpos sólidos muy pequeños en el seno de una fase fluida homogénea o heterogénea.

Se utilizan centrífugas continuas del tipo “canasto perforado”⁴. Sólo la humedad superficial se elimina a través de un secador. Se opera a temperaturas moderadas de secado, que oscilan entre 79,4°C y 82,2°C para evitar pérdidas excesivas de amoníaco por su alta volatilidad. La humedad del producto final se encuentra entre 0,1% – 0,2%. Previo al almacenamiento es necesario enfriar el fertilizante con un flujo de aire a temperatura ambiente.

El fosfato monoamónico cristalino se produce de manera similar, manteniendo la relación molar amoníaco:ácido fosfórico entre 1 y 1,1, correspondiente a un pH de 4 a 4,5 del slurry.

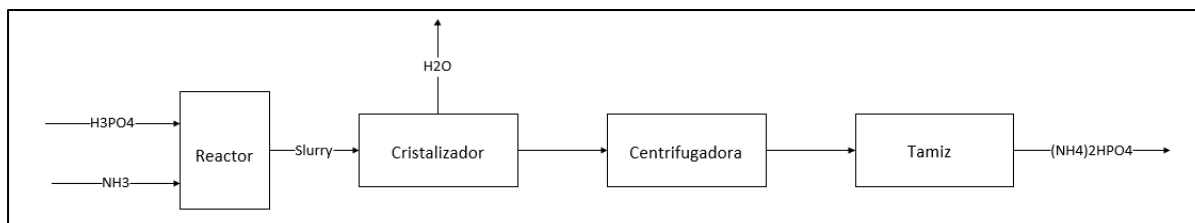


Imagen 1: Diagrama de bloques típico del proceso por cristalización.

5.1.2 Producción de fosfatos de amonio granulados

Los procesos de granulación fueron desarrollados para utilizar el ácido fosfórico de vía húmeda para la producción de fosfatos de amonio de uso fertilizante. Las impurezas (sulfato de amonio⁵ y MAP) permanecen en el producto final. Los agricultores prefieren los fertilizantes granulados frente a los líquidos debido a su facilidad de almacenamiento y transporte hacia el sitio de aplicación.

Para producir DAP granulado existen dos tecnologías: el proceso **TVA** y el proceso **Dorr – Oliver**.

5.1.2.1 Proceso Tennessee Valley Authority – TVA

El proceso TVA es el más antiguo, utilizado para producir fosfato diamónico granulado 18-46-0 (equivalente al 87,48% de pureza en DAP) fue desarrollado por Tennessee Corporation de Estados Unidos, y puesto en uso en su planta Bartow, Florida, en 1959.

Este proceso combina la amonización del ácido fosfórico de vía húmeda y la granulación en un tambor rotatorio. El exceso de amoníaco en este último pasa a un recuperador con ácido fosfórico que es alimentado al proceso. Una corriente de aire caliente se alimenta al tambor para conseguir un secado parcial y para disminuir los requerimientos de recirculación. El producto se seca, tamiza y enfría antes de almacenarlo.

Desde que se introdujeron los procesos de granulación de fosfatos de amonio en 1960, se han construido 30 plantas según el Proceso TVA, en Estados Unidos y otros lugares del mundo. **El rápido crecimiento en la producción de fosfatos de amonio de 200 a 300 toneladas por año en 1960 a más de 4 millones en 1967 es el resultado de varios factores: el proceso es simple y directo; los productos tienen buenas condiciones de almacenamiento, transporte y granulación.**

El proceso TVA, que utiliza un preneutralizador y un tambor rotatorio amonizador-granulador de diseño propio, **ofrece grandes ventajas en flexibilidad, facilidad de operación y eficiencia en el uso del calor**

⁴ *Centrifugas tipo canasta:* estas centrifugas se componen de una pared perforada y un rotor tubular cilíndrico. En la mayoría de los casos la pared externa consiste en una fina malla metálica o una serie de mallas soportadas por una pesada malla gruesa, la cual a su vez es soportada por un plato. El líquido pasa a través de la malla, y las partículas de mayor longitud se depositan en esta. Este tipo de centrifugas se emplean en la manufactura de caña de azúcar, en el secado de ropa en lavadoras caseras y en el lavado y secado de diferentes tipos de cristales y materiales fibrosos.

⁵ El sulfato de amonio resulta de la reacción entre las trazas de ácido sulfúrico, presentes en el ácido fosfórico, y el amoníaco.

de reacción. La solubilidad del fosfato de amonio y su alteración con la proporción molar amoníaco-ácido fosfórico, es la clave del proceso. El preneutralizador opera con una proporción molar de 1,4 que está cerca del punto de máxima solubilidad⁶ del fosfato de amonio; luego, en el amoniador -granulador se agrega amoníaco para elevar la proporción molar a alrededor de 2, este es el punto de menor solubilidad⁷. Al operar el preneutralizador al punto de máxima solubilidad se produce una suspensión fluida con bajo contenido de agua (entre 16 y 20%), que puede ser manipulada y distribuida en buenas condiciones dentro del amoniador-granulador. Al incrementar la relación molar a 2, se produce el punto de menor solubilidad dentro de éste, lo cual permite trabajar con tasas menores de recirculación y un fácil control de la granulación.

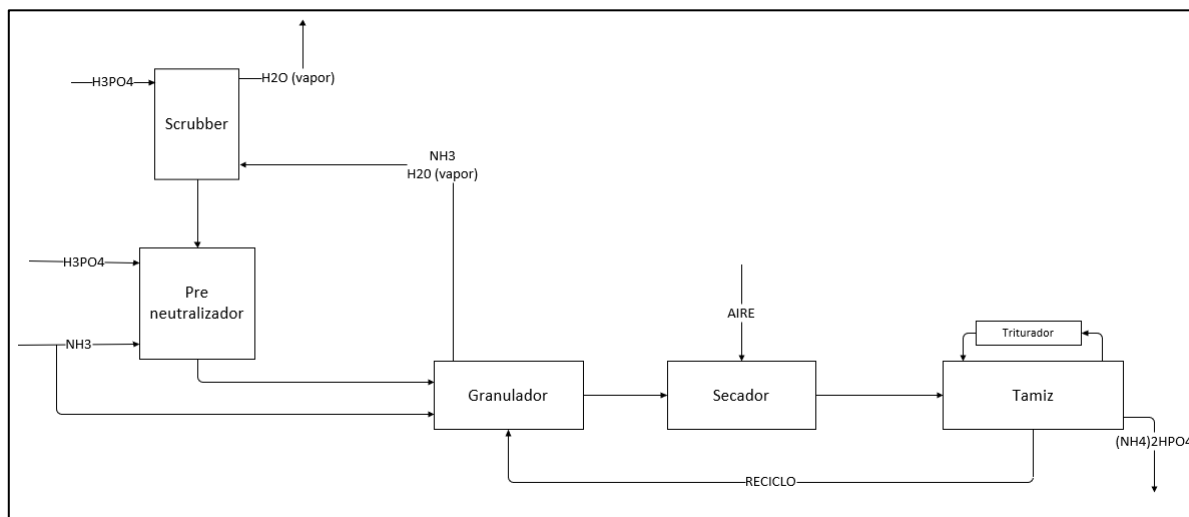


Imagen 2: Diagrama de bloques típico del proceso TVA.

En el Proceso TVA industrial para fosfato diamónico granulado, el ácido fosfórico con alrededor de 40% de anhídrido fosfórico primero se introduce en un tanque agitado (preneutralizador). Para el amoníaco desprendido del preneutralizador y del amoniador-granulador se cuenta con un scrubber con el cual se recupera alrededor de un 10 a 15% del amoníaco de exceso proveniente de estas unidades. El preneutralizador está ubicado a nivel del suelo, y el slurry se bombea a una tasa controlada dentro del tambor amoniador-granulador. La temperatura en el preneutralizador se controla alrededor de los 117°C (ya que las reacciones son altamente exotérmicas) y el pH entre 5,5 y 6, que están en el rango de mayor solubilidad del fosfato diamónico en la suspensión a una proporción molar cercana a 1,4.

El preneutralizador tiene un diámetro de 3,3 metros y una altura de 6,6 metros trabajando con un volumen de slurry de 3,3 a 4 metros.

La tasa de recirculación requerida es de alrededor de 5:1. Este ciclo está compuesto por finos, gruesos pulverizados y producto óptimo que garantiza una relación fase líquida/sólida idónea para el control de la granulación en el amoniador-granulador. El slurry se introduce dentro del tambor, y el amoníaco ingresa por una cañería perforada por la parte inferior del equipo. Luego, el material se descarga a un tambor rotatorio de secado donde se rebaja el contenido de humedad del producto a 1,5% con un rango de temperaturas de 48,8°C y 54,4°C.

Las pérdidas de amoníaco en el preneutralizador y en el granulador se mantienen al mínimo lavando los vapores con ácido fosfórico y devolviendo el ácido al neutralizador previo.

⁶ Explicado en el Capítulo 01 – Selección del Proyecto.

⁷ Explicado en el Capítulo 01 – Selección del Proyecto.

El material que egresa del secador se tamiza. El producto de tamaño adecuado (1 a 4 mm) se dirige a una tolva de producto terminado y luego a envasado, mientras que el material fuera de especificación se realimenta al amoniador-granulador sin enfriar (pues presenta ventajas para la granulación y permite el uso de un enfriador más pequeño ya que solo el producto especificado pasa por él).

El resto del equipo necesario para el proceso incluye recuperadores para el secador, cintas transportadoras, tamices y molinos y recuperadores de polvo en diversos puntos del sistema.

Para más información sobre el proceso TVA refiérase al **Anexo B.01 (TVAProcess 1962)** donde encontrará la patente del proceso.

5.1.2.2 Proceso Dorr-Oliver

Los primeros procesos de producción de fosfatos de amonio granulados utilizaban un sistema de amoniación del slurry, seguido por la granulación en un equipo que consiste en un agitador de paletas. En este tipo de procesos, la totalidad de la reacción entre el amoníaco y el ácido fosfórico tiene lugar en tanques de reacción. Por lo general, se disponen 3 de estos últimos en serie. En la operación habitual, la proporción molar amoníaco:ácido fosfórico es de alrededor de 1,8. El amoniaco en exceso resultante de la reacción en los tanques se recoge en un recuperador; el ácido de alimentación se emplea de manera similar al Proceso TVA, con la diferencia de que en lugar de ingresar a un preneutralizador ingresa en un sistema de reacción de dos etapas con 3 reactores tanques agitados como se explica más adelante. En el proceso de granulación, se emplea un mezclador de paletas, y se introduce una cantidad mínima de amoníaco adicional en él durante el proceso de granulado.

En el proceso **Dorr-Oliver**, se trata ácido fosfórico de pureza al 75%, que contiene de 30 a 54% de anhídrido fosfórico (P_2O_5) con amoniaco anhidro en un sistema de reacción de dos etapas con 3 tanques. En una operación típica, 75 a 80% del amoniaco se agrega al primer tanque. El contenido de agua del slurry es de 20 a 30%, y su relación molar amoniaco-ácido fosfórico una vez totalmente reaccionado no es mayor a 1,8.

La granulación se efectúa en un agitador de paletas del tipo de doble eje. El slurry se alimenta a éste junto con el material solido recirculado a una tasa de 8 ó 10 a 1. En la operación habitual, el slurry se reviste con el material de reciclo en sucesivas capas “tela de cebolla” para obtener gránulos bien redondeados, ya que puede producirse aglomeración si éstos son irregulares. El material descargado por el agitador de paletas se seca y se tamiza. El producto con tamaño de granulo adecuado se almacena con o sin refrigeración previa.

Un equipo recuperador de polvo para los gases de escape de los reactores y secadores permite controlar las pérdidas del proceso, reduciéndolas a un nivel no significativo. La recuperación del amoniaco en exceso del sistema de reacción del slurry, en un recuperador de los gases de escape con el ácido fosfórico alimentado al proceso, ha permitido la amoniación con una relación molar amoniaco-ácido fosfórico tan alta como 1,8. Las formulaciones N-P-K incluyen 16-48-0 y 18-46-0.

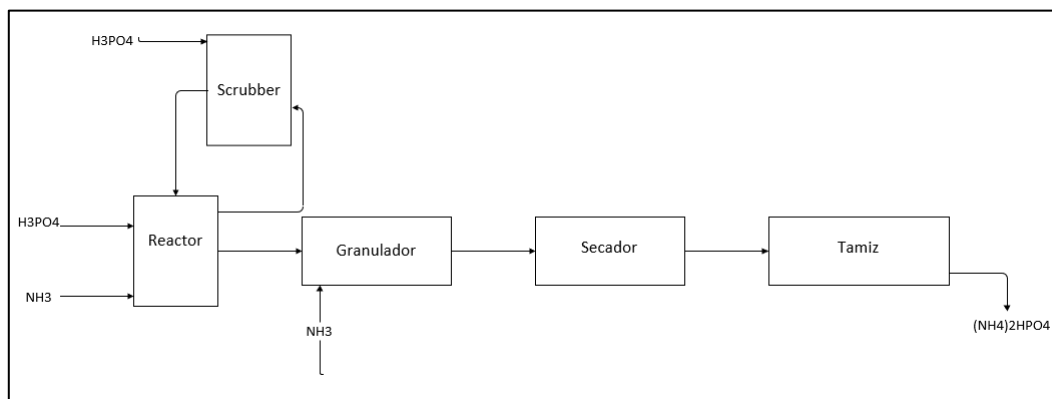


Imagen 3: Diagrama de bloques típico del proceso Dorr-Oliver.

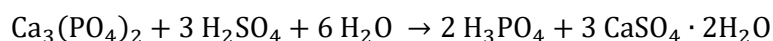
5.2 Aspectos relevantes sobre el ácido fosfórico empleado

En la sección 5.1 se han detallado las tecnologías evaluadas para la producción de fosfato diamónico, mencionando en ella dos variantes de ácido fosfórico: aquel que se obtiene del proceso de horno eléctrico y aquel que se produce a través del método de vía húmeda. En esta sección se describirán estos dos principales procesos de producción de ácido fosfórico. No obstante, este proceso productivo no formará parte del proceso seleccionado para este proyecto, sino que se presenta a modo informativo debido a que esta materia prima no se produce nacionalmente y a futuro podría resultar de interés incluirlo en el mismo.

Como se ha mencionado previamente, el ácido fosfórico se produce principalmente por dos métodos: el método de horno eléctrico (vía seca) y el proceso por vía húmeda. El ácido producido por el método de horno eléctrico posee una elevada pureza ya que se obtiene ácido fosfórico al 85%, con una concentración de aproximadamente 61,5% de P_2O_5 ; mientras que el ácido producido por vía húmeda posee una menor pureza, obteniéndose un ácido fosfórico al 75%, con una concentración aproximada de 54% de P_2O_5 .

5.2.1 Producción de ácido fosfórico vía proceso húmedo

A través de este método el ácido fosfórico se obtiene por la acción del ácido sulfúrico sobre la roca fosfórica. Esta última, en primera instancia se pulveriza y, luego, se mezcla en uno o múltiples reactores de tanque agitado con ácido sulfúrico, donde tiene lugar la siguiente reacción:

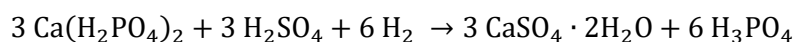


Las etapas de reacción son las siguientes:

1. Fosfato Monocálcico



2. Lodo de reacción



La solución resultante de ácido es separada del precipitado de yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (s)) por filtración. De esta manera se separa en forma sólida el yeso y el ácido fosfórico pasa disuelto en agua. El ácido filtrado diluido (con una concentración de 30-35% de P_2O_5) es evaporado hasta la concentración deseada (usualmente 54% de P_2O_5).

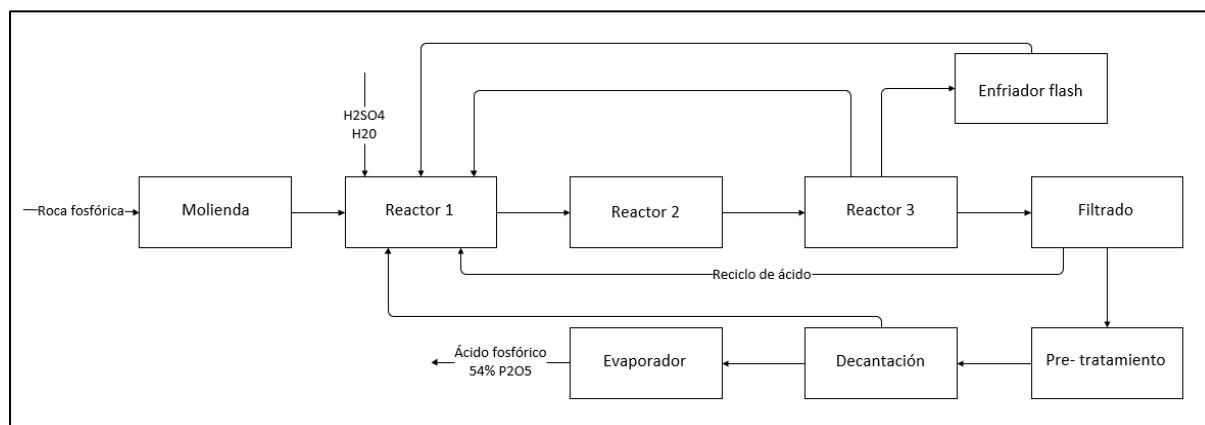


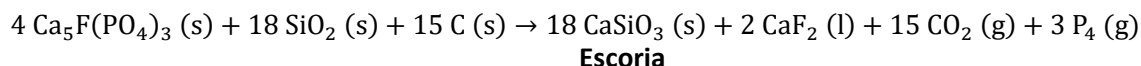
Imagen 4: Diagrama de bloques del proceso de producción de ácido fosfórico vía húmeda.

5.2.2 Producción de ácido fosfórico por método de horno eléctrico (vía seca)

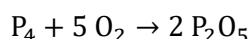
Este proceso produce ácido fosfórico a partir de fósforo elemental (P_4), que se produce a partir de roca fosfórica, coque (carbón - C) y arena silícea (sílice - SiO_2) en un horno de resistencia eléctrico.

Se efectúa la mezcla de las materias primas (roca fosfórica, carbón y sílice). La roca fosfórica se reduce a fósforo elemental por la acción de coque y calor en presencia de sílice. Posteriormente, se oxida con aire a pentóxido de fósforo (P_2O_5) y luego, por hidratación, se obtiene ácido fosfórico (H_3PO_4). Las reacciones que tienen lugar son:

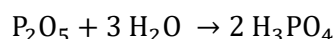
1. Obtención del Fósforo



2. Combustión del Fósforo



3. Hidratación del Pentóxido de Fósforo resultante



La sílice reacciona con la roca a temperaturas que superan los $1200^\circ C$ y se produce la liberación de pentóxido de fósforo. Este último, luego es reducido a fósforo elemental por medio del coque incandescente.

El fósforo se condensa y, posteriormente, ingresa a una cámara de combustión para oxidarse en presencia de oxígeno y transformarse en pentóxido de fósforo. Los gases de pentóxido de fósforo luego se dirigen a una torre empacada en la cual ingresa agua. Ambas corrientes reaccionan para formar ácido fosfórico al 85%. El ácido obtenido pasa a un proceso de purificación que consiste en la eliminación del arsénico (consecuencia de la combustión) por acción de sulfuro de hidrógeno (H_2S). Finalmente, cualquier material en suspensión (sílice, sulfato de calcio o trisulfuro de arsénico) se elimina a través de un filtro.

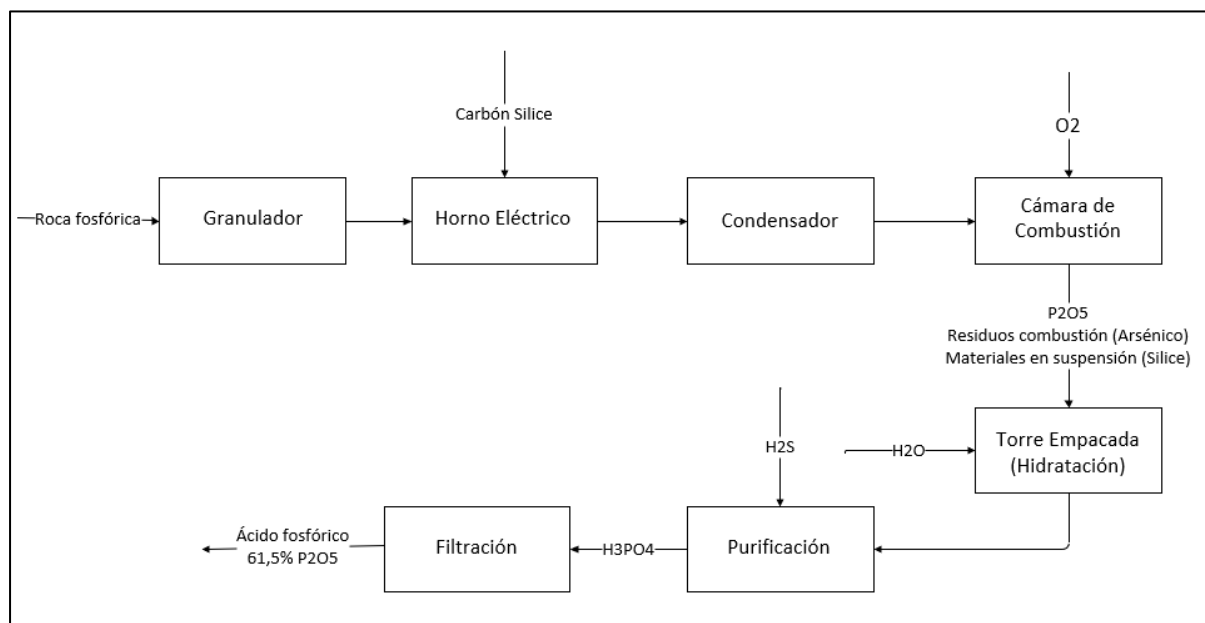


Imagen 5: Diagrama de bloques del proceso de producción de ácido fosfórico vía seca.

5.3 Comparación de Tecnologías – Producción Fosfato Diamónico

Estado Físico / Apariencia del producto	Fosfatos de amonio cristalinos	Fosfatos de amonio granulados	
Tipo de Tecnología	Proceso de cristalización de fosfatos de amonio	Proceso Dorr-Oliver	Proceso TVA (Tennessee Valley Authority)
Materias Primas	<ul style="list-style-type: none"> Ácido fosfórico de horno eléctrico Amoníaco 	<ul style="list-style-type: none"> Ácido fosfórico de vía húmeda Amoníaco 	<ul style="list-style-type: none"> Ácido fosfórico de vía húmeda Amoníaco
Pureza de Materias Primas	El ácido fosfórico de horno eléctrico es de elevada pureza (aprox. 85%) y el Amoníaco es puro, es decir, sin vestigios de agua	El ácido fosfórico de vía húmeda es de pureza media del 75% y el Amoníaco es puro	El ácido fosfórico de vía húmeda es de pureza media del 75% y el Amoníaco es puro
Operaciones Básicas del Proceso	<ul style="list-style-type: none"> Cristalizador Centrífuga Secador Tamices 	<ul style="list-style-type: none"> 3 reactores Tanques Agitados de doble eje en serie Mezclador de paletas Secadores Tamices 	<ul style="list-style-type: none"> Preneutralizador (Reactor Tanque Agitado) Amoniador-granulador (Tambor rotatorio) Tambor rotatorio de secado Tamices Enfriador
Reacciones Involucradas	$\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{NH}_3 \rightarrow (\text{NH}_4)\text{H}_2\text{PO}_4$ $\text{H}_3\text{PO}_4 + 2 \text{NH}_3 \rightarrow (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$		
Formulación del Producto	MAP: 12-61-0 (12% de Nitrógeno, 61% P ₂ O ₅ , 0% K ₂ O) DAP: 21-53-0	MAP: 12-61-0 DAP: <ul style="list-style-type: none"> 16-48-0 18-46-0 	MAP: 12-61-0 DAP: <ul style="list-style-type: none"> 16-48-0 18-46-0
Productos	MAP (Fosfato Monoamónico) y DAP (Fosfato Diamónico)		
Fase en la que se produce la reacción	Sólido – Líquido		
Temperatura	Temperatura de secado: 79,4 a 82,2°C	Temperatura del preneutralizador: 115°C	Temperatura del preneutralizador: 117°C
pH	Aproximadamente 6,5	5,5 – 6	5,5 – 6
Relación molar amoníaco – ácido fosfórico	1,7 – 1,8	Alrededor de 1,8	Preneutralizador: 1,4 (cerca mayor punto de solubilidad del NH ₃) Granulador: 2 (cerca menor punto de solubilidad del NH ₃)
Régimen del proceso	Continuo		

Tabla 1: Comparación de tecnologías para la producción de Fosfato Diamónico.

5.4 Evaluación de las tecnologías desarrolladas

En primera instancia, descartamos la utilización del *proceso de cristalización de fosfatos de amonio* como tecnología dado que existen variables de operación tales como pH, temperatura y densidad del magma cristalino que deben ser controladas minuciosamente para obtener cristales de tamaño especificado. Además, presenta grandes problemas para la prevención de la nucleación excesiva, que dificulta la producción de cristales lo suficientemente grandes para cumplir con la especificación deseada de producto.

En este tipo de proceso de producción del DAP, se requiere el uso de ácido fosfórico de horno eléctrico como materia prima, que es de elevada pureza (aprox. 85%), debido a que se ha observado que sistemas de cristalización que utilizan ácido fosfórico por vía húmeda encontraron graves problemas de cristalización causados por impurezas residuales (provenientes de la roca fosfórica, como yeso y derivados del azufre). En consecuencia, utilizar un ácido fosfórico con alto grado de pureza, implica un costo mayor.

En lo que respecta a los *procesos de producción de fosfatos de amonio granulados*, el Proceso TVA es más simple y directo que el Proceso Dorr-Oliver. Esto se debe a que, la primera tecnología utiliza un tanque agitado seguido por un granulador, mientras que la segunda tecnología consta de tres reactores tanque agitado en serie. Sin embargo, los productos obtenidos mediante ambas tecnologías poseen buenas condiciones de almacenamiento, transporte y granulación.

En cuanto al equipamiento, el Proceso TVA utiliza un preneutralizador y amoniador-granulador de diseño propio que ofrece grandes ventajas en flexibilidad, facilidad de operación y eficiencia en el uso del calor de reacción, puesto que se aprovecha el calor liberado por las reacciones para evaporar gran parte del agua que se desea eliminar para el producto final.

Por las razones mencionadas previamente, se selecciona como tecnología de producción para Fosfato Diamónico el Proceso TVA, que resulta ser el más conveniente en cuanto a simpleza y manejo de los productos involucrados en el proceso productivo.

En base a la tecnología TVA diseñamos un diagrama de flujo incorporando dos equipos que no fueron mencionados en la descripción original de dicha tecnología, con el objetivo de introducir mejoras en el proceso. Estos equipos son:

- *Separador*: se encuentra en la corriente de depuración de atmósferas húmedas de los equipos para justamente separar el contenido sólido que fue arrastrado por los vapores en el secador. Por la parte inferior del separador, se recupera una torta que contiene polvos de DAP, y se devuelve al granulador; mientras que por la parte superior del separador circulan los vapores para posteriormente ser tratados en el scrubber para su emisión final a la atmósfera. Colocamos un separador y no un filtrador puesto que estos últimos no eliminan compuestos volátiles.
- *Ciclón*: cuyo propósito es la separación de las partículas sólidas de DAP en suspensión en la corriente de aire, que se arrastran como consecuencia del secado del producto.

El empleo de un Scrubber y un Ciclón para purificar las corrientes que se emiten a la atmósfera es indispensable para alcanzar un nivel de calidad de aire deseado de tal forma que estas emisiones no afecten la flora, la fauna y la calidad de vida de la población en el entorno. Estas condiciones de emisiones son reguladas por el Ministerio de Medio Ambiente (ex OPDS) como autoridad de aplicación Autoridad de Aplicación de la Ley N°5965. El Material Particulado emitido PM_{10} no debe superar los $150 \mu g/m^3$ y $PM_{2.5}$ no debe superar los $75 \mu g/m^3$. Ambos en su primera etapa en tiempo promedio de 24 horas. A su vez, como límite, no se debe superar los $2430 \mu g/m^3$ en un tiempo promedio de 15 minutos y $1800 \mu g/m^3$ en un tiempo promedio de 8 horas para el caso del amoníaco y, si bien no se menciona para el ácido fosfórico, se especifica como límite máximo para el ácido sulfúrico $2 \mu g/m^3$ en un tiempo promedio de 8 horas. Toda esta información se detalla en el Anexo III del Decreto 1074 de la Provincia de Buenos Aires, Decreto Reglamentario de la Ley 5965 "Ley de protección a las fuentes de provisión y a los cursos y cuerpos receptores de agua y a la atmósfera".

Referencias

Fermentation and Biochemical Engineering Handbook. (2014, Tercera Edición). En S. M. Glasgow, *Capítulo 15, Cristalización* (pág. 310).

Forestales, D. d. (2015). *Fertilidad Química, Fertilización Mineral: N-P-K*. La Plata, Provincia de Buenos Aires:
https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/75204/mod_resource/content/1/UDD%20D8.1%20Fertilidad%20Qu%C3%ADmica%20.pdf.

Principios de Ingeniería de Bioprocesos. (2013, Segunda Edición). En P. M. Doran, *Capítulo 11, Operaciones Unitarias* (págs. 549-550).