

ANÁLISIS DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL ÁCIDO SULFÚRICO APLICANDO LOS PRINCIPIOS FUNDAMENTALES PARA EL DISEÑO DE PROCESOS INDUSTRIALES SOSTENIBLES

J. Loayza P¹., M. Silva M.², Y. Najarro V.³, E. Tafur E.⁴

RESUMEN

Los principios fundamentales para el diseño de un proceso industrial sostenible se pueden aplicar para el diseño de un nuevo proceso o para evaluar un proceso ya existente y hacerlo sostenible. Es necesario considerar para el diseño y la evaluación lo planteado por la Química Verde, la Ingeniería Verde, la Producción Más Limpia y la Ecología industrial. En el presente documento se toma como referencia la producción del ácido sulfúrico, un producto utilizado como materia prima o insumo para la fabricación de una gran variedad de productos, tales como, fertilizantes, colorantes, catalizadores, etc. Se analizan las materias primas utilizadas para su fabricación, resaltando los procesos a partir de azufre petroquímico y de gases de tostación.

Palabras clave: proceso industrial sostenible, química verde, ingeniería verde, producción más limpia, ecología industrial, ácido sulfúrico.

ANALYSIS OF PRODUCTION PROCESS OF SULFURIC ACID APPLYING THE FUNDAMENTAL PRINCIPLES TO DESIGN OF SUSTAINABLE INDUSTRIAL PROCESSES

ABSTRACT

The principles to design a sustainable industrial process can be applied to the design of a new process or to evaluate an existing process and make it sustainable. Need to be considered for the design and evaluation raised by the Green Chemistry, Green Engineering, Cleaner Production and Industrial Ecology. This document is referenced production of sulfuric acid, a product used as raw material or input for the manufacture of a wide variety of products, such as fertilizers, dyes, catalysts, etc. The raw materials used for manufacturing are analyzed, highlighting the processes from petrochemical sulfur and roasting gases.

Keywords: sustainable industrial process, green chemistry, green, engineering, cleaner production, industrial ecology, sulfuric acid.

-
- 1 Ingeniero Químico, Profesor Principal. Departamento Académico de Procesos. Facultad de Química e Ingeniería Química. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Correo electrónico: jloayzap@unmsm.edu.pe
 - 2 Ingeniera Química, Profesora Asociada. Departamento Académico de Química Inorgánica. Facultad de Química e Ingeniería Química. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
 - 3 Estudiante de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Química. Facultad de Química e Ingeniería Química. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
 - 4 Estudiante de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Química. Facultad de Química e Ingeniería Química. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

I. INTRODUCCIÓN

Los procesos industriales actualmente utilizados por las empresas, pueden ser revisados o analizados con la finalidad de hacerlos sostenibles, tomando en cuenta los fundamentos para su diseño desde la perspectiva de los procesos industriales sostenibles. Un proceso industrial sostenible es un proceso innovador, eficiente, limpio y seguro que contribuye al desarrollo sostenible. La eficiencia tecnológica de un proceso industrial determinado no basta para hacer competitiva a una empresa, sino que es necesario tener en cuenta aspectos organizativos y administrativos que hagan que dicha empresa permanezca en el mercado, entre estos aspectos se encuentran, por ejemplo, la gestión del conocimiento, la gestión de la innovación tecnológica, entre otras, pero que escapan al alcance del presente documento.

El diseño de un proceso industrial sostenible requiere necesariamente considerar los aspectos fundamentales del diseño de ingeniería, apoyándose además en los enfoques de disciplinas como la química verde, la ingeniería sostenible, el diseño integrado de la “cuna a la cuna”, la producción más limpia, la ecoeficiencia, la ecología industrial y cuando sea posible la biomimética[4].

La integración de estos componentes en el diseño de procesos industriales permitirá crear las condiciones para el desarrollo de productos, procesos y sistemas de producción, que imiten en lo posible a los sistemas naturales, y generen un estado de bienestar para la población, aprovechando racionalmente los recursos naturales y protegiendo los diversos componentes ambientales (aire, agua, suelo y biodiversidad). Un aspecto que es necesario resaltar es que los procesos industriales sostenibles diseñados bajo estos principios, garantizarán no sólo que se minimicen los residuos, que se

prevengan los accidentes industriales, que se conserven los recursos naturales, que se mejore la calidad de vida de comunidades humanas y los ecosistemas naturales, sino también que se prevengan los conflictos socio-ambientales^[9].

El diseño de procesos químicos industriales que sean considerados como procesos industriales sostenibles, requiere considerar aspectos que ya no se pueden soslayar, no sólo basta con la búsqueda de la eficiencia tecnológica, sino que también es necesario conseguir altos valores de eficacia en el uso de las materias primas, sobre todo si proceden de recursos naturales no renovables. Es conocido que nuestro planeta tiene recursos finitos frente al incremento sostenido de la población, por ello es necesario minimizar los impactos ambientales de la extracción y transformación de dichos recursos; así como de los efectos relevantes del consumo de muchos productos elaborados en los procesos industriales. La preocupación por los efectos sobre la salud y el medio ambiente tienen algunos hitos importantes como la publicación del libro *Silent Spring* (Carson, 1962), la fundación de la EPA (Environmental Protection Agency) en 1970, la iniciativa P2 (Pollution Prevention) en 1982, el Informe “Nuestro futuro común” de la Comisión Brundtland en 1987, la promoción de conductas responsables con el medio ambiente (CERES, 1989), la propuesta de McDonough y Braungart (1992) sobre el diseño de la “cuna a la cuna” (C2C), la biomimética aplicada al diseño de equipos (Benyus, 1997), la eliminación total de la palabra residuo (Hardi y Zdan, 1997), los doce principios de la Química Verde (Anastas y Warner, 1998) y los doce principios de la Ingeniería Sostenible (Allen y Shonard, 2002), entre otros, los cuales constituyen las bases para el diseño de procesos industriales sostenibles^[2]. Un proceso industrial sostenible es un proceso químico innovador que contribuye al Desarrollo Sostenible.

II. MARCO TEÓRICO

El soporte teórico del análisis lo constituyen los principios fundamentales para el diseño de un proceso industrial sostenible, los cuales se indican a continuación.

2.1. Química Verde

La Química Verde se refiere al “diseño de productos y procesos químicos que reducen o eliminan el uso y generación de sustancias peligrosas”^[1]. Esta práctica se inició en los Estados Unidos tras la promulgación de la Ley de Prevención de la Contaminación de 1990. La reducción de la contaminación en la fuente, según esta ley, “es fundamentalmente diferente y más deseable que la gestión de los residuos y el control de la contaminación”. En 1998, Paul T. Anastas y John C. Warner establecieron doce principios que conforman la metodología de la Química Verde (o Química Sostenible). Entre estos destacan la economía del átomo (la mayor parte de los reactantes forman la molécula del producto), el uso de catalizadores, la minimización de residuos, la sustitución de las sustancias peligrosas por otras menos peligrosas o inocuas, entre los principales.

2.2. Ingeniería Verde

La Ingeniería Verde se desarrolló como un complemento a lo planteado por la Química Verde, pero tiene un alcance más amplio, ya que incluye el “diseño, comercialización, y uso de procesos y productos, los cuales son técnica y económicamente viables, a la vez que minimizan la generación de contaminación y el riesgo para la salud y el medioambiente” (Allen y Shonnard, 2002). La Ingeniería Verde no es una nueva ingeniería, sino una visión renovada que pretende transformar las prácticas tradicionales de la ingeniería en otras nuevas que aumenten su contribución a la sustentabilidad de las empresas y al Desarrollo Sostenible. La Ingeniería Verde tiene 12 principios^[2] que fijan los lineamientos para el diseño sostenible en ingeniería de procesos. A

continuación estos se presentan con breves comentarios, con la finalidad de facilitar su comprensión y aplicación.

Principio 1.

Los diseñadores deben esforzarse por asegurar que todas las entradas y salidas de materia y energía sean tan inherentemente inocuas como sea posible.

Comentario: Las sustancias químicas utilizadas como materias primas, insumos y combustibles deben ser manejadas en forma responsable (segura) y deben seleccionarse de tal forma que tengan los más bajos niveles de peligrosidad, minimizando el riesgo asociadas a su manipulación.

Principio 2.

Es mejor prevenir la contaminación que tratar o limpiar el residuo ya producido.

Comentario: Los procesos industriales no sólo producen productos y subproductos, sino también residuos. Los residuos son el resultado de procesos ineficientes. La presencia de residuos requiere necesariamente algún tipo de tratamiento.

Principio 3.

Las operaciones de separación y purificación deben diseñarse para minimizar el consumo de energía y el uso de materiales.

Comentario: Los procesos industriales no son 100% eficientes, por lo tanto deben considerarse etapas de separación y purificación, las cuales consumen energía y requieren agentes para facilitar la purificación de los mismos, la ingeniería verde o sostenible plantea su minimización.

Principio 4.

Los productos, procesos y sistemas deberían diseñarse para la maximización de la eficiencia en el uso de materia prima, energía y espacio.

Comentario: Muy relacionado con el anterior, en este principio se introduce el

tema del espacio, el cual plantea el hecho de que la optimización de las operaciones de transferencia posibilitará el diseño de equipos más pequeños, lo cual hará posible utilización de una menor cantidad de espacio en las plantas industriales.

Principio 5.

Los productos, procesos y sistemas deberían estar orientados hacia la “producción bajo demanda” más que hacia el “agotamiento de la alimentación”.

Principio 6.

La entropía y la complejidad inherentes, deben ser consideradas como una inversión al elegir entre reutilizar, reciclar o rechazar materiales como residuos o desechos al final del proceso.

Principio 7.

Diseñar para la durabilidad, no para la inmortalidad.

Comentario: Existen materiales que cuentan con las mejores propiedades para cumplir eficientemente con determinadas funciones durante su vida útil, pero al final de la misma deben poder ser, de alguna forma, reaprovechados.

Principio 8.

Satisfacer la necesidad, minimizando el exceso.

Comentario: El ecodiseño de productos se alinea a este principio, por ejemplo los envases cada vez utilizan una menor cantidad de materiales, para una misma capacidad.

Principio 9.

Minimizar la diversidad de materiales.

Comentario: Diseñar un producto con muchos materiales diferentes dificulta su manejo post consumo.

Principio 10.

Cerrar los ciclos de materia y energía del proceso tanto como sea posible.

Comentario: Este principio toma referencia lo planteado por la Ecología Industrial, que busca diseñar procesos basados en las relaciones que se dan en los ecosistemas naturales, donde los residuos de unos procesos son la materia prima de otros.

Principio 11.

Diseñar para la reutilización de componentes tras el final de la vida útil del producto.

Comentario: La ingeniería verde parte del hecho que al final de la vida útil, el producto ya no cumple con la función para la cual fue diseñada, pero el material, si fuera el caso, no se pierde ya que mediante el reciclaje puede ser nuevamente utilizado.

Principio 12. Las entradas de materia y energía deberían ser renovables.

Comentario: Esta debería ser la tendencia, aunque es imposible dejar de utilizar recursos no renovables, pero lo fundamental sería potenciar la reciclabilidad de los mismos.

2.3. Producción más Limpia (PML)

La Producción más Limpia se basa en la aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva integrada a los procesos, productos y servicios, con la finalidad de aumentar la eficiencia global y reducir los riesgos, tanto para los seres humanos como el medio ambiente.

- En los procesos de producción, la PML, se preocupa por el ahorro de materias primas y energía, la eliminación de materiales peligrosos o la reducción de sus cantidades; así como en la peligrosidad de los residuos (emisiones, efluentes y residuos sólidos) y desechos (aquellos residuos no reaprovechables, cuyo destino son los rellenos de seguridad o la destrucción térmica vía incineración).
- En el desarrollo y diseño del producto, la PML aborda la reducción de impactos negativos a lo largo del ciclo de vida del producto: desde la extracción de la materia prima hasta la disposición final.

- En los servicios, la PML incorpora consideraciones ambientales en el diseño, distribución y entrega de los servicios.

En un principio, la disminución de la contaminación en las actividades productivas, se realizaba solo al final del proceso con tecnologías denominadas de final del tubo, pero actualmente, las empresas y sus procesos industriales, deben adoptar enfoques preventivos en sus actividades^[7].

2.4. Ecología Industrial

La Ecología Industrial es un nuevo enfoque del diseño industrial de procesos, que toma como referencia lo que ocurre en la naturaleza; es decir, intenta asimilar el funcionamiento de los procesos industriales al de los ecosistemas naturales, creando una interrelación entre las instalaciones industriales y el medio ambiente, buscando cerrar el ciclo de la materia, lo que implica el uso de subproductos y residuos de una industria como materia prima de otras, lo que permite obtener un nivel cero de residuos y hacer eficientes los procesos internos, esto se conoce en la práctica como “encadenamiento productivo”^[6].

La ecología industrial es una propuesta cuya base teórica se desprende de la economía ecológica, sus principios teóricos provienen de distintas áreas del conocimiento que van desde la ecología, pasando por la ingeniería, y llegando hasta la economía.

Desde la ecología, se percibe cierta analogía entre el funcionamiento del sistema industrial y la interacción de los organismos al desarrollar su ciclo de vida, teniendo en cuenta el grado de intercambio y retroalimentación, por ejemplo, se puede considerar una analogía entre el mercado con el medio ambiente, la empresa con un organismo, la competencia como la selección natural, etc., de manera que, mediante el uso de principios similares a los sistemas naturales, los sistemas industriales

pueden ser mejorados para reducir su impacto sobre el medio ambiente.

Desde la ingeniería, las analogías entre el sistema productivo y el sistema vital, se enfocan en el balance de materia y energía, se plantea el “metabolismo industrial”, se realiza un análisis sobre el flujo de entradas y salidas de materiales para reducir los residuos y las pérdidas durante el proceso productivo, haciendo uso de la tecnología industrial para obtener un producto que pueda ser asimilado por el ambiente (“ecoproducto”).

Desde la economía, se trasladan las analogías entre el sistema productivo y el sistema biológico al lenguaje del mundo de los negocios. Se plantea la existencia del “mercado ambiental”, el cual incluye la oferta de tecnología limpia, venta de servicios en asesoría para proyectos de integración entre empresas con el fin de minimizar el impacto ecológico de la actividad humana y mantener la viabilidad económica de la industria

III. ANÁLISIS DE LOS DIVERSOS COMPONENTES DE UN PROCESO INDUSTRIAL, TOMANDO COMO REFERENCIA LOS FUNDAMENTOS PARA EL DISEÑO DE PROCESOS INDUSTRIALES SOSTENIBLES

Es necesario analizar un proceso industrial con la finalidad de identificar los fundamentos de los procesos industriales sostenibles utilizados para su diseño. Para ello se debe tener en cuenta la trayectoria tecnológica de un proceso en particular, es decir la incorporación de innovaciones a través del tiempo. En esta oportunidad, se ha seleccionado como proceso de referencia la producción del ácido sulfúrico, un producto con innumerables aplicaciones, considerado en el pasado como indicador del crecimiento económico de un país, y cuyo proceso de obtención industrial ha sufrido innovaciones importantes, con la finalidad de obtener mayores rendimientos y generar menores residuos, en este caso reducir las emisiones

de SO_2 y SO_3 que van ambiente (atmósfera)^[3]^[5]. Es importante anotar que esta metodología se puede utilizar para el análisis y la síntesis de cualquier proceso industrial con la finalidad de evaluar si es ambientalmente sostenible. Para ello es necesario plantearse inicialmente la pregunta: ¿Qué principios fundamentales deben aplicarse para el diseño de un proceso industrial, de tal forma que contribuya al Desarrollo Sostenible? Se destaca que los recursos pueden ser no renovables, renovables o residuos de otros procesos, propugnando el encadenamiento productivo entre procesos industriales. El objetivo del análisis consiste en demostrar que si un proceso químico industrial es innovador, eficiente, limpio, seguro y utiliza racionalmente la materia prima y energía, se puede considerar como proceso industrial sostenible, el cual garantizará la competitividad de la empresa y su permanencia en el mercado.

La metodología a utilizar requiere de las siguientes etapas que son muy sencillas de implementar:

- E1) Identificación de la bibliografía básica tanto para conocer los fundamentos del diseño de procesos industriales sostenibles como para la producción, es este caso, del ácido sulfúrico.
- E2) Revisión de los principios fundamentales para el diseño de procesos industriales sostenibles.
- E3) Estudio del proceso para la producción de ácido sulfúrico, pero puede ser de cualquier producto.
- E4) Análisis de la trayectoria tecnológica para la producción de ácido sulfúrico, identificando las tecnologías de producción, a través del tiempo.
- E5) Determinación de las características del proceso tomando como referencia los fundamentos identificados.

A continuación se indican los resultados de la aplicación del método:

3.1. Aspectos generales sobre el ácido sulfúrico

En el Cuadro 1 se muestra un resumen sobre las características del producto, los usos o

Cuadro N.º 1. Características, usos y métodos de producción

CARACTERISTICAS	USOS	METODOS
<ul style="list-style-type: none"> ✓ A temperaturas ambiente es un líquido incoloro e inodoro. ✓ Es corrosivo, ataca a casi todos los metales. ✓ Extremadamente irritante, y tóxico. ✓ Reacciona violentamente con el agua, generando calor. ✓ Es el compuesto químico que más se produce en el mundo. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Producción de fertilizantes. ✓ En procesos metalúrgicos: blanqueado de metales preciosos. ✓ En la refinación del petróleo. ✓ En la industria metal-mecánica. ✓ En la fabricación de sulfato de aluminio, utilizado para la depuración de aguas. ✓ En la potabilización del agua como sulfato de aluminio. ✓ En la fabricación del dodecibencensulfonato de sodio, para la formulación de detergentes. ✓ En la fabricación de agentes para la obtención de pulpa de celulosa al sulfato. ✓ En las baterías eléctricas plomo-ácido. 	<p>Método de de las cámaras de plomo:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Es más antiguo. ✓ Actualmente está en desuso. ✓ Catálisis homogénea por NO_2 ✓ Produce ácido 65-78%. <p>Método de contacto:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Es el utilizado actualmente. ✓ Produce ácido 98-99%. ✓ Utiliza V_2O_5 como catalizador.

Elaboración: E. Tafur E., 2013.

aplicaciones, así como de los métodos de producción.

Como resultado de cruzar diferentes referencias históricas se puede construir la trayectoria tecnológica, según lo mostrado en el Cuadro N.º 2.

encadenamiento productivo entre plantas industriales, para ello esta “materia prima” o insumo químico, fundamental en la manufactura de productos de alto valor agregado, se puede obtener a partir de

Cuadro N.º 2. Trayectoria tecnológica del proceso de producción del ácido sulfúrico

AÑO	ASPECTO	COMENTARIO
Antes del Siglo X	El origen del primer ácido sulfúrico se desconoce, pero se le preparaba, quemando azufre con salitre.	Existen algunas referencias que citan a alquimistas islámicos como Jabir Ibn Hayyan, conocido en Europa como Geber y sus discípulo Al Razi, quienes describieron como obtenerlo.
Siglo XV	Basilio Valentinus lo obtuvo destilando sulfato ferroso ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) con arena.	
Siglo XVII	El químico alemán-holandés Johann Glauber consiguió ácido sulfúrico quemando azufre con KNO_3 , en presencia de vapor.	A medida que el nitrato de potasio se descomponía, el azufre se oxidaba a SO_3 , que combinado con agua producía el ácido sulfúrico.
Siglo XVIII	El químico francés Jean Antoine Chaptal (1756-1832), establece la primera fábrica comercial en Montpellier, Francia.	
1746	John Roebuck de Birmingham, Inglaterra, introdujo el proceso de cámaras de plomo.	El ácido obtenido de esta forma, tenía una concentración entre 35-40%. Mejoras posteriores, llevadas a cabo por el francés Joseph-Louis Gay-Lussac y el británico John Glover consiguieron aumentar esta concentración hasta el 78%.
1831	El proceso de contacto fue descrito por primera vez por Peregrine Phillips, un inglés cuya patente incluía las características esenciales del proceso de contacto moderno. El proceso se basaba en el paso de una mezcla de SO_2 y aire sobre un catalizador de platino (Pt), seguido por la absorción del SO_3 en ácido sulfúrico de 98.5 a 99 %.	El invento de Phillips, no constituyó un éxito comercial durante más de cuarenta años, probablemente porque faltaba demanda para un ácido fuerte, no existía un conocimiento adecuado de las reacciones catalíticas y el progreso de la tecnología química era todavía muy lento.
1889	Se demostró que un exceso de oxígeno en la mezcla gaseosa para el proceso de contacto era ventajoso.	
1913	Se le otorgó a la empresa alemana BASF una patente para el uso del V_2O_5 como catalizador en el proceso de contacto.	Este catalizador era menos activo que el catalizador de platino, pero más resistente a las impurezas.
1960	La empresa alemana Bayer patentó el proceso de doble absorción	Debido a consideraciones ambientales se introdujo en el proceso una etapa adicional de absorción con la finalidad de minimizar la cantidad de SO_2 y SO_3 enviados a la atmósfera, esta modificación es la que se utiliza actualmente.

Recopilación y elaboración: J. Loayza P., 2013.

3.2. Principios de la PML

Los principios de la PML se pueden aplicar no sólo al diseño de nuevos procesos, sino a la mejora de los procesos existentes, a esto se le denomina hacer más sostenible un proceso industrial. En el Cuadro N.º 3, se muestran algunas opciones que se han identificado para la producción del ácido sulfúrico (H_2SO_4).

3.3. Según la Ecología Industrial

Es posible aplicar los principios de la ecología industrial a la producción de ácido sulfúrico, siempre y cuando se logre un

diversos residuos industriales que contengan azufre y de esta forma se les puede reaprovechar, previniendo la contaminación ambiental debido a la presencia de SO_2 , SO_3 o H_2SO_4 en el aire^[5].

Con lo planteado se pueden obtener beneficios económicos y ambientales al aplicar este nuevo enfoque, pues al ahorro de recursos se suma la minimización de residuos, con ello la disminución de cargas contaminantes, añadiéndose a ello la mejora de la imagen ambiental de las empresas (organizaciones); así como la relación y la colaboración del sector industrial con el componente social y ambiental.

Cuadro N.º 3. Opciones de producción más limpia en la producción de ácido sulfúrico^{[3][8]}

ASPECTO	RECOMENDACIONES	BENEFICIO
CAMBIOS TECNOLOGICOS	Uso de la tecnología de carbón catalítico "centauro"	La tecnología Centauro se puede usar para alcanzar ahorro de costos en las nuevas plantas y se puede usar para reducir las emisiones en las plantas más antiguas. Antes: 300 ppm de SO ₂ Después: <100 ppm de SO ₂
	Reemplazo del V ₂ O ₅ por catalizadores Cesio-Promobed	Trabaja a bajas temperaturas y altas conversiones de SO ₂ , haciendo más extensible su aplicación.
	Uso del sistema Monarch (sistema de recuperación de calor y proceso catalítico húmedo).	<ul style="list-style-type: none"> • Máximo aprovechamiento de calor, en la generación de vapor. • Producción de vapor de baja presión en vapor de alta presión.
ENTRADA DE LOS MATERIALES	Uso de azufre con menor cantidad de cenizas (azufre "petroquímico"). Precalentamiento del aire.	<ul style="list-style-type: none"> • Se evita el envenenamiento del catalizador. • Brinda una entrada adicional de calor para la producción de vapor.
BUENAS PRACTICAS OPERATIVAS	Manejo de las siguientes variables y operaciones: <ul style="list-style-type: none"> ✓ Control de la temperatura. ✓ Control de la concentración. ✓ Limpieza y secado del gas. ✓ Reducción de las paradas de la planta. 	<ul style="list-style-type: none"> • Al tener un monitoreo constante se logra la máxima conversión de SO₂. • Si la duración de la parada fue larga es preciso precalentar el catalizador con un equipo auxiliar

Elaboración: Tafur Emilio, 2013.

3.4. Análisis de las fuentes de materia prima para la producción industrial del ácido sulfúrico (H₂SO₄)

La materia prima para la fabricación de ácido sulfúrico debe contener azufre capaz de producir SO₂ (anhídrido sulfuroso)[8], desde la perspectiva de los procesos industriales sostenibles sería más conveniente producir ácido sulfúrico utilizando azufre como materia prima, pero se tienen dos opciones: partir de azufre nativo (recurso no renovable) o a partir de azufre petroquímico (recurso no renovable reciclado), conviene la segunda opción ya que se aprovechan los residuos de la desulfuración de los combustibles, principalmente del petróleo y el gas natural.

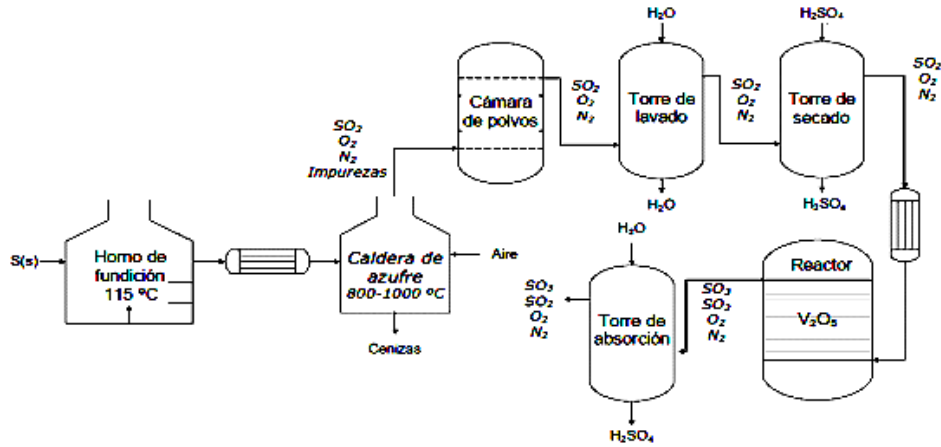
También se puede obtener el ácido sulfúrico a partir de los gases calientes de la tostación de sulfuros metálicos (por ejemplo, calcopiritas, piritas, galena, etc.); en estos casos se aprovecha también el calor de estos gases que luego deben ser depurados, antes de ser oxidados catalíticamente para producir SO₃, y garantizar la operación eficiente del catalizador de contacto^[8].

3.5. El encadenamiento productivo en la producción de ácido sulfúrico.

El encadenamiento productivo busca aproximar el comportamiento de un ecosistema industrial al funcionamiento de un ecosistema natural, por ello es necesario visualizar este concepto mediante su representación en la Figura 2 para el caso de la producción industrial del ácido sulfúrico.

3.5.1. A partir de la desulfuración del petróleo:

Del residuo procedente de la desulfuración del petróleo, se puede obtener azufre petroquímico, que es suministrado de forma sólida a la planta, constituyéndose así en la única materia prima de este proceso. Primero se funde, luego se filtra y se almacena de forma líquida. El proceso productivo consiste en la combustión del azufre líquido (atomizado en pequeñas gotitas) para la generación de SO₂, que luego pasa a un convertidor multilechos (actualmente se utilizan cuatro o cinco lechos de contacto sobre un catalizador de pentóxido de vanadio V₂O₅) donde el SO₂ es transformado en SO₃, que



Fuente: Odriozola Magela, Apuntes de clase. Introducción a la Ingeniería Química. Universidad de la República. Uruguay. 2008. http://www.fing.edu.uy/iq/cursos/iaiq/materiales/Produccion_acido_sulfurico.pdf

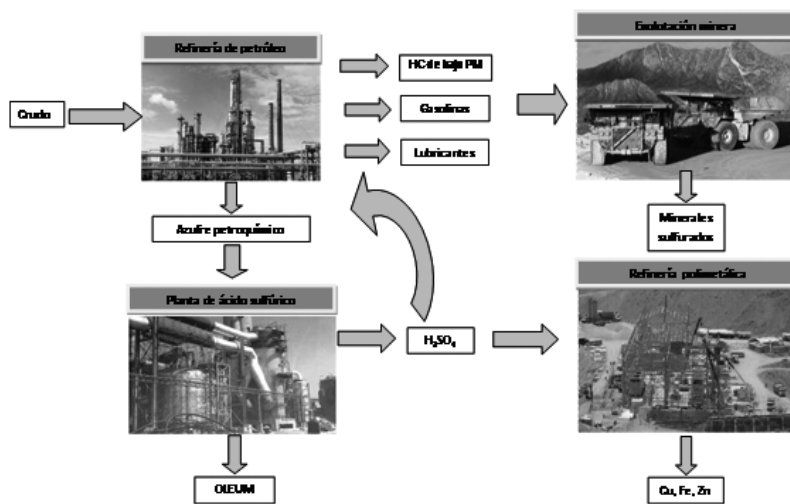
Figura N.º 1. Método de contacto para la producción de ácido sulfúrico^[14]

luego de una doble absorción de este gas, se obtiene ácido sulfúrico concentrado y óleum (dependiendo de la cantidad de SO₃ absorbida)[15][16].

Es importante resaltar que, es posible aprovechar el calor generado en el proceso (como resultado de reacciones exotérmicas, tanto en la combustión del azufre como en la oxidación del SO₂ a SO₃), tanto para la fusión del azufre como para la producción de energía eléctrica (que se utiliza para

autoconsumo, en la misma planta, y para exportarlo a la red pública)^[18].

Notas: La oxidación catalítica es una reacción reversible, con una elevada conversión de equilibrio. La absorción se realiza utilizando H₂SO₄ concentrado, para evitar la formación de niebla dentro de la torre de absorción, que utiliza un “demister” –destructor de niebla– (para favorecer el crecimiento de las pequeñas gotitas de ácido que se puedan haber formado).



Elaboración: Y. Najarro, 2013.

Figura N.º 2. Encadenamiento productivo como aspecto fundamental de la ecología industrial aplicado a la producción de ácido sulfúrico^{[11][12]}

3.5.2. A partir del tratamiento de gases residuales generados en la tostación de piritas

A pesar de ser el H_2SO_4 un producto químico fundamental en la manufactura de productos de alto valor agregado, su precio es relativamente bajo por lo que se deberían buscar fuentes de materias primas disponibles con facilidad en grandes cantidades y de costo reducido^[17]. En este sentido una materia prima atractiva es el dióxido de azufre (SO_2), residuo gaseoso producido en el procesamiento de piritas, ya que además de atender una problemática ambiental se obtiene una sustancia química apreciada en el mercado,

cual los residuos deben alimentar otros procesos y la biomimética aplicada al diseño de equipos (disciplina que no se ha usado directamente en el diseño de equipos para la producción de ácido sulfúrico, pero que se puede aproximar en el reactor multilechos utilizado en la oxidación catalítica del SO_2 a SO_3).

- 4.3. Los principios fundamentales indicados se deben aplicar al diseño de nuevos procesos, los denominados procesos industriales sostenibles, o pueden ser utilizados para hacer más sostenible un proceso industrial existente, por ejemplo la producción del ácido sulfúrico.

Tabla N.º 1. Calor generado en el proceso industrial sostenible^[13]

ETAPA	REACCIÓN	CALOR (-ΔH) kJ/kg H_2SO_4
1) Combustión del azufre	$S + O_2 \rightarrow SO_2$	3 026
2) Conversión (Oxidación catalítica)	$SO_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow SO_3$	1 004
3) Absorción	$SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$	1 390
4) Dilución del ácido y secado del aire	$H_2SO_4(c) + H_2O \rightarrow H_2SO_4(ac)$	251
Total		5 671

por ello se ha considerado al ácido sulfúrico obtenido a partir de residuos como un "producto ecológico".

IV. CONCLUSIONES

- 4.1. Los principios fundamentales del diseño de procesos industriales sostenibles aplicados a la producción del ácido sulfúrico son la Química Verde (por sus aportes relacionados con la economía atómica, el uso de catalizadores y la minimización de residuos), la Ingeniería Verde, la Producción más Limpia y la Ecología Industrial.
- 4.2. Los principios fundamentales pueden recibir el aporte de otras propuestas, tales como el diseño de la cuna a la cuna (que no se aplica al caso del ácido sulfúrico debido a que es un insumo para otros procesos), el nuevo paradigma de cero residuos (mediante el encadenamiento productivo, según el

- 4.4. Los procesos industriales sostenibles también pueden ser aplicados para el reaprovechamiento de residuos con la finalidad de prevenir la contaminación ambiental. En el caso del SO_2 , producto de la tostación de sulfuros, si este no fuera aprovechado, la contaminación del aire se vería incrementada por la emisión de estos gases.
- 4.5. Los procesos industriales sostenibles son innovadores porque una etapa del proceso puede sufrir cambios radicales, por ejemplo, en el caso del ácido sulfúrico, el abastecimiento de un tipo de materia prima, tal como azufre nativo, que generaba un ácido sulfúrico más limpio, está siendo sustituido por azufre petroquímico a partir de residuos generados en la desulfuración del petróleo u otros combustibles fósiles.
- 4.5. La innovación también se da en forma incremental, el hecho de que los procesos de producción de ácido sulfúrico utilicen

actualmente la doble absorción en lugar de una absorción simple, ha hecho más sostenible un proceso tradicional.

V. RECOMENDACIONES

- 5.1. En el presente documento se ha tomado como un caso de estudio la producción de ácido sulfúrico, pero estos principios fundamentales pueden ser aplicados a cualquier proceso industrial.
- 5.2. El objetivo de contribuir al desarrollo sostenible podrá ser más evidente, si es que el recurso a utilizar es renovable, se sugiere aplicar este análisis para la producción de pasta de celulosa a partir de recursos forestales o a la producción de aceite comestible a partir de semillas oleaginosas.

VI. BIBLIOGRAFÍA

6.1. Libros

- [1] Colonna Paul, La Química Verde, Editorial Acribia S.A. Zaragoza.2010.
- [2] García, J., Pérez, L., Cocero, M. (2007), Nuevas bases para el diseño de procesos industriales sostenibles. Ingeniería Química. XXXIX (444), 106-113.
- [3] Hopp Vollrath. Fundamentos de Tecnología Química para formación profesional. Editorial Reverté. Barcelona. 2005.
- [4] Mueller Tom. Biomimética. El futuro de la ingeniería. *Revista National Geographic en Español*. Abril.2008.Vol 22. Núm. 4. Páginas 50-73.
- [5] Sierra Miguel Á., Gómez Gallego Mar. Principios de Química Medioambiental. Biblioteca de Química. Editorial Síntesis. Madrid. 2008.
- [6] Spiro Thomas G., Stigliani William M., Química Medioambiental. Segunda Edición. Pearson Educación S.A. Madrid, 2004.
- [7] Van Hoof Bart, Monroy Néstor, Saer Alex. *Producción más limpia. Paradigma de Gestión Ambiental*. Universidad de los Andes. Facultad de Administración. Primera Edición. Editorial Alfaomega Grupo Editor S.A. de C.V. México. 2008.
- [8] Vian Ortuño Ángel. Introducción a la Química Industrial. Editorial Reverté. Segunda Edición. Barcelona. 2006.
- [9] World Bank, Development Research Group, Greening Industry: New Roles for Communities, Markets, and Governments. A World Bank Policy Research Report. Chapter Seven. Greening Industry: The New Model. Oxford University Press. New York. 2000.

6.2. Información consultada vía internet

- [11] Doe Run Peru. <http://www.doerun.com.pe> Fecha de consulta: 21-08-13
- [12] Grupo Abengoa, Soluciones tecnológicas innovadoras para el desarrollo sostenible http://www.abengoa.es/web/es/noticias_y_publicaciones/noticias/historico/2012/10_octubre/abg_20121017.html. Fecha de consulta: 23-06-13
- [13] Márquez Ronald. Apuntes de Química Industrial II. ULA. Venezuela. 2009. <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/marquezronald/wp-content/uploads/2009/08/Quimica-Industrial-II-Acido-Sulfurico.pdf>. Fecha de consulta: 20-12-13
- [14] Odriozola Magela, Apuntes de clase. Introducción a la Ingeniería Química. Universidad de la República. Uruguay. 2008. http://www.fing.edu.uy/iq/cursos/iaiq/materiales/Produccion_acido_sulfurico.pdf. Fecha de consulta: 23-10-13
- [15] Portal de sostenibilidad. Universidad de Catalunya.

http://portalsostenibilidad.upc.edu/detall_01.php?numapartat=8&id=140.
Fecha de consulta: 02-06-13

[16] Revista VIRTUALPRO N° 67. Producción de ácido sulfúrico (2007) (p. 11-12) <http://www.revistavirtualpro.com/revista/index.php?ed=2007-08-01&pag=1>. Fecha de consulta: 06-06-13

[17] Rosas S., Luna César, Sánchez O., Ortiz E. Producción de Ácido Sulfúrico por medio del tratamiento de gases residuales generados en la tostación de piritas. Información Tecnológica. Vol. 18 N°4-2007, p. 35-40.

http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642007000400006&script=sci_arttext.
Fecha de consulta: 31-08-13

[18] Serie Guías Técnicas de aplicación de BREF's en la Comunidad Autónoma del País Vasco. Fabricación de ácido sulfúrico. http://www.ingurumena.ejgv.euskadi.net/r49-3252/es/contenidos/informacion/ippc/es_6939/r01hRedirectCont/contenidos/manual/bref_sulfurico/es_bref/adjuntos/sulfurico.pdf. Fecha de consulta: 15-06-13