



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE QUÍMICA

DISEÑO Y AUTOMATIZACIÓN DE UNA PLANTA  
DE ÁCIDO SULFÚRICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**Ingeniera Química**

PRESENTA:

**Mara Itzel Bárcenas Alonso**

DIRECTOR DE TESIS:

M. en I. Carlos Álvarez Maciel



CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2019



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:**           **Profesor:** Juan Mario Morales Cabrera

**VOCAL:**                   **Profesor:** Carlos Álvarez Maciel

**SECRETARIO:**           **Profesor:** Ileana Rodríguez Castañeda

**1er. SUPLENTE:**       **Profesor:** José Manuel García Anaya

**2° SUPLENTE:**         **Profesor:** José Arturo Moreno Xochicale

## **SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

FACULTAD DE QUÍMICA, CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX.

FACULTAD DE INGENIERÍA, CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX.

## **ASESOR DEL TEMA:**

M. en I. Carlos Álvarez Maciel

## **SUPERVISOR TÉCNICO:**

Ing. Jeshua Perea Constantino

## **SUSTENTANTE:**

Mara Itzel Bárcenas Alonso

# Contenido

---

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación y Estado del Arte . . . . .	1
1.2. Planteamiento del problema . . . . .	1
1.3. Objetivo . . . . .	2
1.4. Metodología . . . . .	3
1.5. Contribuciones . . . . .	3
1.6. Estructura de la tesis . . . . .	4
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>5</b>
2.1. El ácido sulfúrico . . . . .	5
2.2. Ingeniería de Proyectos . . . . .	12
2.3. Fundamentos de Automatización . . . . .	16
<b>3. Diseño de la planta</b>	<b>22</b>
3.1. Especificaciones . . . . .	22
3.1.1. Horno (H-01) . . . . .	22
3.1.2. Intercambiador de calor uno (E-01) . . . . .	24
3.1.3. Reactor (R-01) . . . . .	25
3.1.4. Intercambiador de calor dos (E-02) . . . . .	25
3.1.5. Bomba uno (B-01) . . . . .	26
3.1.6. Torre de absorción (T-01) . . . . .	27
3.1.7. Intercambiador de calor tres (E-03) . . . . .	31
3.1.8. Compresor (C-01) . . . . .	32
3.1.9. Intercambiador de calor cuatro (E-04) . . . . .	33
3.1.10. Bomba dos (B-02) . . . . .	34

---

<b>4. Automatización</b>	<b>36</b>
4.1. Horno (H-01)	37
4.2. Intercambiador de calor uno (E-01)	39
4.3. Reactor (R-01)	40
4.4. Intercambiador de calor dos (E-02)	41
4.5. Bomba uno (B-01)	42
4.6. Torre de absorción (T-01)	43
4.7. Embotelladora (Emb)	44
<b>5. Resultados</b>	<b>46</b>
5.1. Resultados por equipo de proceso	46
5.1.1. Horno (H-01)	46
5.1.2. Intercambiador de calor uno (E-01)	48
5.1.3. Reactor (R-01)	49
5.1.4. Intercambiador de calor dos (E-02)	50
5.1.5. Bomba uno (B-01)	51
5.1.6. Torre de absorción (T-01)	52
5.2. Resultados de equipos de acondicionamiento	53
5.2.1. Intercambiador de calor tres (E-03)	53
5.2.2. Compresor (C-01)	54
5.2.3. Intercambiador de calor cuatro (E-04)	55
5.2.4. Bomba dos (B-02)	55
5.3. Resultados de la automatización	56
<b>6. Conclusiones</b>	<b>59</b>
<b>A. Anexo I. Ficha Internacional de Seguridad Química</b>	<b>61</b>
<b>B. Anexo II. NOM-039-SEMARNAT-1993</b>	<b>64</b>
<b>C. Anexo III. Hoja Técnica Básica del Controllogix</b>	<b>72</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>75</b>

# Introducción

---

*“Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber.”*

---

-Albert Einstein-

## 1.1. Motivación y Estado del Arte

Como bien se sabe durante la época industrial en México (1940 a 1970), donde se construyeron la mayor parte de las plantas industriales, terminó hace algunos años, en la cual la mayoría, si no es que todos los procesos contaban con una parte que se llevaba a cabo manualmente, lo que causaba inseguridad en los procesos para los trabajadores, los equipos involucrados y la calidad del producto. Conforme ha ido avanzando la tecnología se ha buscado automatizar lo más posible; esto principalmente para reducir costos de mano de obra, aumentar la producción y calidad del producto así como por seguridad tanto de los obreros como de los equipos involucrados. Por lo que la presente tesis busca proponer un diseño preliminar de una planta de ácido sulfúrico, incluyendo la automatización para facilitar la construcción y operación óptima de dicha planta.

## 1.2. Planteamiento del problema

A partir de datos del Anuario Estadístico versión 2018 [1] de la Industria Química Mexicana elaborado por la Asociación Nacional de la Industria Química, S.A. (ANIQ) se calculó que durante el año 2017 se importaron aproximadamente \$1'766,141.6 miles de pesos; se produjeron \$1'126,663.2 miles de pesos y se exportaron \$714,438.4 miles de pesos en ácido sulfúrico,

con lo cuál a partir de datos del International Trade Statistics (ITC) [2] nos colocamos en la décima posición de los países que más importaron, y la octava en cuestión de exportaciones, como se muestra en la Tabla[1.1]. Por lo que con esta tesis se pretende que al diseñar una planta automatizada sea más fácil y segura tanto la construcción como la operación de dicha planta, logrando así un incremento de la producción a nivel nacional, disminuyendo la cantidad de importación y por lo tanto aumentando el índice económico relacionado a la producción y consumo del ácido sulfúrico por país.

Posición	Exportaciones	Importaciones
	País	País
1	China	Estados Unidos
2	Alemania	República de Corea
3	Japón	Japón
4	Estados Unidos	China
5	Países Bajos	Alemania
6	Taipei China	Francia
7	Bélgica	Taipei China
8	México	Países Bajos
9	Reino Unido	Bélgica
10	República de Corea	México

**Tabla 1.1:** Posicionamiento de exportaciones e importaciones durante 2018

### 1.3. Objetivo

Los objetivos planteados para esta tesis son:

- Proponer el diseño de una planta de ácido sulfúrico, de acuerdo a las fases de Ingeniería de Proyectos: ingeniería conceptual e ingeniería básica.
- Elaborar el esquema general de automatización para la planta. Discerniendo cuáles son las áreas o procesos más adecuados para optimizar la producción, considerando la seguridad o detalle necesario en cada área de la planta.

## 1.4. Metodología

La metodología a seguir para cumplir con los objetivos antes mencionados de la presente tesis son los siguientes:

### 1. Diseño de la planta

En primera instancia se diseñará la parte correspondiente al proceso químico de la planta, es decir, todos los equipos involucrados en la fabricación del ácido sulfúrico. Desde que se recibe la materia prima, hasta que se embotella el ácido para su posterior venta.

### 2. Automatización

Una vez se tenga el diseño de los equipos involucrados en el proceso se evaluarán las distintas etapas para discernir cuáles son aquellas que se pueden automatizar. Posteriormente se diseñarán los esquemas de automatización de dichas etapas.

## 1.5. Contribuciones

Las contribuciones principales se enumeran a continuación:

1. Al obtener el diseño de los equipos de proceso necesarios para una planta productora de ácido sulfúrico, junto con el esquema generalizado de automatización se facilitará la construcción y operación de dicha planta.
2. Al estar en operación la planta, se producirá una mayor cantidad de ácido sulfúrico en el país, con un aproximado de 553'299,120 *L/año* que al tomar como precio 400 \$/L se generarán 22'131,964 miles de pesos, con lo cual se incrementará el índice económico correspondiente a la producción y consumo de dicho ácido por país, asimismo se podrá disminuir la cantidad de ácido importado.



## 1.6. Estructura de la tesis

El presente trabajo está organizado en seis capítulos, los cuales se describen a continuación. El capítulo dos presenta la teoría necesaria para desarrollar el diseño y automatización de la planta. En el capítulo tres se muestran las especificaciones del diseño de la planta usando como herramienta de cómputo el paquete de software Aspen Plus. Durante el capítulo cuatro se desarrolla el diseño de la automatización de las etapas que así lo requieran utilizando LogixPro como herramienta de apoyo. En el capítulo cinco se encuentran los resultados obtenidos, es decir la simulación final. Posteriormente en el capítulo seis se presentan las conclusiones de este trabajo. Y para finalizar en el apartado de anexos se presenta material de apoyo, como la ficha de seguridad del ácido, así como la normatividad vigente que aplica en la planta.

# Marco Teórico

---

*“La única razón para que el tiempo exista es para que no ocurra todo a la vez.”*

---

-Albert Einstein-

En el presente capítulo se presenta la teoría referente al ácido sulfúrico, describiendo las diferentes maneras en las que se ha producido a través de la historia. Asimismo, se abordan algunos conceptos de ingeniería de proyectos, los cuales se tomaron como base para llevar a cabo el presente trabajo y por último, se exponen los fundamentos de la automatización, haciendo hincapié en las características necesarias para discernir cuándo se puede automatizar todo o parte de un proceso.

## 2.1. El ácido sulfúrico

El ácido sulfúrico,  $H_2SO_4$  es un líquido denso y cristalino, es higroscópico por lo que muchas veces se usa como deshidratante, además de ser un poderoso agente oxidante. En el anexo I. se presenta la hoja de seguridad correspondiente, donde se especifica su peligrosidad así como sus medidas de contención. La producción y consumo del ácido por país, es considerado un indicador económico importante a nivel mundial, debido a que es el producto químico más utilizado en el mundo y se utiliza en casi todas las industrias, algunos de sus usos son los que se ven en la Figura[2.1] [3]. Una de las aplicaciones más cercanas a la vida cotidiana es el uso del ácido en las baterías de los automóviles, que contiene un aproximado de 2.3 litros por batería.

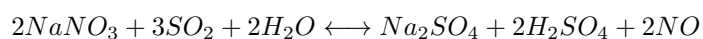


Figura 2.1: Usos del ácido sulfúrico

## Un poco de historia

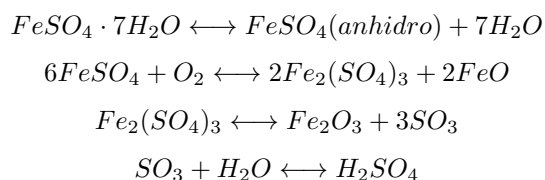
El proceso de manufactura del ácido sulfúrico es uno de los más antiguos, fue desarrollado por alquimistas persas en el siglo X [4], existían varias formas de obtenerlo, a continuación se mencionarán dos de ellas.

- Colocaban nitrato de sodio con dióxido de azufre y agua en un recipiente de vidrio, posteriormente lo quemaban para finalmente capturar los vapores generados de ácido sulfúrico y desechar el sulfato de sodio junto con el óxido de nitrógeno. La reacción balanceada estequiométricamente es la siguiente:



- Descomponiendo sulfatos a altas temperaturas y haciendo reaccionar el trióxido de azufre resultante con agua. Primero secaban el sulfato de hierro II heptahidratado, después lo hacían reaccionar con oxígeno para producir óxido de hierro y sulfato de hierro III, dicho sulfato se descomponía en óxido de hierro III y trióxido de azufre, el cual hacían reaccionar

con agua para finalmente obtener el ácido sulfúrico. Dicho proceso es conocido como proceso de *vitriolo*. Las reacciones balanceadas estequiométricamente son las siguientes:



En el siglo XVIII comienza la producción a escala industrial de ácido sulfúrico por el **método de las cámaras de plomo** [5], el cual consiste en introducir dióxido de azufre en estado gaseoso y caliente por la parte inferior de un reactor llamado “Torre de Glover”. Allí se lava con vitriolo nitroso, que es una mezcla de ácido sulfúrico con óxido y dióxido de nitrógeno en estado líquido y gaseoso. Una parte del dióxido de azufre pasa a ser trióxido de azufre por oxidación y es disuelto en el baño ácido para generar el ácido de Glover.

Dicho ácido se traslada a una cámara recubierta de plomo, donde se combina con agua. A través de una serie de reacciones el ácido se condensa en las paredes y se acumula en la parte inferior de la cámara. Por lo general hay varias cámaras en serie, por donde los gases van reaccionando paulatinamente. El ácido que se genera aquí se denomina ácido de cámara y concentra un 62% - 68% de ácido sulfúrico.

Por último, este ácido entra a un reactor llamado “Torre Gay-Lussac” donde es lavado con ácido frío concentrado. El óxido y dióxido de azufre que no haya reaccionado forma parte de el vitriolo nitroso que va a la torre de Glover y el resto de los gases se liberan a la atmósfera. Mediante este proceso se produce ácido con una concentración entre el 67% - 78%. Sin embargo en la actualidad ya casi no se utiliza, debido a la alta toxicidad del plomo para la salud y el medio ambiente, además de la baja concentración a la que se obtiene el ácido resultante. En la Figura[2.2] se puede observar el diagrama de bloques del método antes descrito.

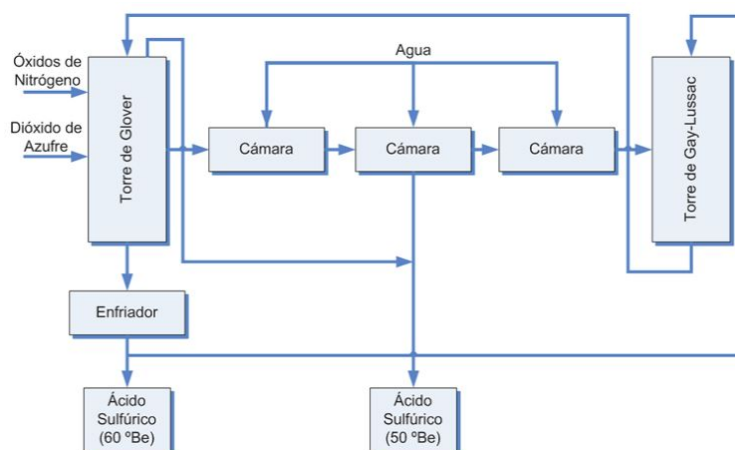
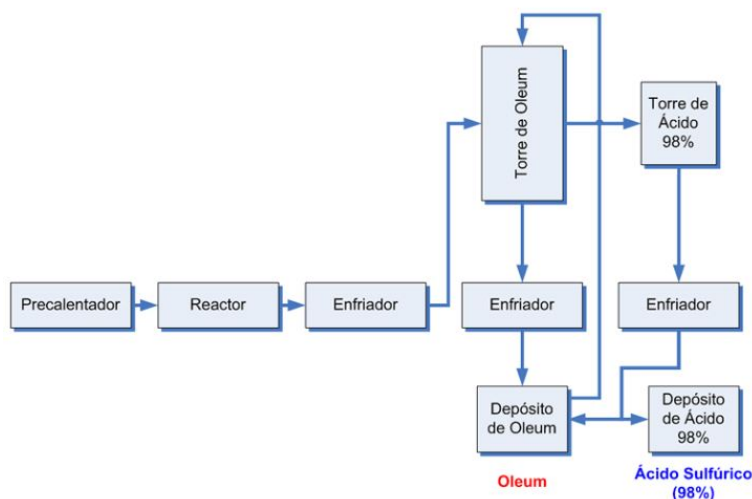


Figura 2.2: Diagrama de bloques del método de cámaras de plomo

El **método de contacto**, como se describe a detalle en [6], fue patentado (patente No.6096) en 1831 por Peregrine Philips[7], un productor de vinagre en el condado de Bristol, Inglaterra. En este proceso se realiza una mezcla de gases secos con un volumen aproximado entre 7% - 10% de dióxido de azufre y un 11% - 14% de oxígeno, que se precalienta y tras ser depurado pasa a un reactor de lecho catalítico que por lo general es de platino o pentóxido de vanadio, dando lugar a la formación del trióxido de azufre.

Los gases generados se enfrían a 100 °C, pasan a una “Torre de oleum”, nombrada así por la consistencia aceitosa con la que sale el ácido por el exceso de  $SO_3$ , donde se realiza una absorción parcial del trióxido de azufre en agua produciendo el ácido sulfúrico. El resto de los gases se lavan con dicho ácido producido en otra torre y los gases que no se hayan absorbido salen a la atmósfera. El ácido producido por este método suele tener una concentración entre 93% - 95%. En la Figura[2.3] se observa el diagrama de bloques del método antes descrito.



**Figura 2.3:** Diagrama de bloques del método de contacto

El **método de doble contacto**, especificado en [6], es similar al anterior descrito, con la diferencia de que a la salida de la torre de absorción, los gases que no han reaccionado, pasan a un enfriador y pasan a otra torre de absorción, donde terminan de reaccionar. Mediante este proceso se logra un ácido con una concentración entre 97 % - 99 %. Dicho proceso es el más utilizado en la actualidad, debido a que es el método que mejor aprovecha los reactivos haciendo que se logre la mayor conversión posible.

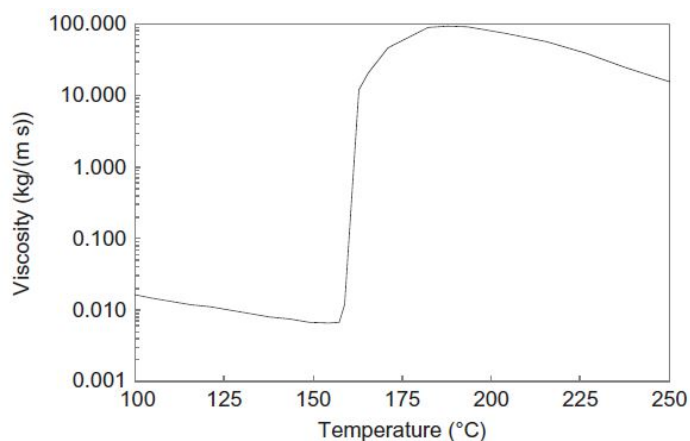
### Obtención de dióxido de azufre $SO_2$

Como se puede ver en lo anterior descrito, el dióxido de azufre es necesario como materia prima, por lo cual, a continuación se describirán los distintos métodos de obtención.

Aproximadamente el 60 % de las plantas de ácido sulfúrico producen el dióxido de azufre a partir de azufre elemental, mediante el proceso conocido como **quema de azufre** [6]. El azufre elemental es un subproducto de la refinación del petróleo y gas natural, se encuentra con una pureza aproximada del 99 % y, su impureza principal es carbón.

El punto de fusión del  $SO_2$  es entre 115-120 °C de acuerdo a su estructura cristalina, por lo que el proceso se lleva a cabo en condiciones iniciales con azufre a 140 °C, donde se encuentra cerca de su viscosidad mínima pero por debajo de los 160 °C donde presenta un incremento

abrupto, como se puede observar en la Figura[2.4]. Dicho dato es importante, debido a que al tener el azufre como un líquido con baja viscosidad, se facilita su fluir tal como se representa en el proceso descrito a continuación.



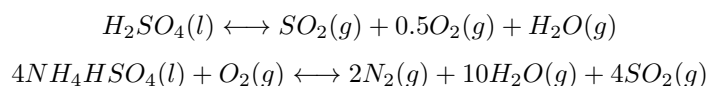
**Figura 2.4:** Viscosidad del azufre líquido en función de la temperatura

Dependiendo de la distancia que deba recorrer el azufre desde su producción hasta su quema, se transporta fundido en distancias cortas, o sólido en distancias largas. Al recibirse sólido, para su quema, primero se debe fundir y filtrar para eliminar las impurezas que se adquirieron durante el trayecto. Posteriormente, se atomiza y rocía en pequeñas gotas dentro del horno, ésto se puede hacer con una boquilla pulverizadora estacionaria al final de una lanza horizontal o con una taza giratoria en el atomizador de azufre. Después se introduce al horno aire limpio y seco a 120 °C, el producto resultante es un gas a 1150 °C con una composición aproximada en porcentaje volumen de: 12%  $SO_2$ , 9%  $O_2$  y 79%  $N_2$ .

Alrededor del 30% del ácido sulfúrico producido es a partir del dióxido de azufre de los gases de escape provenientes de la fundición y quema de azufre. Dichos gases contienen una concentración de dióxido de azufre de 20 - 75% volumen, el cual se puede utilizar para la producción del trióxido de azufre pasando por un proceso previo. En el cual primero se debe enfriar, por lo general se utiliza una caldera de recuperación de calor, la cual permite la producción de vapor con el calor adquirido.

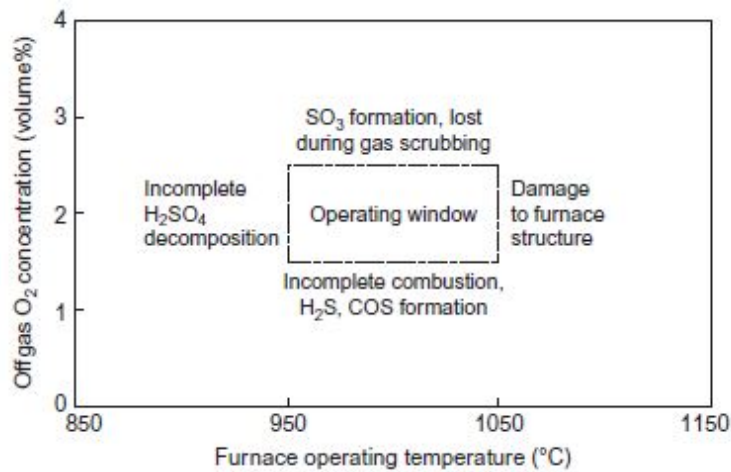
Después el gas enfriado a 350 °C, pasa a un precipitador electrostático para la remoción de impurezas, con el cual queda aproximadamente 0.5 [g] de polvo además de impurezas gaseosas por [ $nm^3$ ], por lo que se rocía con agua para disminuir a 0.01 [ $g/nm^3$ ] de polvo, además de condensar y absorber gases indeseados. Después, se debe enfriar a través de un intercambiador de calor de tubos y coraza, para finalmente pasar a un precipitador electrostático de niebla para su posterior deshidratación con ácido concentrado.

Otra forma de producir el dióxido de azufre necesario es reutilizando el ácido sulfúrico usado como catalizador para gasolina, combustible para jets y producción de polímeros, por lo general dicho ácido se encuentra contaminado por agua, hidrocarburos u otros químicos. El ácido sulfúrico primero se descompone rociándolo en gotas a un horno a 1000 °C, las reacciones de descomposición son:



Como se muestra en la Figura[2.5], al operar el horno a 950 °C o menos, se tendrá ácido sulfúrico sin descomponer, por lo cual no se obtiene la recuperación esperada de dióxido de azufre, además de que se corroe el horno. Mientras que al estar en 1050 °C o más, se empezaría a dañar la estructura del horno, por lo tanto es importante conservar la temperatura lo más cercana a los 1000 °C. Asimismo, es recomendable que el porcentaje en volumen del oxígeno se encuentre entre 1.5 - 2.5%, ésto para asegurar que no se forme ácido sulfhídrico o sulfuro de carbonilo, ya que contaminarían el ácido de la planta, lo cual puede generar corrosión en los equipos. Siempre que se opere el horno a las condiciones adecuadas, es decir dentro de la región factible, se tendrá a la salida una composición aproximada en porcentaje volumen de: 6 - 14%  $SO_2$ , 0.1 - 0.3%  $SO_3$ , 2 - 3%  $O_2$ , 50%  $N_2$ , 25 - 30%  $H_2O$ , 10%  $CO_2$  y 0.1 - 1  $g/Nm^3$  de partículas (como ceniza).





**Figura 2.5:** Región factible de operación del horno

Posteriormente, se enfría con el uso de una caldera, para después retirar las impurezas con un precipitador electrostático y rociándolo con agua, se le agrega aire para aumentar la concentración de oxígeno y finalmente se seca con ácido concentrado.

Una vez analizados los métodos de producción del ácido sulfúrico, debido a su eficacia y los costos implicados, la planta diseñada en la presente tesis utiliza el método de contacto simple, con la producción del dióxido de azufre a través de azufre elemental y se desarrolla el proyecto tomando como base algunos aspectos del PMBOK, descritos en la siguiente sección.

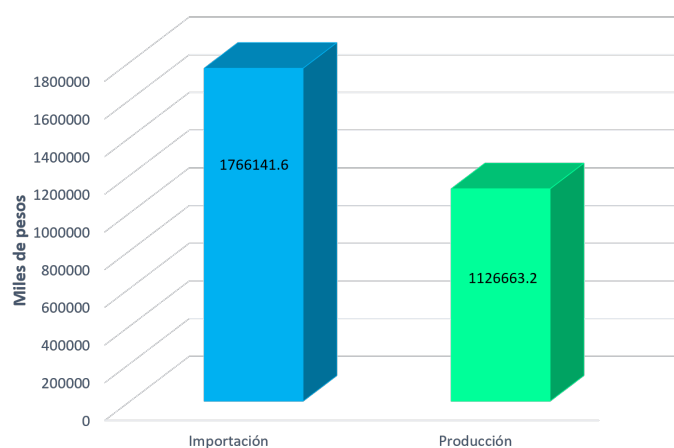
## 2.2. Ingeniería de Proyectos

El ser humano por naturaleza busca patrones para simplificar las cosas, por dicha razón en 1969 se funda el Project Management Institute (PMI), el cual crea la guía de PMBOK (Project Managment Book)[8], en un intento por documentar y estandarizar información y prácticas generalmente aceptadas en la gestión de proyectos, asimismo identifica la aplicación de conocimientos, procesos, habilidades, herramientas y técnicas para la dirección de proyectos generalmente reconocido como *buenas prácticas*.

Los proyectos se utilizan a menudo como medio para alcanzar directa o indirectamente los objetivos propuestos en el plan estratégico de una organización. Por lo general, los proyectos se autorizan como resultado de una o más de las siguientes consideraciones estratégicas:

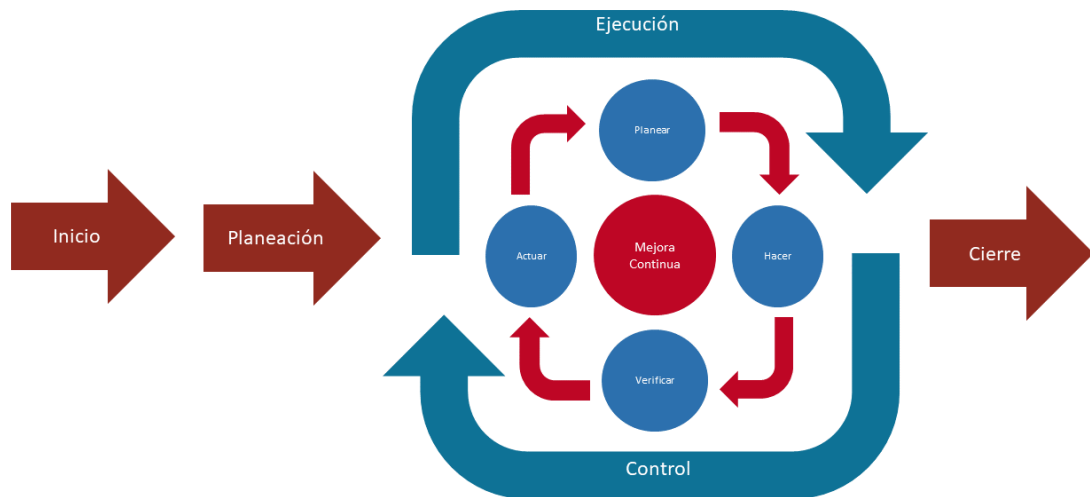
- Demanda del mercado.
- Oportunidad estratégica.
- Necesidad social.
- Consideraciones ambientales.
- Solicitud de cliente.
- Avance tecnológico.
- Requisito legal.

Para el caso de la planta de ácido sulfúrico se cumple: la **demanda del mercado**, debido a que como se muestra en la Figura[2.6], se importó una mayor cantidad de ácido de la que se produjo en 2017; **oportunidad estratégica**, dado que es el producto químico más utilizado a nivel mundial y por **avance tecnológico**, debido a la automatización que se propone para aumentar la producción y calidad del producto.



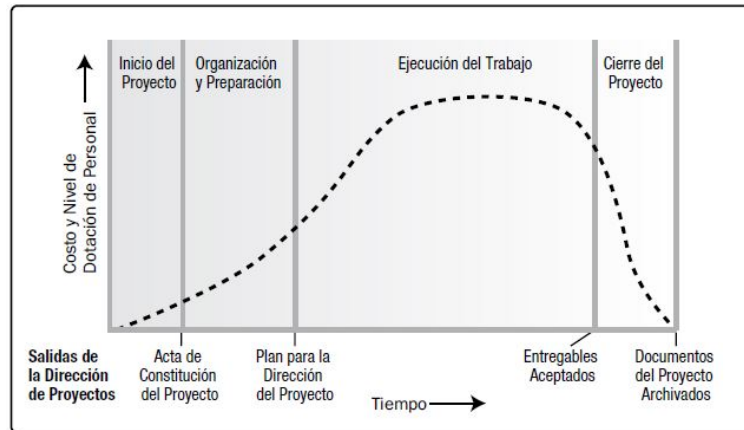
**Figura 2.6:** Importación y exportación de ácido sulfúrico en México 2017

Todos los proyectos varían en complejidad y tamaño, pero se pueden distinguir las siguientes etapas: Inicio, Planeación (que engloba la organización y preparación), Ejecución & control y finalmente el Cierre. Al conjunto de estas etapas se le conoce como *Ciclo de vida de un proyecto*, como se muestra en la Figura[2.7], la etapa más importante es la ejecución y control debido a que para asegurar un buen cierre de proyecto se debe controlar cada etapa del proyecto considerando los pasos de mejora continua, que son planear, hacer, verificar y actuar.



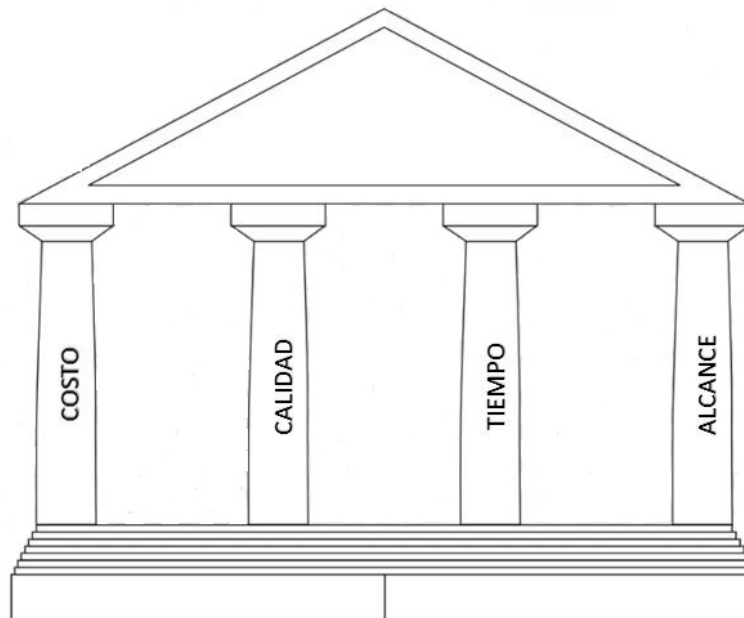
**Figura 2.7:** Ciclo de vida de un proyecto

Dependiendo de la etapa en la que se encuentre el proyecto los recursos necesarios serán diferentes. En la Figura[2.8] se puede observar la relación entre el costo y dotación de personal con las distintas etapas del proyecto, al principio y al final la dotación de personal y el costo son bajos, mientras que durante la ejecución del trabajo es cuando se requiere mayor personal y existen mayores costos.

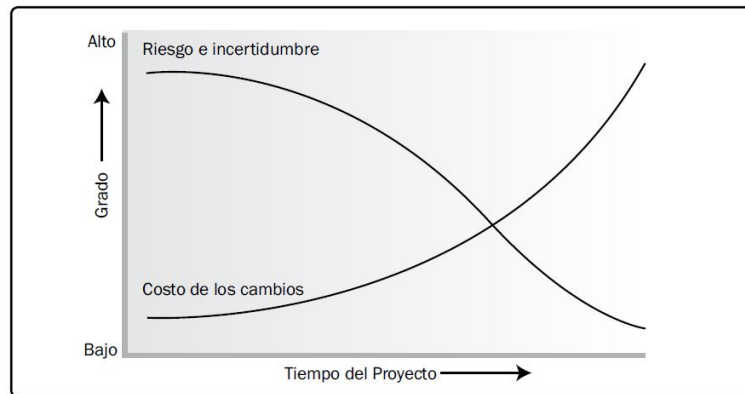


**Figura 2.8:** Relación entre costo y etapas del proyecto

Tomando en cuenta lo anterior, es importante definir desde el principio los cuatro pilares del proyecto, ya que como se muestra en la Figura[2.9], están directamente relacionados, es decir, al modificar alguno se afectan los restantes. Y mientras más avanzado se encuentre el proyecto, cada cambio que se realice será más costoso, ocurriendo lo contrario con los riesgos, es decir, al principio serán mayores y conforme avance el proyecto irán disminuyendo, como se puede observar en la Figura[2.10].



**Figura 2.9:** Pilares de un proyecto



**Figura 2.10:** Relación entre costos y riesgos

Para la planta diseñada en esta tesis, los pilares del proyecto son:

- *Alcance:* La ingeniería conceptual y de detalle de la planta de ácido sulfúrico, considerando desde la quema del azufre para la producción del trióxido de azufre, hasta el envasamiento del ácido sulfúrico para su posterior venta.
- *Calidad:* Se diseñó la planta con los materiales y equipos necesarios para asegurar una buena calidad del producto, es decir asegurando la concentración y pureza del ácido, además de una larga vida útil de la planta.
- Debido a que éste es un proyecto base, al final de la tesis se hizo un cálculo aproximado de los *Costos*.

## 2.3. Fundamentos de Automatización

La automatización es una técnica para manejar todo o parte de un proceso de manufactura, reduciendo al mínimo posible la intervención humana, utilizando principalmente sistemas mecánicos, neumáticos, hidráulicos, eléctricos, electrónicos y basados en computadoras para llevar a cabo la operación y control de la producción. En la industria es común que se realicen automatizaciones, cuando las tareas son:

- Repetitivas.
- Monótonas.

- En ambientes peligrosos.
- En ambientes con condiciones higiénicas muy rigurosas.
- Para mejorar tiempo de respuesta.
- Cuando excede la capacidad humana.
- Por consideraciones económicas.

A continuación se presentan los tres distintos tipos de automatización entre los cuáles se discernió para automatizar los equipos críticos de la planta.

## Neumática

La Neumática [9] consiste en aprovechar la energía del aire comprimido para realizar trabajo. Las primeras aplicaciones de la Neumática se remontan a 2500 A.C. mediante la utilización de fuelles de soplado, el cual es un dispositivo mecánico cuya función es la de contener aire para expelerlo a cierta presión y dirección, se utilizaron los fuelles en minería y siderurgia. Sin embargo el primer tratado de neumática fue escrito por un inventor y matemático de Alejandría llamado Ctesibio, considerado el padre de la neumática, y data de entre 285 - 222 A.C. Posteriormente en el año 3 A.C. Du Shi, un ingeniero chino, utilizó caídas de agua para accionar fuelles de altos hornos donde se producía hierro colado.

No obstante, fue hasta el siglo XIX que se comenzó a utilizar aire comprimido en la industria de forma sistemática. A partir de mediados del siglo XX se comienza a integrar la neumática en los mecanismos de automatización y con la llegada de los PLC, la energía neumática fue más fácil de controlar. Las ventajas del uso del aire comprimido son:

- Abundante.
- Almacenable.
- Fácil de transportar en tanques o tuberías.
- Los conductos de retorno no son necesarios.
- Resistente a variaciones de temperatura.

- Antideflagrante.
- Limpio.
- La velocidad de trabajo es alta.
- La velocidad y fuerza son fácilmente regulables.
- Resistente a sobrecarga.
- Los elementos que constituyen un sistema neumático son simples y de fácil comprensión.

Las desventajas son:

- Necesita preparación antes de su utilización (eliminación de impurezas y humedad).
- La compresibilidad del aire no permite velocidades constantes de los elementos de trabajo.
- Fuerza de trabajo limitada a 20-30kN.
- Ruido, debido a los escapes de aire después de su utilización.
- Es una energía costosa.
- Alta ineficiencia.
- Necesita más mantenimiento que otros sistemas.

## Controladores Lógicos Programables (PLC)

Según la National Electrical Manufacturers Association (NEMA), en su norma NEMA ICS3-1978, se define un PLC como:

*“Un aparato electrónico operado digitalmente, que usa una memoria programable para el almacenamiento interno de instrucciones para implementar funciones específicas, tales como lógica, secuenciación, registro y control de tiempos, conteo y operaciones aritméticas para controlar, a través de módulos de entrada/salida digitales (ON/OFF) o analógicos (1-5 VCD, 4-20 mA, etc.), varios tipos de máquinas o procesos”*

La historia de los PLC's [10] se remonta a finales de los 60's, cuando la industria buscó una solución más eficiente para reemplazar los sistemas de control basados en circuitos eléctricos con relevadores (dispositivo que funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico, en el que por medio de una bobina y un electroimán, se acciona un juego de uno o varios contactos que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos independientes), interruptores y otros componentes comúnmente utilizados para el control de los sistemas de lógica combinacional. Los sistemas basados en relevadores tenían como desventajas: un tiempo de vida limitado, un sistema de mantenimiento muy estricto y en sistemas muy grandes era muy difícil encontrar y aislar fallas.

Por lo que, la empresa Bedford Associates propuso un sistema al que llamó "Modular Digital Controller" (MODICON) mostrado en la Figura[2.11], fue el primer PLC producido comercialmente. Como características tenía que era fácilmente programable, larga vida útil y resistente a ambientes difíciles, todo esto se logró con técnicas de programación conocidas y reemplazando los relevadores por elementos de estado sólido. La habilidad de comunicación entre ellos fue posible a partir de 1973 con el Modbus de Modicon, los PLC's podían estar alejados de la maquinaria que controlaran, pero la falta de estandarización debido al constante cambio en la tecnología hizo que esta comunicación se hiciera difícil. Así que en los 80's se intentó estandarizar la comunicación con el protocolo de automatización de manufactura de la General Motors (MAP). En los 90's se introdujeron nuevos protocolos y se mejoraron algunos ya existentes y además se intentaron combinar los lenguajes de programación en un estándar con el IEC 1131-3.



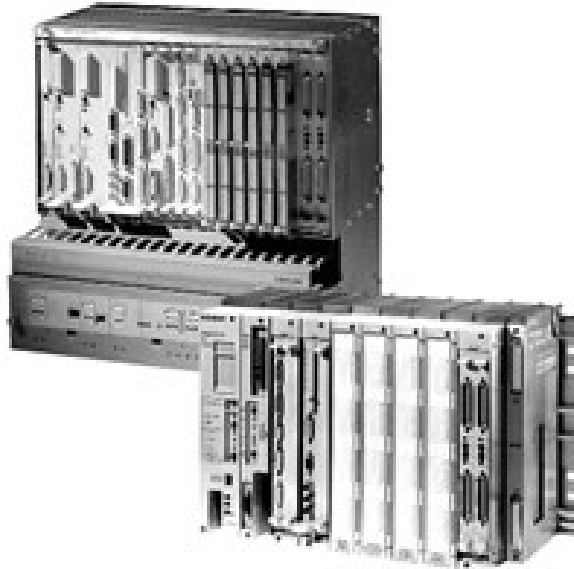


Figura 2.11: MODICON 084

Actualmente, se tienen PLC's que se programan en función de diagramas de bloques, mostrado en la Figura[2.12], listas de instrucciones, lenguaje C, lenguaje escalera, mostrado en la Figura[2.13], entre otros, pueden comunicarse con otros controladores y computadoras en redes de área local, y son una parte fundamental de los modernos sistemas de control distribuido. Y además de controlar la lógica del funcionamiento de máquinas, plantas y procesos industriales también pueden realizar operaciones aritméticas y manejar señales analógicas para realizar estrategias de control, así como los controladores Proporcional Integral Derivativo (PID). Un controlador PID es un mecanismo de control por retroalimentación ampliamente usado en sistemas de control industrial, éste calcula la desviación o error entre un valor medido y el deseado.

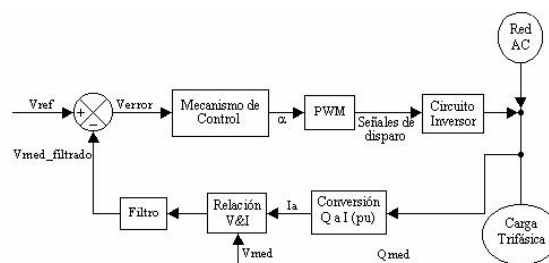


Figura 2.12: Diagrama de bloques



# Diseño de la planta

---

*“Los libros son las abejas que llevan el polen de una inteligencia a otra.”*

---

-James Russell Lowell-

En este capítulo se presenta el diseño de los equipos que forman parte del proceso de fabricación de ácido sulfúrico, por el método de contacto, a partir de azufre elemental en estado líquido. Con lo cual, se aborda las fases de ingeniería conceptual e ingeniería básica.

## 3.1. Especificaciones

Para los equipos necesarios para la planta, las especificaciones necesarias para que se lleve a cabo el proceso en sus distintas etapas son las presiones y temperaturas de operación, así como las composiciones de las corrientes de entrada y las reacciones que se llevan a cabo. Dichos datos se tomaron del Sulfuric acid manufacture, analysis, control and optimization [6]. Por lo que a continuación se mencionan las especificaciones de cada equipo de proceso, considerando una capacidad de 2355.88 [Ton/día] de ácido sulfúrico.

### 3.1.1. Horno (H-01)

Como se mencionó en el capítulo anterior para producir el dióxido de azufre a partir de azufre elemental por el método de quema de azufre, se necesita un horno en donde ingresa el azufre líquido a 140 °C y aire a 120 °C para así producir el dióxido de azufre en forma gaseosa a 1150 °C. Al hacer la simulación usando Aspen Plus se consideró como un reactor, debido a que se lleva a cabo la reacción química:



Por lo tanto, se especificaron las características necesarias como el modelo que se ocupó, que en este caso fue el NRTL, por sus siglas en inglés de Non Random Two Liquids, la cual es una extensión del modelo de Wilson. La diferencia entre ambos es que la de Wilson se basa en una fracción volumen para expresar la concentración local y la segunda se basa en una fracción molar de la especie considerada, mostrada en la ecuación[3.2]. La expresión que permite calcular los coeficientes de actividad para la fase líquida de mezclas multicomponentes en el modelo NRTL es la ecuación[3.3], sustituyendo las ecuaciones[3.4], [3.5] y [3.6]. Donde  $g_{ij}$  y  $g_{jj}$  son las energías libres de Gibbs de interacción entre pares de moléculas y  $\tau_{ji}$  y  $\tau_{ij}$  son los parámetros de interacción. Hay que considerar  $G_{ji} \neq G_{ij}$ ,  $\tau_{ji} \neq \tau_{ij}$ ,  $G_{ji} = G_{ij} = 1$ ,  $\tau_{ji} = \tau_{ij} = 0$  y para mezclas ideales  $\tau_{ij} = 0$ .

$$x_{ji} = \frac{x_j e^{-\alpha_{ji} \tau_{ji}}}{\sum_{k=1}^{NC} x_k e^{-\alpha_{ki} \tau_{ki}}} \quad (3.2)$$

$$\ln \gamma_i^L = \frac{\sum_{j=1}^{NC} \tau_{ji} G_{ji} x_j}{\sum_{k=1}^{NC} G_{ki} x_k} + \sum_{j=i}^{NC} \frac{x_j G_{ij}}{\sum_{k=1}^{NC} G_{kj} x_k} \left[ \tau_{ij} - \frac{\sum_{k=1}^{NC} \tau_{kj} G_{kj} x_k}{\sum_{k=1}^{NC} G_{kj} x_k} \right] \quad (3.3)$$

$$G_{ji} = e^{-\alpha_{ji} \tau_{ji}} \quad (3.4)$$

$$\tau_{ij} = \frac{g_{ij} - g_{jj}}{RT} \quad (3.5)$$

$$\tau_{ji} = \frac{g_{ji} - g_{ii}}{RT} \quad (3.6)$$

Las corrientes especificadas se muestran en la Tabla[3.1] y las especificaciones del equipo son: presión de 4 [atm], temperatura de 1200 °C, equilibrio restringido con la reacción química  $S + O_2 \leftrightarrow SO_2$  e identificando los posibles productos que son dióxido de azufre, nitrógeno y oxígeno.

Componentes	Nombre de la corriente		
	1B	2	AIREE
Nitrógeno		0.79	0.79
Azufre	1		
Dióxido de azufre		0.12	
Trióxido de azufre			
Ácido sulfúrico			0.21
Oxígeno		0.09	
Agua			
Cloruro de sodio			
Temperatura (°C)	140	1150	120
Presión (atm)	1	4	1
Flujo Molar kmol/h	1000	10000	10000

Tabla 3.1: Corrientes especificadas del horno

### 3.1.2. Intercambiador de calor uno (E-01)

Posteriormente, el dióxido de azufre producido en el horno en forma gaseosa a 1150 °C, se debe enfriar a 450 °C para poder entrar al reactor, por lo que se ocupa un intercambiador de calor; tomando como servicio de enfriamiento una salmuera de cloruro de sodio a -40°C. Las especificaciones de las corrientes involucradas son las mostradas en la Tabla[3.2] y las del equipo: temperatura de la corriente caliente de salida de 450 °C, se utiliza un diseño por modelo shurtcut y con los flujos en contracorriente, para tener una mejor transferencia de energía.

Componentes	Nombre de la corriente			
	2	2A	CLORURO1	CLORURO2
Nitrógeno	0.79			
Azufre				
Dióxido de azufre	0.12			
Trióxido de azufre				
Ácido sulfúrico				
Oxígeno	0.09			
Agua			0.75	
Cloruro de sodio			0.25	
Temperatura (°C)	1150		-40	
Presión (atm)	4		1	
Flujo Molar kmol/h	10000		5000	

Tabla 3.2: Corrientes especificadas del intercambiador de calor 1

### 3.1.3. Reactor (R-01)

Después, el dióxido de azufre reacciona con oxígeno en un reactor catalítico. Las especificaciones de las corrientes son las mostradas en la Tabla[3.3] y las del equipo: temperatura constante de 550 °C, cinco tubos de paso de 2 [m] de longitud y 0.5 [m] de diámetro, ésto debido a que con ese número de tubos a esas dimensiones, se asegura que se lleve a cabo la reacción química  $SO_2 + .5O_2 \leftrightarrow SO_3$  con la ayuda de un catalizador de  $V_2O_5$  [12] con una carga de 500[kg] y una densidad de partícula de  $3.357[g/cm^3]$ .

Componentes	Nombre de la corriente	
	2A	3
Nitrógeno		0.79
Azufre		
Dióxido de azufre		
Trióxido de azufre		0.21
Ácido sulfúrico		
Oxígeno		
Agua		
Cloruro de sodio		
Temperatura (°C)		2500
Presión (atm)		4
Flujo Molar kmol/h		10000

Tabla 3.3: Corrientes especificadas del reactor

### 3.1.4. Intercambiador de calor dos (E-02)

Una vez que se tiene el trióxido de azufre en forma gaseosa a una temperatura de 550 °C, se debe enfriar a 100 °C a través de un intercambiador de calor; nuevamente tomando como servicio de enfriamiento una salmuera de cloruro de sodio a -40 °C. Las especificaciones de las corrientes involucradas son las mostradas en la Tabla[3.4] y las del equipo: temperatura de la corriente caliente de 100 °C, se utiliza un diseño por modelo shortcut y con los flujos en contracorriente, para asegurar una mejor transferencia de energía.

Componentes	Nombre de la corriente			
	3	4	CLORUROEN	CLORUROS
Nitrógeno	0.79	0.79		
Azufre				
Dióxido de azufre				
Trióxido de azufre	0.21	0.21		
Ácido sulfúrico				
Oxígeno				
Agua			0.75	
Cloruro de sodio			0.25	
Temperatura (°C)	2500	100	-40	
Presión (atm)	4	7	1	
Flujo Molar kmol/h	10000	10000	5000	

**Tabla 3.4:** Corrientes especificadas del intercambiador de calor 2

### 3.1.5. Bomba uno (B-01)

Una vez efectuadas las etapas anteriores, se debe especificar la torre de absorción, para lo cual se necesita que el agua en la que se absorbe el trióxido de azufre entre por el domo de la torre, por lo que se debe colocar una bomba para que impulse el agua, las corrientes especificadas se muestran en la Tabla[3.5] y al equipo se le especificó la presión de descarga de 5 [atm], para asegurar que por diferencia de presiones entre la corriente de salida de la bomba y la torre de absorción, se lleve a cabo un flujo adecuado entre el líquido y gas presentes en la torre; y una eficiencia de 0.9.

Componentes	Nombre de la corriente	
	AGUA1	AGUA
Nitrógeno		
Azufre		
Dióxido de azufre		
Trióxido de azufre		
Ácido sulfúrico		
Oxígeno		
Agua	1	1
Cloruro de sodio		
Temperatura (°C)	24	24
Presión (atm)	1	5
Flujo Molar kmol/h	3100	3100

**Tabla 3.5:** Corrientes especificadas de la bomba

### 3.1.6. Torre de absorción (T-01)

Por último, el equipo más importante de la planta, la torre de absorción donde se forma el ácido sulfúrico absorbiéndose el trióxido de azufre en agua. Las corrientes especificadas se muestran en la Tabla[3.6] y al equipo se le especificó un modelo por equilibrio de diez etapas, sin condensador ni rehedidor, fases validas líquido y vapor, una presión en el domo de 3.5 [atm] y la entrada de las corrientes a la torre se puede observar en la Tabla[3.7].

Componentes	Nombre de la corriente			
	4	AGUA	ACIDO	GASES
Nitrógeno	0.79			0.8
Azufre				
Dióxido de azufre				
Trióxido de azufre	0.21			
Ácido sulfúrico			0.95	0.1
Oxígeno				0.1
Agua		1	0.05	
Cloruro de sodio				
Temperatura (°C)	100	24	800	900
Presión (atm)	7	5	3	5
Flujo Molar kmol/h	10000	3100	10000	5000

Tabla 3.6: Corrientes especificadas de la torre de absorción

Corriente	Etapas de entrada	Etapas de salida	Fase
4	10		Vapor
AGUA	1		Líquido
ACIDO		10	Líquido
GASES		1	Vapor

Tabla 3.7: Especificaciones de entradas y salidas de la torre de absorción



Para tener una altura aproximada de la torre se ocupa la rapidez de transferencia de masa:

$$r = k_y a (Y_A - Y_A^*) \quad (3.7)$$

Donde:

- $r$  = rapidez de transferencia por unidad de volumen de la torre empacada [ $kgmol/hm^3$ ] o [ $lbmol/hft^3$ ]
- $a$  = área específica del empaque [ $m^2/m^3$ ] o [ $ft^2/ft^3$ ]
- $Y_A$  = fracción de A en el gas

Se efectúa el balance diferencial de materia:

$$d(X_A L) = -d(Y_A G) \quad (3.8)$$

$$d(X_A L) = rv = rSdz \quad (3.9)$$

$$d(Y_A G) = GdY_A \quad (3.10)$$

$$\therefore rSdz = -GdY_A \quad (3.11)$$

$$k_y a (Y_A - Y_A^*) Sdz = -GdY_A \quad (3.12)$$

$$\int_0^{Z_T} dz = - \int_{Y_{A1}}^{Y_{A2}} \frac{GdY_A}{k_y a (Y_A - Y_A^*) S} \quad (3.13)$$

$$\therefore Z_T = \frac{G}{k_y a S} \int_{Y_{A1}}^{Y_{A2}} \frac{dY_A}{Y_A - Y_A^*} \quad (3.14)$$

Donde:

- $\frac{G}{k_y a S}$  = HTU (altura de la unidad de transferencia) [m]
- $NTU = \int_{Y_{A1}}^{Y_{A2}} \frac{dY_A}{Y_A - Y_A^*}$  = NTU es el número de unidades de transferencia

$$\therefore Z_T = (HTU)(NTU) + 6 + 4 \quad (3.15)$$

Los 6 [ft] que se le suman corresponden al fondo y los 4 [ft] corresponden al domo, dichos datos son una regla heurística necesaria para asegurar la eficiencia de las etapas y permitir una adecuada separación de las fases (gaseosa que sale por el domo y líquida que sale por el fondo) antes de salir de la torre.

La unidad de transferencia de masa es el número de veces que se alcanza el equilibrio dentro de la torre.

Siguiendo los cálculos antes mencionados, para la torre en cuestión:

$$HTU = 1.7[ft] \quad (3.16)$$

$$NTU = 3.88 \approx 4 \quad (3.17)$$

$$\therefore Z_T = [4 * 1.7] + 10 = 16.6[ft] \quad (3.18)$$

Después para calcular el diámetro de la torre se eligió un empaque cerámico, similar a la silla intalox, mostrado en la Figura[3.1], debido a que al ser cerámico es más resistente a estar en contacto con el ácido que otros materiales y es un empaque comercial, lo que lo hace más económico que otros empaques, para el cual:

$$\Delta P = 0.8 \left[ \frac{inH_2O}{ft} \right] \quad (3.19)$$

Se calcula el parámetro de capacidad vía la cancelación generalizada de caída de presión y se obtiene  $1.3 \left[ \frac{ft}{sft^{-0.5}cSt^{0.05}} \right]$ , se calcula el área de transferencia dentro de la torre, como se muestra en la ecuación(3.20).

$$S = \frac{GF^{0.5}v_L^{0.05}}{Cp\sqrt{\rho_G}\sqrt{\rho_L - \rho_G}} \quad (3.20)$$

$$S = \frac{196.14 * (40^{.5}) * \left( \frac{0.15 * 1000}{897.84} \right)^{0.05}}{1.3 * \sqrt{4.55} \sqrt{897.84 - 4.55}} = 13.68[ft^2] \quad (3.21)$$



**Figura 3.1:** Empaque cerámico de tipo silla intalox

Donde:

- $S$  = Área de transferencia dentro de la torre [ $ft^2$ ]
- $G$  = Flujo másico [ $lb/s$ ]
- $F$  = Factor del empaque [*adimensional*]
- $\nu_L$  = Viscosidad del líquido [ $cp$ ]
- $\rho_L$  = Densidad del líquido [ $kg/m^3$ ]
- $\rho_G$  = Densidad del gas [ $kg/m^3$ ]
- $CP$  = Parámetro de capacidad  $\left[ \frac{ft}{s ft^{-0.5} cSt^{0.05}} \right]$

Y por último se calcula el diámetro de la torre:

$$D = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} \quad (3.22)$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 13.68}{\pi}} = 4.17 \approx 4.5[ft] \quad (3.23)$$

Por lo que la altura de la torre es de 16.6 [ft] (5 [m]) y el diámetro de 4.5 [ft] (1.37 [m]).

Después de simular los equipos antes mencionados, que son los que forman parte del proceso de producción del ácido sulfúrico, se añadieron los equipos secundarios, es decir los que acondicionan las corrientes de entrada del azufre y del aire al horno, considerando también

recirculaciones de los refrigerantes para calentar otras corrientes que así lo requieran, esto con el propósito de ahorrar tanto en refrigerantes como en tratamiento para enfriarlos. Por lo que las especificaciones de los equipos antes mencionados son los siguientes.

### 3.1.7. Intercambiador de calor tres (E-03)

Para acondicionar el aire que entra al horno, se necesita primeramente un intercambiador de calor para poder calentar el aire a 120 °C, por lo que se ocupa como fluido caliente la salmuera proveniente del intercambiador uno, las corrientes especificadas se muestran en la tabla[3.8] y las del equipo son: temperatura del servicio de enfriamiento de 120 °C, se utiliza un diseño por modelo shortcut y con los flujos en contracorriente.

Componentes	Nombre de la corriente			
	CLORURO2	CLORURO3	AIREAMB	AIREE
Nitrógeno			0.79	0.79
Azufre				
Dióxido de azufre				
Trióxido de azufre				
Ácido sulfúrico			0.21	0.21
Oxígeno				
Agua				
Cloruro de sodio				
Temperatura (°C)			23	120
Presión (atm)			1	1
Flujo Molar kmol/h			10000	10000

**Tabla 3.8:** Corrientes especificadas del intercambiador de calor 3

### 3.1.8. Compresor (C-01)

Posteriormente, se debe comprimir el aire calentado a 120 °C, para aumentar su presión haciendo que sea mayor que la presión a la que opera el horno y así fluya correctamente el aire hacia el horno y no de forma inversa. Las corrientes especificadas se muestran en la Tabla[3.9] y las del equipo son: una presión de descarga de 5 [atm], de tipo isoentrópico, es decir manteniendo la entropía del sistema constante y con una eficiencia del 0.9.

Componentes	Nombre de la corriente	
	AIREE	AIRE1
Nitrógeno	0.79	
Azufre		
Dióxido de azufre		
Trióxido de azufre		
Ácido sulfúrico	0.21	
Oxígeno		
Agua		
Cloruro de sodio		
Temperatura (°C)	120	
Presión (atm)	1	
Flujo Molar kmol/h	10000	

**Tabla 3.9:** Corrientes especificadas del compresor

### 3.1.9. Intercambiador de calor cuatro (E-04)

A continuación se procedió a acondicionar la corriente de entrada del horno correspondiente al azufre, por lo que nuevamente se ocupa una corriente previamente utilizada, que en este caso es la corriente de salida del intercambiador de calor 3. Las especificaciones de las corrientes involucradas son las mostradas en la Tabla[3.10] y las del equipo son: temperatura del servicio de enfriamiento de 140 °C, se utiliza un diseño por modelo shortcut y con los flujos en contracorriente.

Componentes	Nombre de la corriente			
	CLORURO3	CLORURO4	1	1A
Nitrógeno				
Azufre			1	1
Dióxido de azufre				
Trióxido de azufre				
Ácido sulfúrico				
Oxígeno				
Agua				
Cloruro de sodio				
Temperatura (°C)			23	140
Presión (atm)			1	1
Flujo Molar kmol/h			1000	1000

**Tabla 3.10:** Corrientes especificadas del intercambiador 4

### 3.1.10. Bomba dos (B-02)

Por último, dicha corriente de azufre a 140 °C debe pasar a través de una bomba para incrementar su presión y facilitar el flujo hacia el horno. Por lo que las especificaciones de las corrientes se muestran en la Tabla[3.11] y al equipo se le especificó la presión de descarga de 5 [atm], para asegurar el flujo hacia el horno por diferencia de presiones y una eficiencia de 0.9.

Componentes	Nombre de la corriente	
	1A	1B
Nitrógeno		
Azufre	1	
Dióxido de azufre		
Trióxido de azufre		
Ácido sulfúrico		
Oxígeno		
Agua		
Cloruro de sodio		
Temperatura (°C)	140	
Presión (atm)	1	
Flujo Molar kmol/h	1000	

**Tabla 3.11:** Corrientes especificadas de la bomba 2

Por lo que el Diagrama de Flujo de Proceso (DFP) de la planta, hasta este momento queda como se muestra en la Figura[3.2].

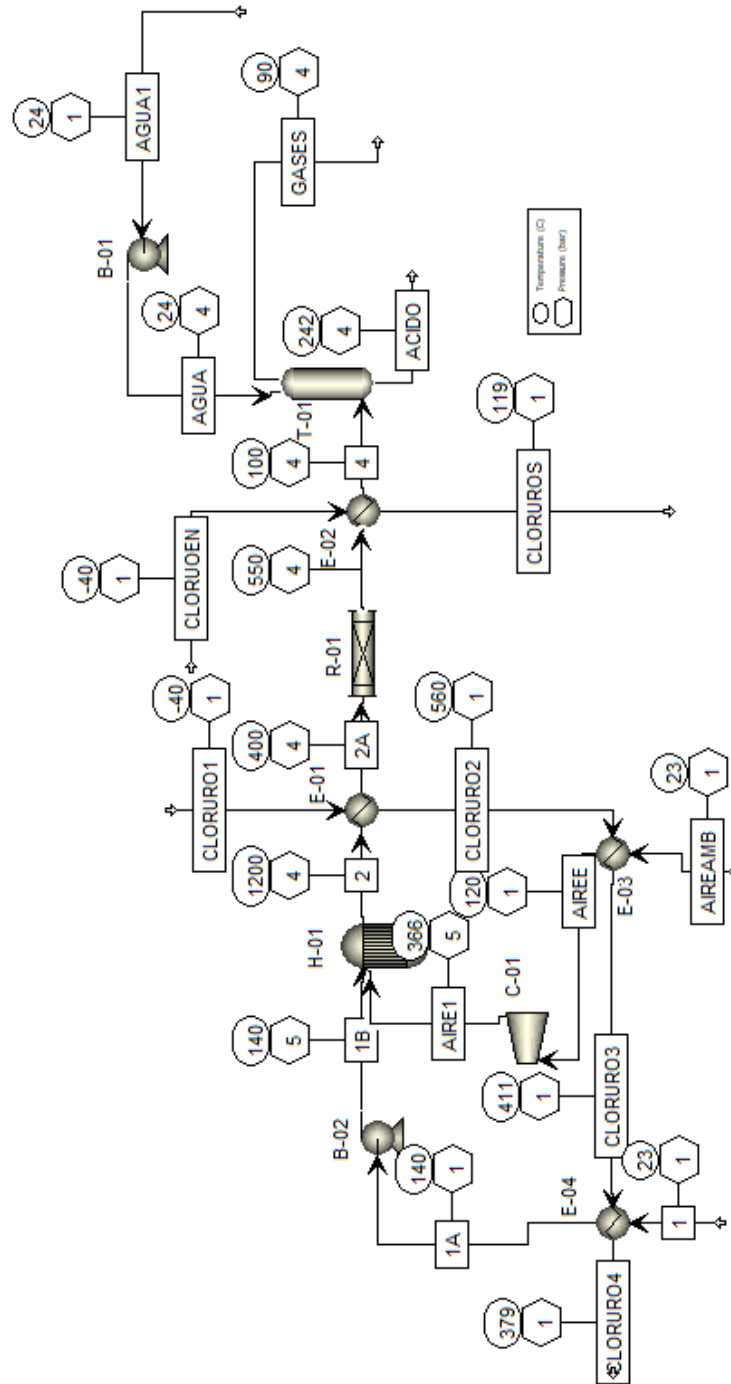


Figura 3.2: Diagrama de Flujo de Proceso (DFP)



# Automatización

---

*“La inspiración existe, pero tiene que encontrarte trabajando.”*

---

-Pablo Picasso-

En el presente capítulo se muestra la automatización de la planta. Debido a la naturaleza de la planta y las características de operación de los equipos involucrados se decidió automatizar los equipos críticos del proceso, es decir aquellos que tienen un contacto directo con las corrientes de proceso, que son el horno, el reactor, la torre, dos de los intercambiadores de calor y la bomba que suministra el agua a la torre; dichos equipos llevan a cabo tareas riesgosas, repetitivas y bajo un régimen específico para asegurar su calidad. Asimismo se automatizó con programas de tipo escalera para PLC's, usando como apoyo el simulador LogixPro.

Se propone para realizar la automatización formal, el siguiente equipo: un controlador Controllogix 5570 (las características se muestran en el anexo III), de Rockwell Automation considerando la utilización de los correspondientes módulos de E/S, E/S a relvadores, fuente de poder, módulos PID y gabinete, con un protocolo de comunicación MODBUS, como se muestra en la Figura[4.1], el cual es un protocolo de solicitud - respuesta implementado usando una relación maestro - esclavo. En dicha relación la comunicación siempre se realiza en pares, es decir un dispositivo debe iniciar una solicitud y luego esperar una respuesta, mientras que el dispositivo de inicio (maestro) es responsable de iniciar cada interacción. Lo anterior mencionado tiene un costo aproximado de \$100,400 dólares.

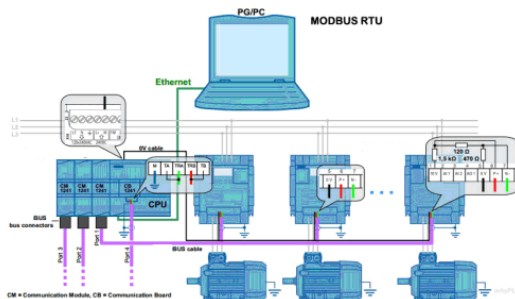


Figura 4.1: Protocolo de comunicación MODBUS

## 4.1. Horno (H-01)

Para el primer equipo crítico, se debe automatizar la temperatura y la presión del equipo, además de las condiciones a la que entran las corrientes de azufre y aire. Por lo que se automatizó, como se muestra en la Figura[4.2], en donde en el primer peldaño con la ayuda de un sensor de presión en la corriente de aire1 ,la cual entra al horno, se obtiene un valor análogo, dicho valor se compara con el valor preestablecido que en este caso es de 5 [atm]. Si el valor obtenido por el sensor es menor al preestablecido se tendrá como salida un despliegue de alerta por presión baja, debido a que probablemente no esté funcionando adecuadamente el compresor y necesite mantenimiento.

En cambio en el segundo peldaño, en el cual se compara el dato obtenido del sensor colocado en la corriente 1B, correspondiente al azufre entrante al horno contra las 5 [atm], si en este caso el dato obtenido es menor, se desactivará dicha bomba y activa la bomba de relevo, para así seguir con la operación de la planta. En el tercer peldaño se coloca un sensor de temperatura en la corriente 1B y se vuelve a comparar contra un valor preestablecido que en este caso es de 130 °C, si es menor se cerrará parcialmente la válvula que alimenta el refrigerante a los intercambiadores de calor, que en este caso corresponde a la corriente de cloruro 2.

Ocurriendo lo contrario en el cuarto peldaño, debido a que aquí se compara contra un valor de 150 °C, y en el caso de que el valor del sensor sea mayor se dará paso a un mayor flujo de cloruro2. En el siguiente peldaño el sensor de presión se colocó en el horno y se compara contra 5 [atm], que es la presión máxima a la que puede operar el horno, en el caso de que la presión fuera igual o mayor a dicho valor, se tendría un paro de emergencia además de la apertura de

un sistema de desfogue a donde pasarían los gases para su posterior tratamiento o utilización. Y por último en el sexto peldaño tenemos el fin del programa.

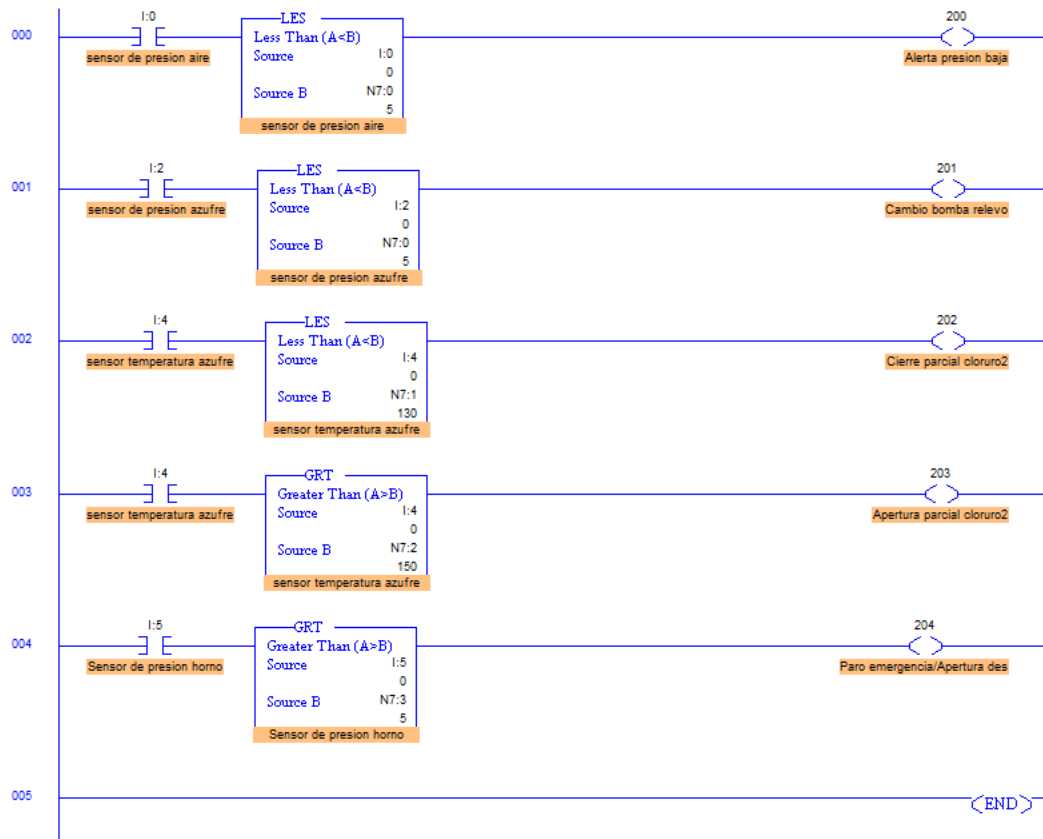


Figura 4.2: Automatización del horno

## 4.2. Intercambiador de calor uno (E-01)

El segundo equipo crítico es el primer intercambiador de calor, debido a que la corriente de entrada al reactor debe estar entre 400 y 600 °C para que se lleve a cabo la reacción y el catalizador empleado no se descomponga. Por lo que la automatización realizada se muestra en la Figura[4.3], donde en el primer peldaño se coloca un sensor de temperatura en la corriente 2A, se compara contra un valor de 450 °C, y si es menor se cerrará parcialmente la válvula de la corriente del refrigerante cloruro1. En el siguiente peldaño se compara el mismo dato del sensor contra un valor de 550 °C y si es mayor se abrirá parcialmente la válvula de cloruro1. En el tercer peldaño se coloca un sensor de presión en 2A y el valor obtenido se compara contra un valor de 4 [atm], si es menor se despliega una alerta por fuga, que posiblemente se tenga en la corriente 2. Y por último en el cuarto peldaño se tiene el fin del programa.

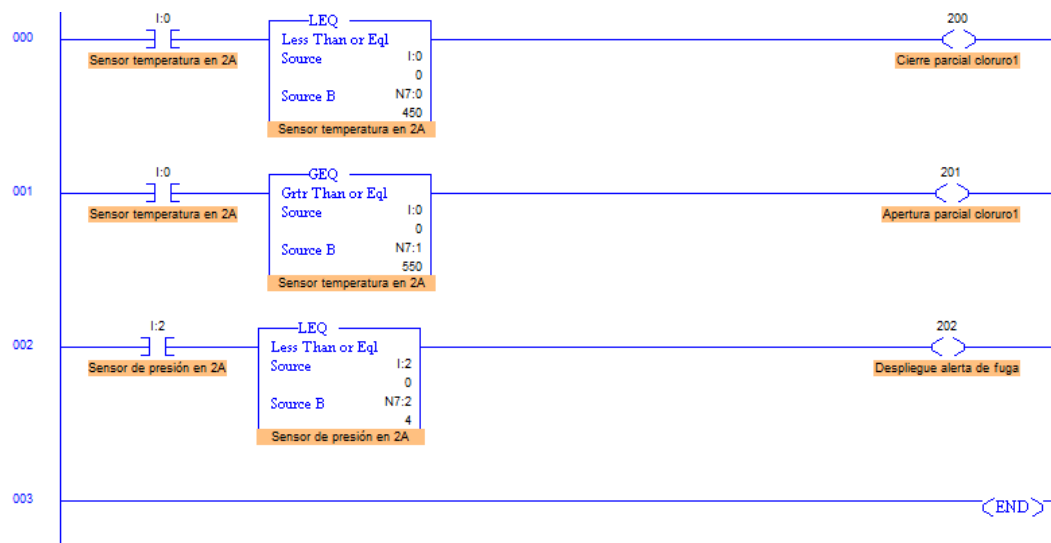


Figura 4.3: Automatización del intercambiador de calor 1

### 4.3. Reactor (R-01)

El siguiente equipo a automatizar es el reactor, debido a que la reacción que se lleva a cabo es exotérmica se diseñó con una cubierta por donde pasará un refrigerante para evitar que se sobrecaliente el reactor, se descomponga el catalizador y también evitar un posible accidente. Por lo que la automatización del reactor quedó como se muestra en la Figura[4.4] en donde en el primer peldaño, se coloca un sensor de temperatura en el reactor y el dato obtenido se compara contra uno preestablecido de 450 °C, si el dato es menor se cierra parcialmente la válvula que alimenta el refrigerante. En el segundo peldaño se compara el mismo valor contra 550 °C, si es mayor a dicho valor se abrirá parcialmente la válvula. Para el tercer peldaño se coloca un sensor de presión en el reactor y el dato obtenido se compara contra 5 [atm], y si es mayor la presión del reactor se activa el paro de emergencia y se abre el desfogue para que salgan los gases para su posterior tratamiento o uso. Y por último en el cuarto peldaño se tiene el fin del programa.

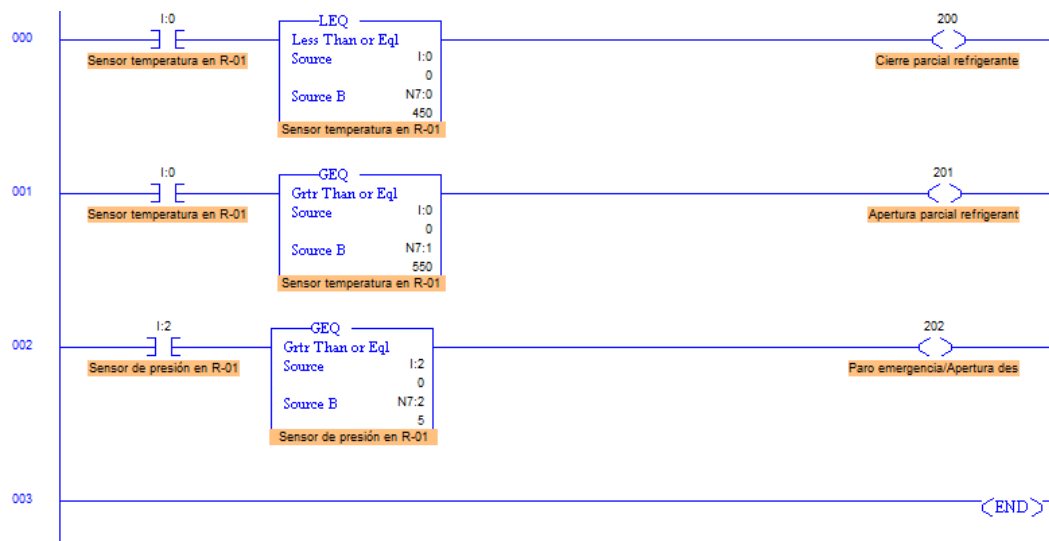


Figura 4.4: Automatización del reactor

## 4.4. Intercambiador de calor dos (E-02)

Una vez que se tiene lo anterior, se llega al segundo intercambiador de calor, para enfriar la corriente de proceso a 100 °C, por lo que la automatización queda como se muestra en la Figura[4.5] donde se puede ver que en el primer peldaño se coloca un sensor de temperatura en la corriente 4, se compara contra un valor de 90 °C, y si es menor se cerrará parcialmente la válvula de la corriente del refrigerante cloruroen. En el siguiente peldaño se compara el mismo dato del sensor contra un valor de 120 °C y si es mayor se abrirá parcialmente la válvula de cloruroen. En el tercer peldaño se coloca un sensor de presión en 4 y el valor obtenido se compara contra un valor de 4 [atm], si es menor se despliega una alerta por fuga, que posiblemente se tenga en la corriente 3. Y por último en el cuarto peldaño se tiene el fin del programa.

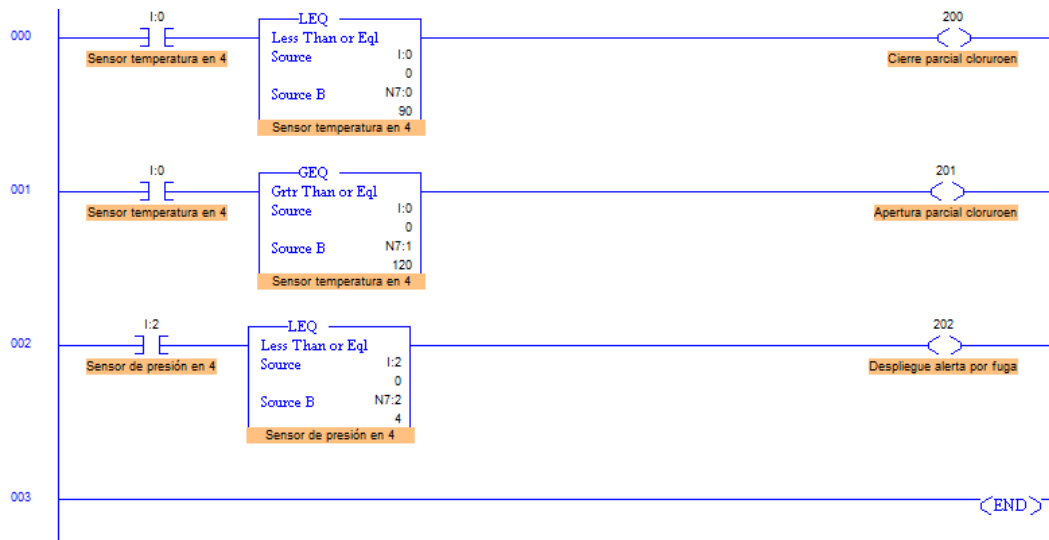


Figura 4.5: Automatización del segundo intercambiador de calor

## 4.5. Bomba uno (B-01)

El siguiente equipo a automatizar es la bomba suministradora de agua a la torre, este es un equipo importante de controlar debido a que la cantidad de agua que ingresa a la torre no debe variar porque afecta directamente la concentración del ácido sulfúrico producido. Por lo que la automatización quedó como se muestra en la Figura[4.6], donde en el primer peldaño se coloca un sensor de presión en la corriente de agua y se compara contra un valor de 5 [atm], si es menor el valor obtenido se apaga dicha bomba activando la bomba de relevo. En el siguiente peldaño se coloca un medidor de flujo en la corriente de agua y el valor obtenido se compara contra 3000 [kmol/h], si es menor el valor obtenido se abre parcialmente la válvula suministradora de agua1. En el siguiente peldaño se compara el mismo dato del sensor contra 3150 [kmol/h], si es mayor se cierra parcialmente la válvula de agua1. Y por último en el cuarto peldaño se tiene el fin del programa.

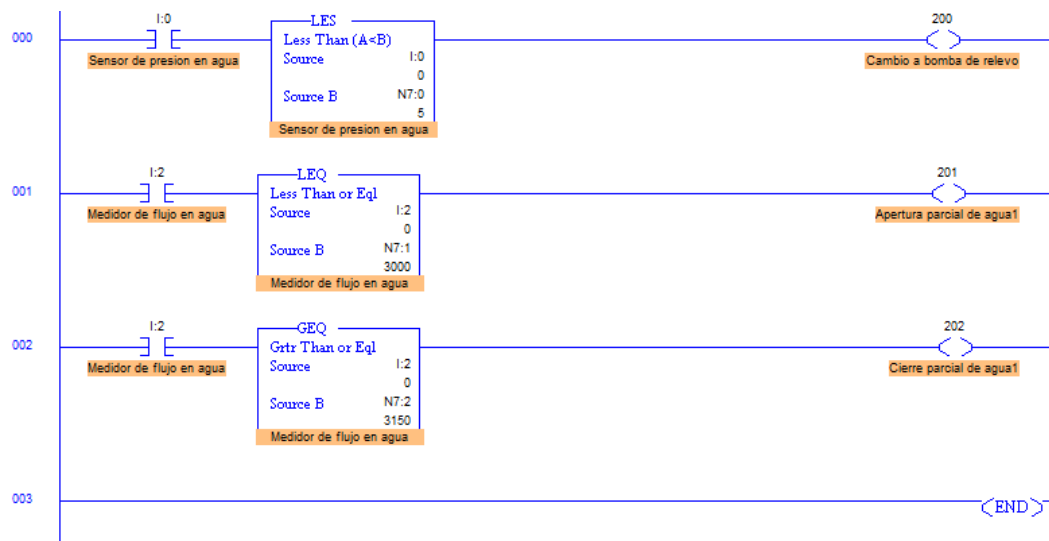


Figura 4.6: Automatización de la bomba suministradora de agua

## 4.6. Torre de absorción (T-01)

Después se debe automatizar la torre de absorción, donde se produce el ácido sulfúrico, por lo que se debe tener un control riguroso del agua que entra para tener una concentración constante de ácido a la salida. Asimismo se debe controlar la cantidad de trióxido de azufre a la atmósfera, ya que el límite máximo producido es de  $3[kg]$  por tonelada, según la NOM-039-SEMARNAT-1993, que se encuentra en el Anexo II. Por lo que la automatización quedó como se muestra en la Figura[4.7], donde en el primer peldaño se coloca un analizador de  $SO_3$  en la corriente de gases y se compara contra los  $3[kg]$  que se pueden liberar a la atmósfera siendo esto equivalente a un 40%, si el valor obtenido es menor los gases se liberarán a la atmósfera. En el siguiente peldaño se comparan los mismos valores, pero si es mayor deberán pasar al desfogue para su posterior tratamiento o uso. Posteriormente se coloca un analizador en la corriente de ácido, dicho valor se compara contra un 98% de concentración y si es mayor pasa a la embotelladora 1, en cambio si el valor es menor el ácido pasa a la embotelladora 2. Por último en el quinto peldaño se tiene el fin del programa.

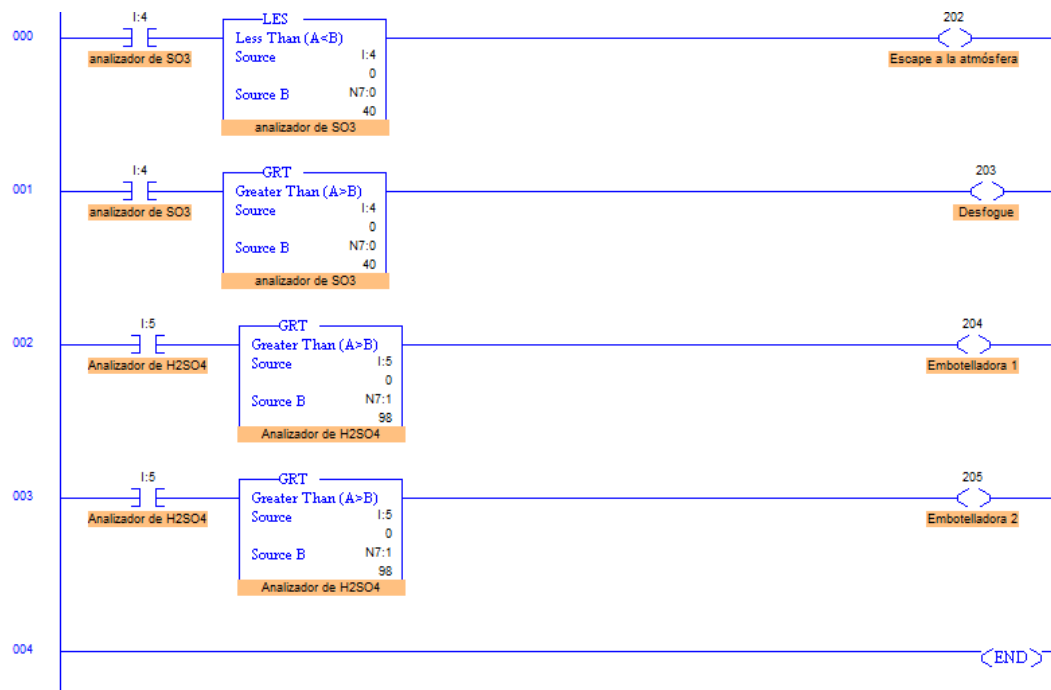


Figura 4.7: Automatización de la torre de absorción



## 4.7. Embotelladora (Emb)

Por último se deben automatizar la embotelladoras, las cuales cuentan con un funcionamiento como el mostrado en la figura[4.8], con la diferencia de que en lugar de cajas se tendrán botellas de vidrio, que pueden ser de capacidad desde 1L hasta 10L. La automatización queda como se muestra en la figura[4.9] en donde en el primer peldaño se tiene encendido el motor que hace avanzar la banda transportadora hasta que la botella llega al sensor de proximidad o se desactiva la luz de encendido.

En el segundo peldaño, se especifica que la luz de encendido se activa con el botón Start y se desactiva al oprimir Stop. Después en el tercer peldaño, mientras la luz de encendido esté activa y se active el sensor de proximidad, la botella comenzará a llenarse con la válvula solenoide hasta que se active la luz de llenado. En el siguiente peldaño se especifica que la luz de llenado se activa cuando se active la válvula solenoide. En el quinto peldaño, mientras el sensor de nivel no se active se estará llenando la botella, cuando se active se desactivará la válvula solenoide y el sensor de proximidad que permitirá que la banda transportadora siga avanzando. Y por último en el sexto peldaño se tiene el final del programa.

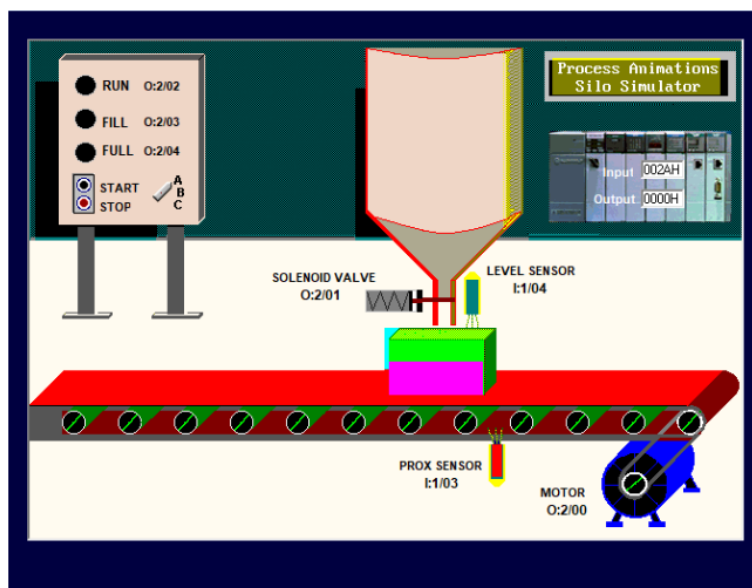


Figura 4.8: Embotelladora

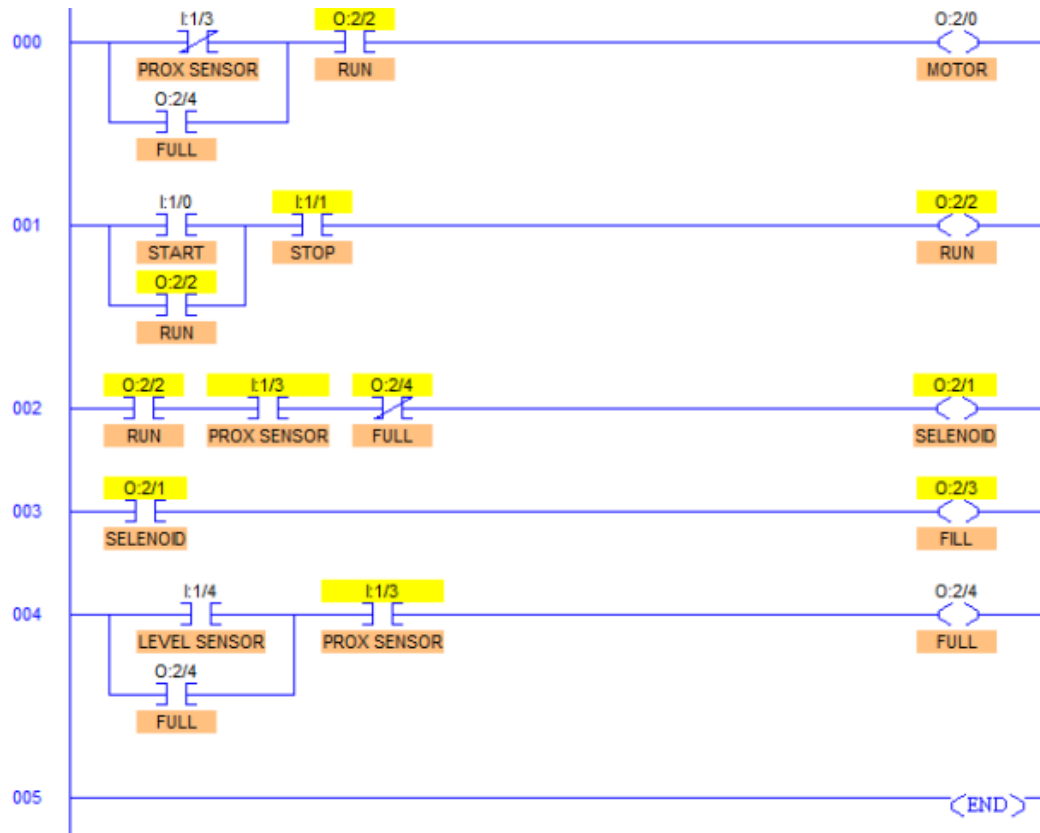


Figura 4.9: automatización de la embotelladora

# Resultados

---

*“¡Que extraña cosa el conocimiento! Una vez que ha penetrado en la mente, se aferra a ella como la hiedra a la roca.”*

---

-Frankenstein-

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos, al realizar las simulaciones correspondientes del diseño de la planta utilizando Aspen Plus, descrito en el capítulo 3, así como el Diagrama de Tubería e Instrumentación con lo necesario para la automatización descrita en el capítulo 4.

## 5.1. Resultados por equipo de proceso

Para visualizar qué es lo que está ocurriendo en cada equipo, con las corrientes de proceso, se presentan los resultados de las corrientes involucradas por equipo.

### 5.1.1. Horno (H-01)

En este equipo las corrientes participantes son 1B, correspondiente al azufre entrante; Aire1, siendo el aire entrante y 2, que es la corriente de salida del horno la cual contiene el dióxido de azufre. Como se muestra en la Tabla[5.1], el azufre entra a 140 °C con 5 [atm] de presión, el aire entra a 366 °C y 5 [atm]. Dentro del horno se lleva a cabo la reacción  $S + O_2 \leftrightarrow SO_2$ , por lo que la corriente 2 contiene  $SO_2$ ,  $O_2$  y  $N_2$  a 1200 °C y 4 [atm] de presión.

Nombre de la corriente	1B	AIRE1	2
Substream: MIXED			
Mole Flow kmol/hr			
Nitrógeno	0	7900	7900
Azufre	1000	0	0
Dióxido de azufre	0	0	1000
Trióxido de azufre	0	0	0
Ácido sulfúrico	0	0	0
Oxígeno	0	2100	1100
Agua	0	0	0
Cloruro de sodio	0	0	0
Total Flow (kmol/hr)	1000	10000	10000
Total Flow (kg/hr)	32066	288504	320570
Total Flow (l/min)	266.128	1747960	5036700
Temperature (°C)	140.1609	365.9098	1200
Pressure (bar)	5.06625	5.06625	4.053
Vapor Frac	0	1	1
Liquid Frac	1	0	0
Solid Frac	0	0	0
Enthalpy (cal/mol)	64209.87	2427.662	2474.971
Enthalpy (cal/gm)	2002.428	84.14658	77.20533
Enthalpy (cal/sec)	17836100	6743510	6874920
Entropy (cal/mol-K)	44.17885	3.235241	11.44952
Entropy (cal/gm-K)	1.377748	0.1121385	0.3571612
Density (mol/cc)	0.0626265	9.53E-05	3.31E-05
Density (gm/cc)	2.008182	0.0027509	0.0010608
Average MW	32.066	28.8504	32.057
Liq Vol 60F (l/min)	290.3383	8926.3	8815.003

Tabla 5.1: Resultados de las corrientes participantes del horno

### 5.1.2. Intercambiador de calor uno (E-01)

Una vez se tiene la corriente 2 con el  $SO_2$ ,  $O_2$  y  $N_2$  a 1200 °C y 4 [atm] de presión, debe pasar a un intercambiador de calor para disminuir su temperatura, como se muestra en la Tabla[5.2], la corriente de salida 2A se obtiene con una temperatura de 400 °C y a 4 [atm] de presión. Mientras que la corriente del refrigerante entra con una temperatura de -40 °C y sale a 560 °C, con 1 [atm] de presión.

Nombre de la corriente	2	CLORURO1	2A	CLORURO2
Substream: MIXED				
Mole Flow kmol/hr				
Nitrógeno	7900	0	7900	0
Azufre	0	0	0	0
Dióxido de azufre	1000	0	1000	0
Trióxido de azufre	0	0	0	0
Ácido sulfúrico	0	0	0	0
Oxígeno	1100	0	1100	0
Agua	0	3750	0	3750
Cloruro de sodio	0	1250	0	1250
Total Flow (kmol/hr)	10000	5000	10000	5000
Total Flow (kg/hr)	320570	140610	320570	140610
Total Flow (l/min)	5036700	1829.028	2301500	4270980
Temperature (°C)	1200	-40	400	559.7329
Pressure (bar)	4.053	1.01325	4.053	1.01325
Vapor Frac	1	0	1	0.7497787
Liquid Frac	0	1	0	0.2502213
Solid Frac	0	0	0	0
Enthalpy (cal/mol)	2474.971	-73210.01	-4277.649	-59704.77
Enthalpy (cal/gm)	77.20533	-2603.293	-133.4389	-2123.057
Enthalpy (cal/sec)	6874920	-101680000	-11882000	-82923000
Entropy (cal/mol-K)	11.44952	-28.54921	4.892496	-0.3429406
Entropy (cal/gm-K)	0.3571612	-1.015188	0.1526187	-0.0121947
Density (mol/cc)	3.31E-05	0.0455615	7.24E-05	1.95E-05
Density (gm/cc)	0.0010608	1.281285	0.0023215	0.0005487
Average MW	32.057	28.12208	32.057	28.12208
Liq Vol 60F (l/min)	8815.003	1755.773	8815.003	1755.773

Tabla 5.2: Resultados de las corrientes participantes en el primer intercambiador de calor

### 5.1.3. Reactor (R-01)

Ya que se tiene la corriente 2A de  $SO_2$ ,  $O_2$  y  $N_2$  a  $400\text{ }^\circ\text{C}$  y 4 [atm] de presión, ya puede entrar al reactor donde se lleva a cabo la reacción  $SO_2 + 1/2O_2 \leftrightarrow SO_3$  con ayuda de un catalizador de  $V_2O_5$  y como se observa en la Tabla[5.3] dicha corriente 3, tiene una composición de  $SO_3$ ,  $N_2$  y  $O_2$  a  $550\text{ }^\circ\text{C}$  y 4 [atm] de presión.

Nombre de la corriente	2A	3
Substream: MIXED		
Mole Flow kmol/hr		
Nitrógeno	7900	7900
Azufre	0	0
Dióxido de azufre	1000	0
Trióxido de azufre	0	1000.028
Ácido sulfúrico	0	0
Oxígeno	1100	599.9859
Agua	0	0
Cloruro de sodio	0	0
Total Flow (kmol/hr)	10000	9500.014
Total Flow (kg/hr)	320570	320572
Total Flow (l/min)	2301500	2673640
Temperature ( $^\circ\text{C}$ )	400	550
Pressure (bar)	4.053	4.053
Vapor Frac	1	1
Liquid Frac	0	0
Solid Frac	0	0
Enthalpy (cal/mol)	-4277.649	-5714.458
Enthalpy (cal/gm)	-133.4389	-169.3456
Enthalpy (cal/sec)	-11882000	-15080000
Entropy (cal/mol-K)	4.892496	4.37502
Entropy (cal/gm-K)	0.1526187	0.1296519
Density (mol/cc)	7.24E-05	5.92E-05
Density (gm/cc)	0.0023215	0.0019984
Average MW	32.057	33.74435
Liq Vol 60F (l/min)	8815.003	8288.952

Tabla 5.3: Resultados de las corrientes participantes en el reactor

#### 5.1.4. Intercambiador de calor dos (E-02)

Posteriormente la corriente 3 con  $SO_3$ ,  $N_2$  y  $O_2$  a  $550\text{ }^\circ\text{C}$  y 4 [atm] de presión deberá enfriarse nuevamente para poder ingresar a la torre de absorción por lo que con otro intercambiador de calor se logra como se muestra en la Tabla[5.4], la corriente de 4 sale con una temperatura de  $100\text{ }^\circ\text{C}$  y 4 [atm], mientras que la corriente del refrigerante entra a  $-40\text{ }^\circ\text{C}$  y sale a  $119\text{ }^\circ\text{C}$  con una presión de 1 [atm].

Nombre de la corriente	3	CLORUOEN	4	CLORUROS
Substream: MIXED				
Mole Flow kmol/hr				
Nitrógeno	7900	0	7900	0
Azufre	0	0	0	0
Dióxido de azufre	0	0	0	0
Trióxido de azufre	1000.028	0	1000.028	0
Ácido sulfúrico	0	0	0	0
Oxígeno	599.9859	0	599.9859	0
Agua	0	3750	0	3750
Cloruro de sodio	0	1250	0	1250
Total Flow (kmol/hr)	9500.014	5000	9500.014	5000
Total Flow (kg/hr)	320572	140610	320572	140610
Total Flow (l/min)	2673640	1829.028	1212010	1257180
Temperature ( $^\circ\text{C}$ )	550	-40	100	118.8742
Pressure (bar)	4.053	1.01325	4.053	1.01325
Vapor Frac	1	0	1	0.4685279
Liquid Frac	0	1	0	0.5314721
Solid Frac	0	0	0	0
Enthalpy (cal/mol)	-5714.458	-73210.01	-9380.869	-66243.82
Enthalpy (cal/gm)	-169.3456	-2603.293	-277.9982	-2355.581
Enthalpy (cal/sec)	-15080000	-101680000	-24755000	-92005000
Entropy (cal/mol-K)	4.37502	-28.54921	-2.020104	-11.3574
Entropy (cal/gm-K)	0.1296519	-1.015188	-0.0598649	-0.4038605
Density (mol/cc)	5.92E-05	0.0455615	0.0001306	6.63E-05
Density (gm/cc)	0.0019984	1.281285	0.0044083	0.0018641
Average MW	33.74435	28.12208	33.74435	28.12208
Liq Vol 60F (l/min)	8288.952	1755.773	8288.952	1755.773

Tabla 5.4: Resultados de las corrientes participantes en el segundo intercambiador de calor

### 5.1.5. Bomba uno (B-01)

Para alimentar el agua de entrada a la torre de absorción es necesario utilizar una bomba que proporcione la corriente con la presión adecuada, por lo que como se observa en la Tabla[5.5] la corriente agua1 entra con una temperatura de 24 °C y 1 [atm], mientras que al salir de la bomba tiene 4 [atm] de presión.

Nombre de la corriente	AGUA1	AGUA
Substream: MIXED		
Mole Flow kmol/hr		
Nitrógeno	0	0
Azufre	0	0
Dióxido de azufre	0	0
Trióxido de azufre	0	0
Ácido sulfúrico	0	0
Oxígeno	0	0
Agua	3100	3100
Cloruro de sodio	0	0
Total Flow (kmol/hr)	3100	3100
Total Flow (kg/hr)	55847.37	55847.37
Total Flow (l/min)	935.541	935.6157
Temperature (°C)	24	24.08247
Pressure (bar)	1.01325	4.053
Vapor Frac	0	0
Liquid Frac	1	1
Solid Frac	0	0
Enthalpy (cal/mol)	-68279.91	-68278.45
Enthalpy (cal/gm)	-3790.111	-3790.03
Enthalpy (cal/sec)	-58797000	-58795000
Entropy (cal/mol-K)	-39.02444	-39.01954
Entropy (cal/gm-K)	-2.166186	-2.165914
Density (mol/cc)	0.0552265	0.0552221
Density (gm/cc)	0.9949211	0.9948416
Average MW	18.01528	18.01528
Liq Vol 60F (l/min)	932.5833	932.5833

**Tabla 5.5:** Resultados de las corrientes participantes en la bomba suministradora de agua



### 5.1.6. Torre de absorción (T-01)

El último equipo de proceso es la torre de absorción donde se lleva a cabo la reacción  $SO_3 + H_2O \leftrightarrow H_2SO_4$ , por lo que entra por la parte del domo la corriente de agua a 24 °C y 4 [atm] y por la parte del fondo la corriente 4 con composición de  $SO_3$ ,  $N_2$  y  $O_2$  a 100 °C y 4 [atm]. Como se muestra en la Tabla[5.6] las corrientes de salida son ácido, por la parte del fondo, con una composición de  $H_2SO_4$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $O_2$  y trazas de  $SO_3$  a 242 °C y 3.5 [atm], mientras que la corriente de gases por la parte del domo, con una composición de  $N_2$ ,  $O_2$  y  $H_2O$  a 90 °C y 3.5 [atm]. Como bien se sabe las conversiones de las reacciones no ocurren al 100 %, debido a que son reacciones reversibles y el equilibrio se encuentra por debajo de esta cifra. Por lo que la simulación hecha en Aspen Plus nos dio un valor muy idealista de la reacción siendo que en la corriente de gases no se encuentran trazas de  $SO_3$ . Pero se considera que realmente deben salir máximo los 3 [kg/ton] de ácido como se consideró en la automatización.

Nombre de la corriente	4	AGUA	ACIDO	GASES
Substream: MIXED				
Mole Flow kmol/hr				
Nitrógeno	7900	0	1.05806	7898.942
Azufre	0	0	0	0
Dióxido de azufre	0	0	0	0
Trióxido de azufre	1000.028	0	1.76E-17	0
Ácido sulfúrico	0	0	1000.028	0
Oxígeno	599.9859	0	0.0817714	599.9041
Agua	0	3100	2.619709	2097.352
Cloruro de sodio	0	0	0	0
Total Flow (kmol/hr)	9500.014	3100	1003.788	10596.2
Total Flow (kg/hr)	320572	55847.37	98161.7	278257
Total Flow (l/min)	1212010	935.6157	1058.504	1503950
Temperature (°C)	100	24.08247	242.1443	90.08808
Pressure (bar)	4.053	4.053	3.546375	3.546375
Vapor Frac	1	0	0	1
Liquid Frac	0	1	1	0
Solid Frac	0	0	0	0
Enthalpy (cal/mol)	-9380.869	-68278.45	-183900	-10964.47
Enthalpy (cal/gm)	-277.9982	-3790.03	-1880.57	-417.5331
Enthalpy (cal/sec)	-24755000	-58795000	-51278000	-32273000
Entropy (cal/mol-K)	-2.020104	-39.01954	-77.00707	-1.775017
Entropy (cal/gm-K)	-0.0598649	-2.165914	-0.7874634	-0.0675936
Density (mol/cc)	0.0001306	0.0552221	0.0158051	0.0001174
Density (gm/cc)	0.0044083	0.9948416	1.545604	0.0030836
Average MW	33.74435	18.01528	97.79129	26.26012
Liq Vol 60F (l/min)	8288.952	932.5833	895.7842	8217.278

Tabla 5.6: Resultados de las corrientes participantes en la torre de absorción

## 5.2. Resultados de equipos de acondicionamiento

Ahora se presentan los resultados de los equipos que sirvieron de acondicionamiento a las corrientes de entrada a los equipos de proceso.

### 5.2.1. Intercambiador de calor tres (E-03)

El primer equipo de acondicionamiento es el intercambiador de calor que ocupa la energía calorífica transferida a la corriente de cloruro 2 para acondicionar el aire ambiente y como se observa en la Tabla[5.7] la corriente de aire sale a 120 °C y 1 [atm], mientras que la corriente del refrigerante entra a 560 °C y sale a 411 °C a 1 [atm] de presión.

Nombre de la corriente	AIREAMB	CLORURO2	CLORURO3	AIREE
Substream: MIXED				
Mole Flow kmol/hr				
Nitrógeno	7900	0	0	7900
Azufre	0	0	0	0
Dióxido de azufre	0	0	0	0
Trióxido de azufre	0	0	0	0
Ácido sulfúrico	0	0	0	0
Oxígeno	2100	0	0	2100
Agua	0	3750	3750	0
Cloruro de sodio	0	1250	1250	0
Total Flow (kmol/hr)	10000	5000	5000	10000
Total Flow (kg/hr)	288504	140610	140610	288504
Total Flow (l/min)	4050150	4270980	3503700	5376720
Temperature (°C)	23	559.7329	410.5917	120
Pressure (bar)	1.01325	1.01325	1.01325	1.01325
Vapor Frac	1	0.7497787	0.7492208	1
Liquid Frac	0	0.2502213	0.2507792	0
Solid Frac	0	0	0	0
Enthalpy (cal/mol)	-13.93473	-59704.77	-61060.93	664.1451
Enthalpy (cal/gm)	-0.4829997	-2123.057	-2171.281	23.02031
Enthalpy (cal/sec)	-38707.59	-82923000	-84807000	1844850
Entropy (cal/mol-K)	0.9737428	-0.3429406	-1.748339	2.953966
Entropy (cal/gm-K)	0.0337514	-0.0121947	-0.0621696	0.1023891
Density (mol/cc)	4.12E-05	1.95E-05	2.38E-05	3.10E-05
Density (gm/cc)	0.0011872	0.0005487	0.0006689	0.0008943
Average MW	28.8504	28.12208	28.12208	28.8504
Liq Vol 60F (l/min)	8926.3	1755.773	1755.773	8926.3

Tabla 5.7: Resultados de las corrientes participantes en el tercer intercambiador de calor

### 5.2.2. Compresor (C-01)

Una vez que se tiene el aire a 120 °C y 1 [atm], con ayuda de un compresor se le debe aumentar la presión a la corriente para que fluya en la dirección correcta hacia el horno y no viceversa por diferencia de presiones. Y como se muestra en la Tabla[5.8], la corriente aire1, que sale del compresor cuenta con una temperatura de 366 °C y 5 [atm].

Nombre de la corriente	AIREE	AIRE1
Substream: MIXED		
Mole Flow kmol/hr		
Nitrógeno	7900	7900
Azufre	0	0
Dióxido de azufre	0	0
Trióxido de azufre	0	0
Ácido sulfúrico	0	0
Oxígeno	2100	2100
Agua	0	0
Cloruro de sodio	0	0
Total Flow (kmol/hr)	10000	10000
Total Flow (kg/hr)	288504	288504
Total Flow (l/min)	5376720	1747960
Temperature (°C)	120	365.9098
Pressure (bar)	1.01325	5.06625
Vapor Frac	1	1
Liquid Frac	0	0
Solid Frac	0	0
Enthalpy (cal/mol)	664.1451	2427.662
Enthalpy (cal/gm)	23.02031	84.14658
Enthalpy (cal/sec)	1844850	6743510
Entropy (cal/mol-K)	2.953966	3.235241
Entropy (cal/gm-K)	0.1023891	0.1121385
Density (mol/cc)	3.10E-05	9.53E-05
Density (gm/cc)	0.0008943	0.0027509
Average MW	28.8504	28.8504
Liq Vol 60F (l/min)	8926.3	8926.3

Tabla 5.8: Resultados de las corrientes participantes en el compresor

### 5.2.3. Intercambiador de calor cuatro (E-04)

Posteriormente, dado que la corriente cloruro3 sigue teniendo bastante energía térmica, se vuelve a ocupar para calentar una corriente, que en este caso es la 1, correspondiente al azufre a 23 °C y 1 [atm]. Se observa en la Tabla[5.9] que la corriente 1A, de salida tiene 140 °C y 1 [atm], mientras que la corriente del refrigerante entra a 410 °C y sale a 379 °C y 1 [atm].

Nombre de la corriente	CLORURO3	1	1A	CLORURO4
Substream: MIXED				
Mole Flow kmol/hr				
Nitrógeno	0	0	0	0
Azufre	0	1000	1000	0
Dióxido de azufre	0	0	0	0
Trióxido de azufre	0	0	0	0
Ácido sulfúrico	0	0	0	0
Oxígeno	0	0	0	0
Agua	3750	0	0	3750
Cloruro de sodio	1250	0	0	1250
Total Flow (kmol/hr)	5000	1000	1000	5000
Total Flow (kg/hr)	140610	32066	32066	140610
Total Flow (l/min)	3503700	250.3681	266.1047	3342090
Temperature (°C)	410.5917	23	140	379.3185
Pressure (bar)	1.01325	1.01325	1.01325	1.01325
Vapor Frac	0.7492208	0	0	0.7489085
Liquid Frac	0.2507792	1	1	0.2510915
Solid Frac	0	0	0	0
Enthalpy (cal/mol)	-61060.93	62818.41	64208.15	-61338.88
Enthalpy (cal/gm)	-2171.281	1959.035	2002.375	-2181.165
Enthalpy (cal/sec)	-84807000	17449600	17835600	-85193000
Entropy (cal/mol-K)	-1.748339	52.8683	44.18753	-2.060335
Entropy (cal/gm-K)	-0.0621696	1.648734	1.378018	-0.0732639
Density (mol/cc)	2.38E-05	0.0665686	0.062632	2.49E-05
Density (gm/cc)	0.0006689	2.134591	2.008358	0.0007012
Average MW	28.12208	32.066	32.066	28.12208
Liq Vol 60F (l/min)	1755.773	290.3383	290.3383	1755.773

Tabla 5.9: Resultados de las corrientes participantes en el cuarto intercambiador de calor

### 5.2.4. Bomba dos (B-02)

Por último, ya que se tiene el azufre en 1A a 140 °C y 1 [atm], con ayuda de una bomba se le incrementa la presión, para que pueda entrar al horno. Por lo que como se muestra en la Tabla[5.10], la corriente 1B sale a 140 °C y 5 [atm].

Nombre de la corriente	1A	1B
Substream: MIXED		
Mole Flow kmol/hr		
Nitrógeno	0	0
Azufre	1000	1000
Dióxido de azufre	0	0
Trióxido de azufre	0	0
Ácido sulfúrico	0	0
Oxígeno	0	0
Agua	0	0
Cloruro de sodio	0	0
Total Flow (kmol/hr)	1000	1000
Total Flow (kg/hr)	32066	32066
Total Flow (l/min)	266.1047	266.128
Temperature (°C)	140	140.1609
Pressure (bar)	1.01325	5.06625
Vapor Frac	0	0
Liquid Frac	1	1
Solid Frac	0	0
Enthalpy (cal/mol)	64208.15	64209.87
Enthalpy (cal/gm)	2002.375	2002.428
Enthalpy (cal/sec)	17835600	17836100
Entropy (cal/mol-K)	44.18753	44.17885
Entropy (cal/gm-K)	1.378018	1.377748
Density (mol/cc)	0.062632	0.0626265
Density (gm/cc)	2.008358	2.008182
Average MW	32.066	32.066
Liq Vol 60F (l/min)	290.3383	290.3383

Tabla 5.10: Resultados de las corrientes participantes en la bomba suministradora de azufre

### 5.3. Resultados de la automatización

Después de colocar los sensores necesarios para la automatización descrita en el capítulo 4 y los lazos de control necesarios, el diagrama de tubería e instrumentación quedó como se muestra en la Figura[5.1]. Los sensores de presión se encuentran en color azul, los de temperatura en rojo, junto con sus lazos de control; los medidores de flujo con sus lazos de control son verdes y los analizadores con sus lazos de control y el desfogue en café.

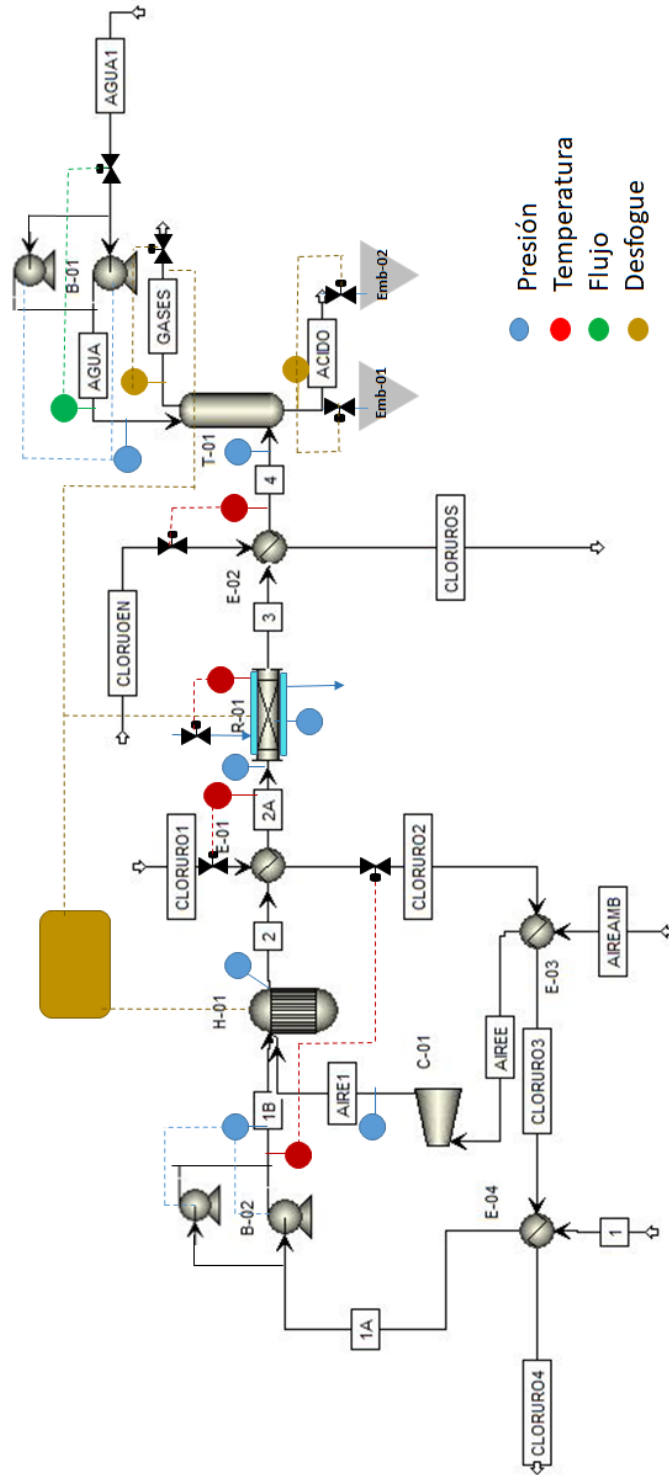


Figura 5.1: Diagrama de Tubería e Instrumentación DTI

Para hacer una aproximación de la inversión inicial del proyecto desarrollado en esta tesis se ocupa la Figura[5.2] considerando una producción de 2355.88 [Ton/día] de ácido sulfúrico, se localiza dicho valor en el eje de las abscisas, se desplaza hasta tocar la curva del valor más alto y sobre ese punto se traslada al eje de las ordenadas; lo cual da un aproximado de \$100 dólares por tonelada lo que equivale a \$235, 588 dólares, eso en el año 2012 por lo que se ocupan los valores del Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI) del año 2012 y los más actuales reportados en la Chemical Engineering [13]. Se dividen para obtener el factor por el que se multiplica el precio del 2012 de la siguiente manera:

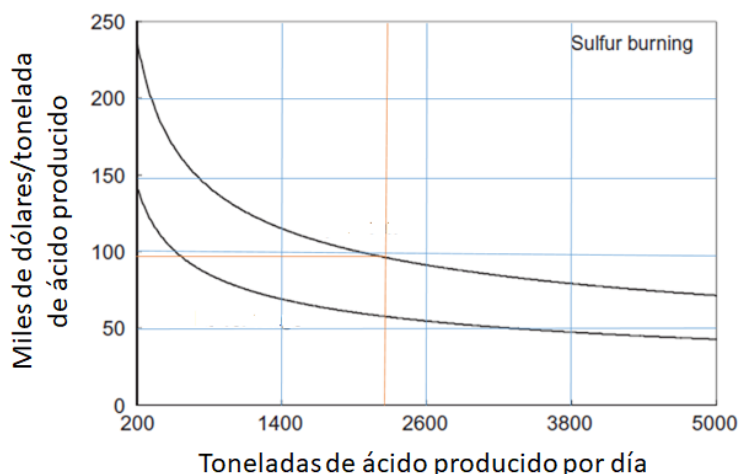
$$\frac{CEPCI \ 2018}{CEPCI \ 2012} = \frac{603.1}{584.6} = 1.032 \quad (5.1)$$

Por lo que, solamente considerando equipos y corrientes de proceso, es decir sin la parte de automatización, queda de:

$$1.032 * 235588 = 243126.8 \text{ dólares} \quad (5.2)$$

Para obtener una mejor aproximación, se le aumenta un 30% [14] de lo anterior, lo cual corresponde a la parte de automatización con su respectiva instrumentación y parte eléctrica, quedando una inversión de:

$$243126.8(1.30) = 316064.84 \text{ dólares} \quad (5.3)$$



**Figura 5.2:** Inversión inicial

# Conclusiones

---

*“Nunca escribo mi nombre en los libros  
que compro hasta después de haberlos  
leído, porque sólo entonces puedo  
llamarlos míos.”*

---

-Carlo Dossi-

En este trabajo se diseñó una planta de ácido sulfúrico por el método de contacto, desde la recepción del azufre elemental, la obtención del dióxido de azufre hasta el envasamiento del ácido producido con una concentración del 98 %. Asimismo, se logró diseñar la automatización de los equipos de proceso para asegurar una buena calidad del producto y tener una buena operación de la planta que permita el buen funcionamiento de los equipos para así, asegurar la integridad de los operadores con medidas de prevención ante cambios drásticos en el proceso.

Además se observó que Aspen Plus sirve como buena aproximación de las plantas, pero no es definitiva, debido a que el diseño que se llevó a cabo fue muy ideal, cuando se sabe bien que en la realidad no se obtienen conversiones del 100 %, siempre quedan trazas remanentes de los reactivos utilizados.

Igualmente es importante resaltar que se consideró la automatización de la planta, para mantener un estricto control de las variables de proceso, que en este caso fueron temperatura, presión y composición química, con lo cual se asegura una buena calidad del producto resultante y la seguridad en la ejecución del proceso tanto para los equipos, como para el personal involucrado.



---

Aunado a lo anterior, se corroboró que todos los conocimientos adquiridos durante mi formación como Ingeniera Química son fundamentales para ejercer como profesionista, y que el trato con profesionistas, como lo fueron mis profesores, enriqueció aún más mi formación gracias a las experiencias compartidas durante las clases.

# Anexo I. Ficha Internacional de Seguridad Química

---

Las fichas internacionales de seguridad química son hojas de datos destinadas a proporcionar información esencial sobre seguridad y salud en la utilización de productos químicos de una manera clara y concisa. Dichas son elaboradas por el International Chemical Safety Cards, que es una empresa formada por la Organización Mundial de la Salud, la Organización Internacional del Trabajo y con el apoyo de la Comisión Europea. El objetivo principal de las fichas es promover el uso seguro de los productos químicos en el lugar de trabajo y los destinatarios principales son, por lo tanto los trabajadores, así como los responsables de la seguridad y salud en el trabajo.

A continuación se presenta la ficha correspondiente al ácido sulfúrico.

ÁCIDO SULFÚRICO

ICSC: 0362

Febrero 2000

CAS: 7664-93-9      Ácido sulfúrico 100%  
 RTECS: WS5600000      Aceite de vitriolo  
 NU: 1830      H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>  
 CE Índice Anexo I: 016-020-00-8      Masa molecular: 98.1  
 CE / EINECS: 231-639-5



TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN	PELIGROS AGUDOS / SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS
<b>INCENDIO</b>	No combustible. Muchas reacciones pueden producir incendio o explosión. En caso de incendio se desprenden humos (o gases) tóxicos e irritantes.	NO poner en contacto con sustancias inflamables. NO poner en contacto con combustibles.	NO utilizar agua. En caso de incendio en el entorno: polvo, espuma, dióxido de carbono.
<b>EXPLOSIÓN</b>	Riesgo de incendio y explosión en contacto con bases, sustancias combustibles, oxidantes, agentes reductores o agua.		En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua pero NO en contacto directo con agua.
<b>EXPOSICIÓN</b>		<b>¡EVITAR LA FORMACIÓN DE NIEBLAS DEL PRODUCTO! ¡EVITAR TODO CONTACTO!</b>	<b>¡CONSULTAR AL MÉDICO EN TODOS LOS CASOS!</b>
<b>Inhalación</b>	Corrosivo. Sensación de quemazón. Dolor de garganta. Tos. Dificultad respiratoria. Jadeo. Síntomas no inmediatos (ver Notas).	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo. Posición de semiincorporado. Respiración artificial si estuviera indicada. Proporcionar asistencia médica.
<b>Piel</b>	Corrosivo. Enrojecimiento. Dolor. Ampollas. Quemaduras cutáneas graves.	Guantes de protección. Traje de protección.	Quitar las ropas contaminadas. Aclarar la piel con agua abundante o ducharse. Proporcionar asistencia médica.
<b>Ojos</b>	Corrosivo. Enrojecimiento. Dolor. Quemaduras profundas graves.	Pantalla facial o protección ocular combinada con protección respiratoria.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
<b>Ingestión</b>	Corrosivo. Dolor abdominal. Sensación de quemazón. Shock o colapso.	No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	Enjuagar la boca. NO provocar el vómito. Proporcionar asistencia médica.

DERRAMES Y FUGAS	ENVASADO Y ETIQUETADO
Consultar a un experto. ¡Evacuar la zona de peligro! NO absorber en serrín u otros absorbentes combustibles. Protección personal adicional: traje de protección completo incluyendo equipo autónomo de respiración. NO permitir que este producto químico se incorpore al ambiente.	Envase irrompible; colocar el envase frágil dentro de un recipiente irrompible cerrado. No transportar con alimentos y piensos. Clasificación UE Símbolo: C R: 35 S: (1/2-)26-30-45 Nota: B Clasificación NU Clasificación de Peligros NU: 8 Grupo de Envasado NU: II

RESPUESTA DE EMERGENCIA	ALMACENAMIENTO
Ficha de Emergencia de Transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-80S1830 o 80GC1-II+III Código NFPA: H3; F0; R2; W	Separado de sustancias combustibles y reductoras, oxidantes fuertes, bases fuertes, alimentos y piensos, materiales incompatibles. Ver Peligros Químicos. Puede ser almacenado en contenedores de acero inoxidable. Almacenar en un área con suelo de hormigón resistente a la corrosión.

Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © CE, IPCS, 2005



IPCS  
International  
Programme on  
Chemical Safety



WHO



ILO



UNEP





MINISTERIO DE TRABAJO E INMIGRACIÓN



INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO

## ÁCIDO SULFÚRICO

ICSC: 0362

## DATOS IMPORTANTES

## ESTADO FÍSICO; ASPECTO

Líquido higroscópico incoloro, aceitoso e inodoro.

## PELIGROS QUÍMICOS

La sustancia es un oxidante fuerte y reacciona violentamente con materiales combustibles y reductores. La sustancia es un ácido fuerte, reacciona violentamente con bases y es corrosiva para la mayoría de metales más comunes, originando hidrógeno (gas inflamable y explosivo- ver ICSC 0001). Reacciona violentamente con agua y compuestos orgánicos con desprendimiento de calor (véanse Notas). Al calentar se forman humos (o gases) irritantes o tóxicos (óxido de azufre).

## LÍMITES DE EXPOSICIÓN

TLV: 0.2 mg/m<sup>3</sup>, Fracción torácica, A2 (sospechoso de ser cancerígeno humano); (ácido sulfúrico contenido en las nieblas de ácidos inorgánicos fuertes) (ACGIH 2005).  
MAK: (Fracción inhalable) 0.1 mg/m<sup>3</sup>; Categoría de limitación de pico: I(1); Cancerígeno: categoría 4; Riesgo para el embarazo: grupo C (DFG 2004).

## VÍAS DE EXPOSICIÓN

La sustancia se puede absorber por inhalación del aerosol y por ingestión.

## RIESGO DE INHALACIÓN

La evaporación a 20°C es despreciable; sin embargo, se puede alcanzar rápidamente una concentración nociva de partículas en el aire por pulverización.

## EFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN

Corrosivo. La sustancia es muy corrosiva para los ojos, la piel y el tracto respiratorio. Corrosivo por ingestión. La inhalación del aerosol de esta sustancia puede originar edema pulmonar (ver Notas).

## EFECTOS DE EXPOSICIÓN PROLONGADA O REPETIDA

Los pulmones pueden resultar afectados por la exposición prolongada o repetida al aerosol de esta sustancia. Si las exposiciones al aerosol de esta sustancia son repetidas o prolongadas existe el riesgo de presentar erosiones dentales. Las nieblas de ácidos inorgánicos fuertes que contengan esta sustancia son carcinógenas para los seres humanos.

## PROPIEDADES FÍSICAS

Punto de ebullición (se descompone): 340°C  
Punto de fusión: 10°C  
Densidad relativa (agua = 1): 1.8  
Solubilidad en agua: miscible  
Presión de vapor, kPa a 146°C: 0.13  
Densidad relativa de vapor (aire = 1): 3.4

## DATOS AMBIENTALES

La sustancia es nociva para los organismos acuáticos.

## NOTAS

Los síntomas del edema pulmonar no se ponen de manifiesto, a menudo, hasta pasadas algunas horas y se agravan por el esfuerzo físico. Reposo y vigilancia médica son, por ello, imprescindibles. NO verter NUNCA agua sobre esta sustancia; cuando se deba disolver o diluir, añadirla al agua siempre lentamente. Otros números NU: UN1831 Ácido sulfúrico fumante, clase de peligro 8, riesgo subsidiario 6.1, grupo de envasado I; UN1832 Ácido sulfúrico agotado, clase de peligro 8, grupo de envasado II. Esta ficha ha sido parcialmente actualizada en octubre de 2005, ver Límites de exposición, Respuesta de Emergencia, y en enero de 2008: ver Lucha contra incendios.

## INFORMACIÓN ADICIONAL

Límites de exposición profesional (INSHT 2014):

VLA-ED (niebla): 0,05 mg/m<sup>3</sup>

Notas: al seleccionar un método adecuado de control de la exposición, deben tomarse en consideración posibles limitaciones e interferencias que pueden surgir en presencia de otros compuestos de azufre. Agente químico que tiene un valor límite indicativo por la UE. Esta sustancia tiene prohibida total o parcialmente su comercialización y uso como fitosanitario y/o biocida. Véase UNE EN 481: "Atmósferas en los puestos de trabajo; Definición de las fracciones por el tamaño de las partículas para la medición de aerosoles".

## NOTA LEGAL

Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el IPCS, sus representantes o el INSHT, autor de la versión española.

---

Apéndices B

**Anexo II.**

**NOM-039-SEMARNAT-1993**

---

# SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

## **NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-039-SEMARNAT-1993 QUE ESTABLECE LOS NIVELES MÁXIMOS PERMISIBLES DE EMISIÓN A LA ATMÓSFERA DE BIÓXIDO Y TRIÓXIDO DE AZUFRE Y NEBLINAS DE ÁCIDO SULFÚRICO, EN PLANTAS PRODUCTORAS DE ÁCIDO SULFÚRICO.**

**CON BASE EN EL ACUERDO POR EL CUAL SE REFORMA LA NOMENCLATURA DE LAS NORMAS OFICIALES MEXICANAS EXPEDIDAS POR LA SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, ASÍ COMO LA RATIFICACIÓN DE LAS MISMAS PREVIA A SU REVISIÓN QUINQUENAL, PUBLICADO EN EL DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN EL 23 DE ABRIL DE 2003.**

**SERGIO REYES LUJAN**, Presidente del Instituto Nacional de Ecología con fundamento en los artículos 32 fracción XXV de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; 5o. fracción VIII, 8o. fracciones II y VII, 36, 37, 43, 110, 111 fracciones I y IV, 113, 160 y 171 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente; 7o. fracciones II y IV, y 16 del Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera; 38 fracción II, 40 fracción X, 41, 43, 46, 47, 52, 62, 63 y 64 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización; Primero y Segundo del Acuerdo por el que se delega en el Subsecretario de Vivienda y Bienes Inmuebles y en el Presidente del Instituto Nacional de Ecología, la facultad de expedir las normas oficiales mexicanas en materia de vivienda y ecología, respectivamente, **y ¡Error! Marcador no definido.**

### **CONSIDERANDO**

Que las plantas productoras de ácido sulfúrico generan emisiones a la atmósfera de bióxido y trióxido de azufre y neblinas de ácido sulfúrico que deterioran la calidad del aire, por lo que es necesario su control a través del establecimiento de niveles máximos permisibles de emisión que aseguren la preservación del equilibrio ecológico y la protección al ambiente.

Que habiéndose cumplido el procedimiento establecido en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización para la elaboración de proyectos de normas oficiales mexicanas, el C. Presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Protección Ambiental ordenó la publicación del proyecto de norma oficial mexicana NOM-PA-CCAT-001/93, que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de bióxido y trióxido de azufre y neblinas de ácido sulfúrico, en plantas productoras de ácido sulfúrico, publicado en el Diario Oficial de la Federación el día 23 de junio de 1993 con el objeto de que los interesados presentaran sus comentarios al citado Comité Consultivo.

Que la Comisión Nacional de Normalización determinó en sesión de fecha 1º de julio de 1993, la sustitución de la clave **NOM-PA-CCAT-001/93**, con que fue publicado el proyecto de la presente norma oficial mexicana, por la clave **NOM-039-ECOL-1993**, que en lo subsecuente la identificará.

Que durante el plazo de noventa días naturales contados a partir de la fecha de publicación de dicho proyecto de norma oficial mexicana, los análisis a los que se refiere el artículo 45 del citado ordenamiento jurídico, estuvieron a disposición del público para su consulta.

Que dentro del mismo plazo, los interesados presentaron sus comentarios al proyecto de norma, los cuales fueron analizados en el citado Comité Consultivo Nacional de Normalización, realizándose las modificaciones procedentes. La Secretaría de Desarrollo Social, por conducto del Instituto Nacional de Ecología, publicó las respuestas a los comentarios recibidos en la Gaceta Ecológica, Volumen V, número especial de octubre de 1993.

Que mediante oficio de fecha 7 de octubre de 1993, la Secretaría de Salud expresó su conformidad con el contenido y expedición de la presente norma oficial mexicana.

Que previa aprobación del Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Protección Ambiental, en sesión de fecha 23 de septiembre de 1993, he tenido a bien expedir la siguiente

**NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-039-ECOL-1993, QUE ESTABLECE LOS NIVELES MAXIMOS PERMISIBLES DE EMISION A LA ATMOSFERA DE BIOXIDO Y TRIOXIDO DE AZUFRE Y NEBLINAS DE ACIDO SULFURICO, EN PLANTAS PRODUCTORAS DE ACIDO SULFURICO.**

**PREFACIO**

**En la elaboración de esta norma oficial mexicana participaron:**

- **SECRETARIA DE DESARROLLO SOCIAL**
  - . Instituto Nacional de Ecología
  - . Procuraduría Federal de Protección al Ambiente
- **SECRETARIA DE ENERGIA, MINAS E INDUSTRIA PARAESTATAL**
  - . Subsecretaría de Energía
- **SECRETARIA DE SALUD**
  - . Dirección General de Salud Ambiental
- **DEPARTAMENTO DEL DISTRITO FEDERAL**
  - . Dirección General de Proyectos Ambientales
- **GOBIERNO DEL ESTADO DE MEXICO**
  - . Secretaría de Ecología

- **PETROLEOS MEXICANOS**
- . Auditoría de Seguridad Industrial, Protección Ambiental y Ahorro de Energía
- . Gerencia de Protección Ambiental y Ahorro de Energía
- . Pemex-Gas y Petroquímica Básica
- . Gerencia de Seguridad Industrial y Protección Ambiental
  
- **COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD**
- . Gerencia de Protección Ambiental
  
- **ASOCIACION MEXICANA DE LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ, A.C.**
  
- **ASOCIACION NACIONAL DE LA INDUSTRIA QUIMICA, A. C.**
  
- **CAMARA MINERA DE MEXICO**
  
- **CAMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA DE ACEITES, GRASAS Y JABONES**
  
- **CAMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA DE LA TRANSFORMACION**
  
- **CONFEDERACION PATRONAL DE LA REPUBLICA MEXICANA**
  
- **INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**
  
- **LABORATORIOS NACIONALES DE FOMENTO INDUSTRIAL**
  
- **PINTURAS DE LERAPLAS, S.A.**
  
- **PROCTER & GAMBLE, S.A. DE C.V.**

## **1. OBJETO**

Esta norma oficial mexicana establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de bióxido y trióxido de azufre y neblinas de ácido sulfúrico en plantas productoras de ácido sulfúrico.

## **2. CAMPO DE APLICACION**

Esta norma oficial mexicana es de observancia obligatoria en plantas productoras de ácido sulfúrico.

## **3. REFERENCIAS**

NMX-AA-09 Determinación del flujo de gases en un conducto por medio del tubo pitot.



- NMX-AA-10 Determinación de la emisión de partículas sólidas contenidas en los gases que se descargan por un conducto.
- NMX-AA-23 Terminología.
- NMX-AA-54 Determinación del contenido de humedad en los gases que fluyen por un conducto.
- NMX-AA-55 Determinación de bióxido de azufre en gases que fluyen por un conducto.
- NMX-AA-56 Determinación de bióxido de azufre, trióxido de azufre y neblinas de ácido sulfúrico en los gases que fluyen por un conducto.

## **4. DEFINICIONES**

### **4.1** Altura efectiva de chimenea

La altura resultante de sumar a la altura física de la chimenea, la sobreelevación causada por la velocidad y temperatura de los gases a la salida de la chimenea.

### **4.2** Eficiencia de conversión

La cantidad de bióxido de azufre que se convierte en trióxido, expresada en por ciento

### **4.3** Estabilidad atmosférica

La condición meteorológica directamente influida por la velocidad del viento y de los movimientos convectivos y que da idea de los movimientos convectivos y advectivos del aire.

### **4.4** Neblinas de ácido sulfúrico

Las partículas líquidas finas de ácido sulfúrico que salen mezcladas con los gases residuales provenientes de los procesos de elaboración de ácido sulfúrico.

### **4.5** Planta de ácido sulfúrico

La unidad en donde se produce ácido sulfúrico por proceso de contacto a partir de la combustión de azufre elemental, ácido sulfhídrico, sulfuros orgánicos, mercaptanos o corrientes ácidas, pero no incluye instalaciones en donde para la conversión de ácido sulfúrico se utilice dióxido de azufre como materia prima para prevenir emisiones a la atmósfera.

### **4.6** Planta nueva

La que instale por vez primera en procesos de conversión.

### **4.7** Zona Fronteriza Norte

La franja de 100 kilómetros de ancho comprendida en el territorio nacional, medida a partir de la línea divisoria terrestre entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América.

#### 4.8 Zona Metropolitana de la Ciudad de Guadalajara

El área integrada por los siguientes municipios del Estado de Jalisco: Guadalajara, Ixtlahuacán del Río, Tlaquepaque, Tonalá, Zapotlanejo y Zapopan.

#### 4.9 Zona Metropolitana de la Ciudad de México

El área integrada por las 16 Delegaciones Políticas del Distrito Federal y los siguientes 17 municipios del Estado de México: Atizapán de Zaragoza, Coacalco, Cuautitlán de Romero Rubio, Cuautitlán Izcalli, Chalco de Covarrubias, Chimalhuacán, Ecatepec, Huixquilucan, Ixtapaluca, La Paz, Naucalpan de Juárez, Nezahualcóyotl, San Vicente Chicoloapan, Nicolás Romero, Tecámac, Tlalnepantla y Tultitlán.

#### 4.10 Zona Metropolitana de la Ciudad de Monterrey

El área integrada por los siguientes municipios del Estado de Nuevo León: Monterrey, Apodaca, General Escobedo, Guadalupe, San Nicolás de los Garza, San Pedro Garza García, Santa Catarina y Juárez.

### 5. ESPECIFICACIONES

5.1 Para efectos de esta norma se consideran zonas críticas por las altas concentraciones de contaminantes de la atmósfera que registran, las siguientes:

5.1.1 Las Zonas Metropolitanas de la Ciudad de México, Monterrey y Guadalajara, los centros de población de Coatzacoalcos-Minatitlán, Estado de Veracruz; Irapuato-Celaya-Salamanca, Estado de Guanajuato; Tula-Vito-Apasco, Estados de Hidalgo y de México; Corredor Industrial de Tampico-Madero-Altamira, Estado de Tamaulipas y la zona fronteriza norte.

5.2 Los niveles máximos permisibles de emisión de bióxido y trióxido de azufre a la atmósfera, provenientes de las plantas productoras de ácido sulfúrico existentes son las establecidas en las tablas 1 y 2 de esta norma.

**Tabla 1**

Niveles máximos permisibles para plantas productoras de ácido sulfúrico existentes ubicadas en zonas críticas

<b>iError! Marcador no definido.</b> Capacidad de la planta (ton/día)	Niveles máximos permisibles (kg de bióxido de azufre/ton de ácido sulfúrico al 100%)
---	--

1 - 500	17.5
501 - 700	13.0
701 - 1000	9.0
> 1000	4.0

**Tabla 2**

Niveles máximos permisibles para plantas productoras de ácido sulfúrico existentes ubicadas en el resto del país.

<b>iError! Marcador no definido.</b> Capacidad de la planta (ton/día)	Niveles máximos permisibles (kg de bióxido de azufre/ton de ácido sulfúrico al 100%)
1 - 500	28.0
501 - 700	20.0
701 - 1000	14.0
> 1000	7.0

**5.2.1** Los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera dentro del límite del predio deben ser inferiores a 0.234 ppm de SO<sub>2</sub> para las zonas críticas y 0.3 ppm de SO<sub>2</sub> para el resto del país, ambas concentraciones referidas en promedio horario y aplicables para cualquier época del año. Las mediciones para determinar su concentración deben realizarse a partir del límite exterior del predio ocupado por la planta, de conformidad con el método aplicable.

**5.3** Los niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre provenientes de plantas nuevas elaboradoras de ácido sulfúrico, son los establecidos en la tabla 3.

**Tabla 3**

Niveles máximos permisibles para plantas nuevas  
elaboradoras de ácido sulfúrico

<b>iError! Marcador no definido.</b> Capacidad de la planta (ton/día)	Niveles máximos permisibles (kg de bióxido de azufre/ton de ácido sulfúrico al 100%)
1 - 500	13.0
> 500	3.0

--	--

**5.4** El nivel máximo permisible de neblinas de trióxido de azufre y ácido sulfúrico, expresada como ácido sulfúrico al 100% en plantas productoras de ácido sulfúrico, será siempre inferior al uno por mil sobre el volumen de producción.

## **6. VIGILANCIA**

**6.1** La Secretaría de Desarrollo Social por conducto de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, es la autoridad competente para vigilar el cumplimiento de la presente norma oficial mexicana.

## **7. SANCIONES**

**7.1** El incumplimiento de la presente norma oficial mexicana será sancionado conforme a lo dispuesto por la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, su Reglamento en materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera y demás ordenamientos jurídicos aplicables.

## **8. BIBLIOGRAFIA**

**8.1.** Code of Federal Regulations 40, Parts 53 to 60, revised July 1990, U.S.A. (Código Federal de Regulaciones 40, partes 53 a 60, revisado en julio de 1990. Estados Unidos de América).

## **9. CONCORDANCIA CON NORMAS INTERNACIONALES**

**9.1** Esta norma oficial mexicana no coincide con ninguna norma internacional.

## **10. VIGENCIA**

**10.1** La presente norma oficial mexicana entrará en vigor al día siguiente de su publicación en el Diario Oficial de la Federación.

**10.2** Se abroga el Acuerdo por el que se expidió la norma técnica ecológica NTE-CCAT-001/88, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 6 de junio de 1988.

Dada en la ciudad de México, Distrito Federal, a los dieciocho días de octubre de mil novecientos noventa y tres.

**Anexo III. Hoja Técnica Básica  
del Controllogix**

---

# Controladores programables de automatización ControlLogix



1756-L71, L72, L73, L74, L75

La última adición a la familia de controladores ControlLogix® está diseñada para brindar un mayor rendimiento. Los nuevos controladores proporcionan la memoria, velocidad y capacidad de procesamiento para satisfacer las demandas tanto de las aplicaciones básicas de planta hasta las aplicaciones de proceso y movimiento de alto rendimiento.

Como parte del sistema de Arquitectura Integrada™ de Rockwell Automation, estos nuevos controladores utilizan el mismo software de programación, protocolo de red y capacidades de información que los controladores ControlLogix L6, proporcionando un motor de control común con un entorno homogéneo de desarrollo para todas las disciplinas de control.

## Revestimiento de conformación

Existen productos selectos disponibles con revestimiento de conformación para ayudar a proteger los componentes y extender la vida útil del producto en los siguientes entornos:

- ANSI/ISA-71.04.2013; entornos con clase de contaminación G3 Grupo hostil A (probado según el equivalente de 10 años)
- Áreas de alta humedad y corrosivas
- Entornos contaminados con sal y niebla salina
- Atmósferas de productos químicos y vapores agresivos
- Áreas con ambientes sensibles y abrasivos
- Entornos marinos y mar adentro

*Los productos no disponibles con revestimiento estándar pueden pedirse como productos con revestimiento personalizado.*



## Rendimiento mejorado

Dependiendo de su aplicación, usted evalúa el rendimiento mediante diferentes criterios. Los controladores ControlLogix 1756-L7 ofrecen mejoras específicas para aplicaciones específicas.

**Para aplicaciones de proceso**, los controladores ControlLogix mejoran significativamente la cantidad de información que puede intercambiarse entre las capas de control y de supervisión, y ofrecen una mejora significativa en el rendimiento de aplicaciones de control redundante. Los controladores 1756-L7 también ofrecen mayor capacidad y permiten ejecutar más estrategias de control en cada tarea.

**Para aplicaciones de movimiento**, los controladores 1756-L7 proporcionan comando de movimiento de alta velocidad y ejecución de planificador de trayectoria de ejes, lo cual hace que sean la solución ideal para aplicaciones de movimiento complejas de alto rendimiento. Los controladores han sido optimizados para control de variadores de movimiento de alto rendimiento en EtherNet/IP o interface SERCOS™ y pueden aceptar hasta 100 ejes.

**Para aplicaciones discretas**, los nuevos controladores ControlLogix mejoran significativamente los tiempos de escán del controlador mediante una nueva CPU personalizada y más rápida de doble núcleo. Ofrecen mejores velocidades de comunicación para los módulos de comunicación Ethernet de Rockwell Automation® y proporcionan una carga cruzada más rápida para sistemas redundantes.

LISTEN.  
THINK.  
SOLVE.®

## Opciones de memoria

Los controladores ControlLogix utilizan tecnología de memoria SDRAM mejorada y están disponibles en los siguientes tamaños fijos de memoria: 2 Mb (1756-L71), 4 Mb (1756-L72), 8 Mb (1756-L73), 16 Mb (1756-L74) y 32 Mb (1756-L75).

La memoria no volátil Secure Digital extraíble opcional proporciona lecturas y escrituras más rápidas y mayor integridad de datos que la tecnología previa CompactFlash, y actualmente está clasificada para uso en aplicaciones SIL 2. Se incluye una tarjeta Secure Digital (SD) de 1 Gb con cada controlador 1756-L7.

## Capacidades de alimentación eléctrica y diagnósticos

Con el lanzamiento de estos controladores, también introducimos el módulo de almacenamiento de energía (ESM), el cual se envía con cada controlador. El ESM elimina la necesidad de baterías de litio así como los problemas de mantenimiento y medioambientales asociados con el transporte y el desecho de las baterías de litio.

Los nuevos controladores también cuentan con una pantalla incorporada que proporciona diagnósticos mejorados del controlador e información en tiempo real.

## Estándares sobre clases de contaminación

### Productos estándar

Los productos estándar de Allen-Bradley cumplen o exceden los requisitos de:


- ANSI/ISA 71.04.2013 G2 sobre el medio ambiente

### Productos con revestimiento de conformación

Los productos con revestimiento de conformación de Allen-Bradley cumplen o exceden los requisitos de:

- ANSI/ISA 71.04.2013 G3 sobre el medio ambiente (exposición de 10 años)
- IEC 61086-3-1 Clase 2
- IPC-CC-830
- MIL-I-46058C
- EN600068-2-52, prueba de niebla salina, nivel de severidad

## Especificaciones ambientales y homologaciones

Temperatura	<b>De funcionamiento:</b> 0 – 60 °C (33 – 140 °F) <b>De almacenamiento:</b> –40 – 85 °C (–40 – 185 °F)
Humedad relativa	5 – 95% sin condensación
Vibración	2 g a 10 – 500 Hz
Choque	<b>De funcionamiento:</b> 30 g <b>Fuera de operación:</b> 50 g
Homologaciones	UL, ULH, c-UL-us, cULH, CE, ATEX, AUSTRALIA, COREA, MARÍTIMAS, RUSAS <i>Para obtener más detalles y una lista completa de las homologaciones de productos, visite <a href="http://www.ab.com">www.ab.com</a>.</i> 

## Información adicional

La lista más actualizada de productos con revestimiento de conformación puede encontrarse [aquí](#), o comuníquese con su distribuidor local o con la oficina de ventas de Rockwell Automation.

ControlLogix, Integrated Architecture y SERCOS son marcas registradas de Rockwell Automation, Inc. EtherNet/IP es una marca comercial de ODVA. Las marcas comerciales que no pertenecen a Rockwell Automation son propiedad de sus respectivas compañías.

[www.rockwellautomation.com](http://www.rockwellautomation.com)

### Oficinas corporativas de soluciones de potencia, control e información

Américas: Rockwell Automation, 1201 South Second Street, Milwaukee, WI 53204-2496 USA, Tel: (1) 414.382.2000, Fax: (1) 414.382.4444

Europa/Medio Oriente/África: Rockwell Automation NV, Pegasus Park, De Kleetlaan 12a, 1831 Diegem, Bélgica, Tel: (32) 2 663 0600, Fax: (32) 2 663 0640

Asia-Pacífico: Rockwell Automation, Level 14, Core F, Cyberport 3, 100 Cyberport Road, Hong Kong, Tel: (852) 2887 4788, Fax: (852) 2508 1846

Argentina: Rockwell Automation S.A., Alem 1050, 5° Piso, CP 1001AAS, Capital Federal, Buenos Aires, Tel.: (54) 11.5554.4000, Fax: (54) 11.5554.4040, [www.rockwellautomation.com.ar](http://www.rockwellautomation.com.ar)

Chile: Rockwell Automation Chile S.A., Luis Thayer Ojeda 166, Piso 6, Providencia, Santiago, Tel.: (56) 2.290.0700, Fax: (56) 2.290.0707, [www.rockwellautomation.cl](http://www.rockwellautomation.cl)

Colombia: Rockwell Automation S.A., Edf. North Point, Carrera 7 N° 156 – 78 Piso 18, PBX: (57) 1.649.96.00 Fax: (57)649.96.15, [www.rockwellautomation.com.co](http://www.rockwellautomation.com.co)

España: Rockwell Automation S.A., C/ Josep Pla, 101-105, 08019 Barcelona, Tel.: (34) 932.959.000, Fax: (34) 932.959.001, [www.rockwellautomation.es](http://www.rockwellautomation.es)

México: Rockwell Automation S.A. de C.V., Bosques de Cierulos N° 160, Col. Bosques de Las Lomas, C.P. 11700 México, D.F., Tel.: (52) 55.5246.2000, Fax: (52) 55.5251.1169, [www.rockwellautomation.com](http://www.rockwellautomation.com)

Perú: Rockwell Automation S.A., Av Victor Andrés Belaunde N°147, Torre 12, Of. 102 – San Isidro Lima, Perú, Tel: (511) 441.59.00, Fax: (511) 222.29.87, [www.rockwellautomation.com.pe](http://www.rockwellautomation.com.pe)

Puerto Rico: Rockwell Automation Inc., Calle 1, Metro Office # 6, Suite 304, Metro Office Park, Guaynabo, Puerto Rico 00968, Tel.: (1) 787.300.6200, Fax: (1) 787.706.3939, [www.rockwellautomation.com.pr](http://www.rockwellautomation.com.pr)

Venezuela: Rockwell Automation S.A., Edf. Allen-Bradley, Av. González Rincones, Zona Industrial La Trinidad, Caracas 1080, Tel.: (58) 212.949.0611, Fax: (58) 212.943.3955, [www.rockwellautomation.com.ve](http://www.rockwellautomation.com.ve)

# Bibliografía

---

- [1] ANIQ. **Anuario estadístico de la industria química mexicana, Capítulo 8.** url<https://s3.amazonaws.com/online.anyflip.com/iwof/sqns/mobile/index.html>, 2018. 1
- [2] VARIOS AUTORES. **Trade Map, International Trade Statistics, Producto 2811: Ácidos inorgánicos.** url<https://www.trademap.org/tradestat/CountrySelProductTs.aspx?nvpm>, 2018.2
- [3] DATA RESEARCH ANALYST. **Industrial applications of sulfuric acid.** url<https://www.worldofchemicals.com/430/chemistry-articles/industrial-applications-of-sulfuric-acid.html>, 2019. 5
- [4] MANUEL CASTILLO. **Evolución histórica de las teorías de preparación del ácido sulfúrico.** *Revista de la sociedad española de historia de las ciencias y de las técnicas*, 1992. 6
- [5] **Producción de ácido sulfúrico.** url<https://www.ingenieriaquimica.net/articulos/398-produccion-de-acido-sulfurico-i>, 2017. 7
- [6] WILLIAM G. DAVENPORT Y MICHAEL S. MOATS MATTHEW J. KING. *Sulfuric acid manufacture, Analysis, control and optimization.* Elsevier, 2013. 8, 9, 22
- [7] SIR ERNEST COOK. **Peregrine Phillips, the inventor of contact process for sulfuric acid.** *Nature*, 1926. 8
- [8] PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. *Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos, Guía del PMBOK.* Project Management Institute, 2013. 12
- [9] JESHUA PEREA CONSTANTINO. **Neumática.** 2019. 17
- [10] JESHUA PEREA CONSTANTINO. *Controladores Lógicos Programables.* Laboratorio de automatización industrial, DIMEI, 2019. 19
- [11] JESHUA PEREA CONSTANTINO. **Electroneumática.** 2019. 21
- [12] MAURICIO E. ROBLEDO BARRIOS Y CÉSAR A. RUEDA DURÁN LEDA PERNETT BOLAÑO, IVÁN A. OCHOA MARTÍNEZ. **Modelamiento y simulación de un reactor catalítico para la oxidación de  $SO_2$  a  $SO_3$ , utilizando  $V_2O_5$  como catalizador.** *Prospect*, 14(1):39–46, 2016. 25
- [13] **Plant Cost Index, Annual Value. 2012, 2018.** 58
- [14] MAX S. PETERS AND KLAUS D. TIMMERHAUS. *Plant Design and Economics For Chemical Engineers.* McGraw-Hill, Chemical Engineering Series, 1991. 58