

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO  
ABAD DEL CUSCO  
FACULTAD DE INGENIERIA DE PROCESOS  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA QUIMICA**



**INFORME TECNICO**

**PROCESO PRODUCTIVO DE EMULSION DE NITRATO DE AMONIO EN LA  
EMPRESA INDUSTRIAS CACHIMAYO S.A. - ENAEX**

**PRESENTADO POR:**

- Br. RICHELL TAIPE GUTIERREZ

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO QUÍMICO EN LA MODALIDAD POR  
SERVICIOS A NIVEL PROFESIONAL**

**DIRECTOR DE INVESTIGACION:**

**DRA. ING. AMANDA ROSA MALDONADO FARFAN**

**CUSCO – PERU**

**2024**

# INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

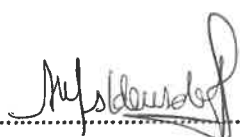
La que suscribe, ha sometido al sistema Turnitin, el informe técnico: “**PROCESO PRODUCTIVO DE EMULSION DE NITRATO DE AMONIO EN LA EMPRESA INDUSTRIAS CACHIMAYO S.A. - ENAEX**” presentado por RICHELL TAIPE GUTIERREZ, con DNI N° 44321689 para optar al Título Profesional de Ingeniero Químico. Informo que el Informe Técnico ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de laUNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 3 %.

**Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis**

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en condición de Directora de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Procesos, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 03 de octubre de 2024



.....  
Dra. Ing. Amanda Rosa MALDONADO FARFAN

DNI: 23822559

ORCID: 0000-0002-4870-7078

**Se adjunta:**

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio:  
<https://unsaac.turnitin.com/viewer/submissions/oid:27259:388359018?locale=es-MX>

NOMBRE DEL TRABAJO

**PROCESO PRODUCTIVO DE EMULSION D  
E NITRATO DE AMONIO EN LA.pdf**

AUTOR

**RICHELL TAIPE GUTIERREZ**

RECUENTO DE PALABRAS

**28240 Words**

RECUENTO DE CARACTERES

**160275 Characters**

RECUENTO DE PÁGINAS

**163 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**8.2MB**

FECHA DE ENTREGA

**Oct 3, 2024 7:49 PM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Oct 3, 2024 8:08 PM GMT-5**

### ● 3% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 3% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 1% Base de datos de trabajos entregados
- 0% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

### ● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 20 palabras)

## **PRESENTACIÓN**

Estimado Sr. Decano de la Facultad de Ingeniería de Procesos, de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco y Señores Integrantes del jurado:

Como Bachiller en Ingeniería Química y en cumplimiento de las disposiciones establecidas en el Reglamento de Grados y Títulos vigente, tengo el honor de presentar ante el Jurado Dictaminador correspondiente, al trabajo desarrollado sobre el proceso productivo de emulsión de nitrato de amonio en la empresa Industrias Cachimayo S.A., siendo el trabajo el resultado del tiempo de trabajo que vengo desarrollando en la empresa Industrias Cachimayo S.A., y confío en que su evaluación favorable me permita obtener el título profesional de Ingeniero Químico.

Agradezco la atención y consideración que se brindará a mi trabajo, y quedo a disposición para cualquier aclaración o información adicional que se requiera.

Cusco, 13 de mayo del 2024.

**BACHILLER:** Taipe Gutierrez, Richell

## **AGRADECIMIENTO**

A Industrias Cachimayo, por la confianza depositada en mí y por brindarme la oportunidad de ser parte de un equipo comprometido en humanizar la minería. Estoy sinceramente agradecido por esta invaluable oportunidad que me han otorgado.

A mi querida familia esposa e hijas, quiero expresar mi más profundo agradecimiento por su incondicional apoyo y constante motivación. Sin ustedes, este logro no hubiera sido posible. Siempre han sido mi mayor fuente de aliento, impulsándome a dar lo mejor de mí en cada paso de mi camino universitario.

A mis docentes de la universidad, quiero expresar mi más sincero agradecimiento por su dedicación y compromiso al impartirnos conocimiento, dotándonos de principios y valores fundamentales. También quiero agradecer a mis compañeros de trabajo y amigos de vida, quienes día a día están presentes en mi camino, brindándome su apoyo y compañía.

## RESUMEN

Este informe corresponde a un trabajo detallado sobre el proceso productivo de la fabricación de emulsión de nitrato de amonio en la planta de INDUSTRIAS CACHIMAYO S.A., detallando los diferentes tratamientos en las unidades de producción dentro de la planta, tratamiento de aguas, producción de nitrógeno, producción de hidrogeno, producción de amoniaco, producción de ácido nítrico, producción de nitrato de amonio y producción de emulsiones.

Se han abordado y desarrollado las actividades de los diferentes procesos productivos, desde la transformación de la materia prima, de los productos semielaborados, hasta la obtención del producto terminado, de la misma manera se ha desarrollado los diferentes controles de calidad de las materias primas y el producto terminado. Además, se ha analizado la evolución de los diferentes tipos de emulsiones a lo largo del tiempo, destacando las adaptaciones y mejoras realizadas para satisfacer las necesidades específicas de los clientes. Los hallazgos de esta investigación proporcionan una visión completa de la fabricación de emulsiones y sus implicaciones prácticas. Asimismo, se ofrecen recomendaciones para mejorar el proceso productivo, promoviendo la eficiencia, la seguridad y la sostenibilidad en la industria de las emulsiones los cuales se usan en mezclas explosivas en la industria minera.

El alcance desarrollado en este informe técnico, precisa la operación de la planta de emulsión en INDUSTRIAS CACHIMAYO S.A. siendo un proyecto reciente en la región y logrando posicionarse en el mercado local y nacional.

Palabras clave: **Anfo, Emulsión, Solox, Electrólisis.**

## ABSTRACT

This report corresponds to a detailed work on the production process of ammonium nitrate emulsion manufacturing at the INDUSTRIAS CACHIMAYO S.A. plant, detailing the different treatments in the production units within the plant, water treatment, nitrogen production, hydrogen production, ammonia production, nitric acid production, ammonium nitrate production and emulsion production.

The activities of the different production processes have been addressed and developed, from the transformation of raw materials, semi-finished products, to obtaining the finished product, in the same way the different quality controls of raw materials and the finished product. In addition, the evolution of the different types of emulsions over time has been analyzed, highlighting the adaptations and improvements made to satisfy the specific needs of customers. The findings of this research provide a comprehensive view of emulsion manufacturing and its practical implications. Likewise, recommendations are offered to improve the production process, promoting efficiency, safety and sustainability in the emulsions industry which are used in explosive mixtures in the mining industry.

The scope developed in this technical report specifies the operation of the emulsion plant at INDUSTRIAS CACHIMAYO S.A. being a recent project in the region and managing to position itself in the local and national market.

**Keywords: Anfo, Emulsion, Solox, Electrolysis.**

## Tabla de Contenido

PRESENTACIÓN .....	ii
AGRADECIMIENTO .....	iii
RESUMEN .....	iv
ABSTRACT.....	v
Tabla de Contenido.....	vi
Índice de figuras.....	x
Índice de Tablas .....	xii
CAPÍTULO I .....	1
1. GENERALIDADES .....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivos .....	2
Objetivo General.....	2
Objetivos Específicos.....	2
1.3. Trayectoria Profesional.....	3
1.3.1. Resumen Cronológico .....	3
1.3.2. Desarrollo Profesional.....	4
CAPÍTULO II .....	9
2. LA EMPRESA.....	9
2.1. Aspectos Generales.....	9
2.1.1. Titularidad de la Empresa: .....	9
2.1.2. Historia de Industrias Cachimayo S.A. ....	9
2.2. Características de la Empresa .....	11
2.2.1. Descripción de Responsabilidades.....	11
2.2.2. Línea de Productos.....	11
2.2.3. Organización .....	13
2.3. Fundamentos Para el Éxito de Industrias Cachimayo S.A.....	15
2.3.1. Misión Institucional.....	15
2.3.2. Visión Institucional.....	15
2.3.3. Filosofía Institucional .....	16
2.3.4. Principios de los Valores .....	16
CAPITULO III .....	18



3.	MARCO TEORICO .....	18
3.1.	Planta Tratamiento Primario de Agua .....	20
3.1.1.	Desarenador.....	21
3.1.2.	Conglomerador .....	23
3.1.3.	Saturador de Cal.....	24
3.1.4.	Filtración .....	26
3.1.5.	Preparación de Reactivos.....	27
3.2.	Planta de Tratamiento Secundario de Agua .....	29
3.2.1.	Intercambiador Catiónico .....	31
3.2.2.	Intercambiador Aniónico .....	32
3.2.3.	Desgasificador.....	34
3.2.4.	Intercambiador de Lecho Mixto.....	35
3.2.5.	Inspección de la Planta. ....	36
3.2.6.	Regeneración de Intercambiadores Iónicos. ....	38
3.2.7.	Regeneración de Intercambiadores de Lecho Mixto. ....	39
3.3.	Planta de Electrolisis del Agua. ....	40
3.3.1.	Introducción Técnica.....	40
3.3.2.	Descripción de Operación de la Planta .....	43
3.3.3.	Electrólitor Alcalino.....	44
3.3.4.	Separador de gases.....	46
3.3.5.	Refrigeración de gases.....	47
3.3.6.	Refrigeración intermedia.....	48
3.4.	Planta de fraccionamiento del Aire. ....	49
3.4.1.	Filtro de admisión de aire .....	49
3.4.2.	Compresor CENTAC.....	50
3.4.3.	Intercambiadores de Calor E-2140A y E-2140B.....	53
3.4.4.	Destilador Criogénico.....	55
3.4.5.	Tanque de Transferencia LIN. ....	56
3.4.6.	Tanque de almacenamiento y vaporizadores.....	57
3.4.7.	Gasificadores de nitrógeno liquido .....	58
3.4.8.	Turbina de expansión.....	59
3.4.9.	Adsorbedores de hidrocarburos.....	61
3.5.	Planta de Síntesis de Amoníaco.....	62

3.5.1.	Propiedades del amoníaco.....	62
3.5.2.	Descripción General.....	63
3.5.3.	Evasil.....	64
3.5.4.	Mezclador proporcional de gas fresco.....	65
3.5.5.	Deoxo.....	67
3.5.6.	Compresor BORSIG.....	68
3.5.7.	Convertidor de amoníaco.....	70
3.5.8.	Caldera de recuperación de calor.....	73
3.5.9.	Refrigerador de gases.....	74
3.5.10.	Separador de amoníaco.....	74
3.5.11.	Recipiente de expansión.....	75
3.5.12.	Bomba de circulación de gas.....	76
3.5.13.	Depósito de almacenamiento para el amoníaco.....	77
3.6.	Planta de Ácido Nítrico.....	78
3.6.1.	Descripción General.....	78
3.6.2.	Evaporación de amoníaco.....	81
3.6.3.	Precalentamiento de amoníaco.....	81
3.6.4.	Filtro de aire primario.....	81
3.6.5.	Mezcla de amoníaco – aire.....	82
3.6.6.	Filtro de gas mezclado.....	82
3.6.7.	Precalentador de gas mezclado.....	82
3.6.8.	Combustión de amoníaco.....	83
3.6.9.	Caldera La-Mont.....	84
3.6.10.	Refrigerador de gas I.....	86
3.6.11.	Turbocompresor con accionamiento por electromotor.....	87
3.6.12.	Refrigerador de gas II.....	90
3.6.13.	Torre de oxidación y absorción.....	91
3.6.14.	Desgasificador de acido.....	93
3.6.15.	Tanque de almacenamiento.....	93
3.7.	Planta de Nitrato de Amonio.....	94
3.7.1.	Descripción general del proceso de arranque de planta.....	94
3.7.2.	Reacción en la columna de neutralización.....	96
3.7.3.	Área húmeda.....	98

3.7.4.	Área seca .....	101
3.7.5.	Productos obtenidos.....	106
3.8.	Planta de Emulsión.....	108
3.8.1.	Propiedades y funciones de las materias primas e insumos .....	109
3.8.2.	Descripción general del proceso productivo .....	110
3.8.3.	Proceso de producción de la emulsión explosiva .....	111
3.8.4.	Control de calidad .....	116
4.	PROCESO DE PRODUCCIÓN DE LA EMULSIÓN.....	124
4.1.	Preparación de las Soluciones.....	124
4.1.1.	Solución combustible.....	124
4.1.2.	Solución oxidante.....	125
4.2.	Proceso de Emulsificación.....	126
4.2.1.	Mecanismo de formación de la emulsión.....	126
4.2.2.	Control de temperatura .....	126
4.2.3.	Agitación y cizallamiento .....	126
4.3.	Control de Calidad y Propiedades de la Emulsión .....	127
4.3.1.	Análisis de pH.....	127
4.3.2.	Densidad y viscosidad .....	127
4.3.3.	Análisis de tamaño de partícula .....	127
4.3.4.	Prueba de estabilidad .....	127
4.3.5.	Análisis de flush point .....	127
4.3.6.	Prueba de gasificación .....	128
4.4.	Almacenamiento y Manejo.....	128
4.4.1.	Condiciones de almacenamiento.....	128
4.4.2.	Seguridad .....	129
4.5.	Innovación en el Proceso de Emulsión .....	129
4.5.1.	Tecnologías emergentes .....	129
4.5.2.	Aditivos innovadores.....	129
4.5.3.	Impacto de la automatización.....	130
4.6.	Sostenibilidad en la Producción de Emulsión .....	130
4.6.1.	Reducción del residuos y emisiones .....	130
4.6.2.	Economía circular.....	130
5.	CONCLUSIONES.....	131

6.	RECOMENDACIONES.....	132
6.	BIBLIOGRAFIA.....	133
7.	ANEXOS.....	135

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b>	Organigrama actual de Industrias Cachimayo S.A. ....	13
<b>Figura 2.</b>	Imagen Satelital del límite territorial de Industrias Cachimayo S.A.....	15
<b>Figura 3.</b>	Diagrama de bloques de todo el proceso productivo en Industrias Cachimayo S.A....	19
<b>Figura 4.</b>	Diagrama de bloques de la planta de tratamiento principal .....	21
<b>Figura 5.</b>	Desarenador de material particulado .....	22
<b>Figura 6.</b>	Vista de perfil derecho del desarenador .....	23
<b>Figura 7.</b>	Vista del conglomerador .....	24
<b>Figura 8.</b>	Vista de los saturadores de cal .....	25
<b>Figura 9.</b>	Vista de los filtros de graba.....	26
<b>Figura 10.</b>	Diagrama de bloques de la planta de tratamiento secundario de agua.....	30
<b>Figura 11.</b>	Recipiente del intercambiador catiónico, lado B.....	32
<b>Figura 12.</b>	Vista del intercambiador aniónico, lado B .....	33
<b>Figura 13.</b>	Vista de perfil del desgasificador .....	35
<b>Figura 14.</b>	Vista del tanque de lecho mixto de la línea D.....	36
<b>Figura 15.</b>	Denominación de tipos de hidrogeno, según la tecnología empleada en su producción .....	41
<b>Figura 16.</b>	Esquema general de las pilas electrolíticas .....	43
<b>Figura 17.</b>	Vista del electrolitor Q6 .....	44
<b>Figura 18.</b>	Ilustración esquemática de un sistema básico de electrolisis del agua.....	46
<b>Figura 19.</b>	Separadores de gases de oxígeno (azul) y nitrógeno (amarillo).....	47
<b>Figura 20.</b>	Intercambiador de calor de placas para el refrigerante intermedio .....	48
<b>Figura 21.</b>	Filtro para el aire ingresado al compresor CENTAC.....	50
<b>Figura 22.</b>	Vista del compresor CENTAC.....	53

<b>Figura 23.</b> Diagrama de bloques de los intercambiadores de calor .....	54
<b>Figura 24.</b> Vista de la caja fría y el diagrama P&ID del destilador criogénico .....	56
<b>Figura 25.</b> Diagrama P&ID del tanque LIN .....	57
<b>Figura 26.</b> Vista del tanque de almacenamiento de nitrógeno líquido.....	58
<b>Figura 27.</b> Vista del gasificador de nitrógeno líquido .....	59
<b>Figura 28.</b> Vista del lado caliente del turbo expansor.....	60
<b>Figura 29.</b> Diagrama P&ID de los adsorbedores de hidrocarburos .....	61
<b>Figura 30.</b> Tanque de adsorción de KOH .....	65
<b>Figura 31.</b> Vista del empalme de líneas de N <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> para formar la mezcla .....	66
<b>Figura 32.</b> Vista del recipiente de purificación catalítica "deoxo" .....	68
<b>Figura 33.</b> Compresor isotérmico del gas de síntesis de 4 etapas.....	69
<b>Figura 34.</b> Convertidor de amoníaco de 4 escalones para el suministro de gases .....	71
<b>Figura 35.</b> Caldera de recuperación de calor, para la producción de vapor.....	73
<b>Figura 36.</b> Refrigerador de gas de síntesis, para condensar el amoníaco .....	74
<b>Figura 37.</b> Separador de amoníaco líquido del gas de síntesis .....	75
<b>Figura 38.</b> Recipiente de expansión.....	76
<b>Figura 39.</b> Bomba de circulación Borsig .....	77
<b>Figura 40.</b> Diagrama de bloques de la obtención de ácido nítrico.....	80
<b>Figura 41.</b> Precalentador de gas mezclado.....	83
<b>Figura 42.</b> visor de la caldera l'mont.....	85
<b>Figura 43.</b> Domo de separador de fases.....	86
<b>Figura 44.</b> turbo compresor de gas NO.....	90
<b>Figura 45.</b> torres de oxidación y absorción de la planta de ácido nítrico .....	93
<b>Figura 46.</b> Tanques de almacenamiento de ácido nítrico.....	94
<b>Figura 47.</b> Diagrama esquemático de la planta de nitrato de amonio.....	96
<b>Figura 48.</b> Vista de la columna de neutralización (color anaranjado) .....	97
<b>Figura 49.</b> Vista del tanque de dilución de nitrato de amonio .....	100
<b>Figura 50.</b> Vista exterior de la torre Prilling.....	103
<b>Figura 51.</b> visualización interna del horno de pre secado.....	104
<b>Figura 52.</b> Almacén final de nitrato de amonio, en sus diferentes presentaciones. ....	107
<b>Figura 53.</b> Silos de almacenamiento de emulsión, listo para despacho.....	115

<b>Figura 54.</b> Análisis de Flush Point en muestra de NASOL. ....	118
<b>Figura 55.</b> Medición de la densidad de la emulsión en frío. ....	119
<b>Figura 56.</b> Medición de viscosidad de la emulsión en diferentes etapas del proceso. ....	120
<b>Figura 57.</b> Análisis de separación de fases acuosa y oleosa. ....	121
<b>Figura 58.</b> Vista microscópica de la emulsión. ....	122
<b>Figura 59.</b> Prueba de test de transporte con muestras de emulsión. ....	122
<b>Figura 60.</b> prueba de temperatura en ambientes fríos y calientes. ....	123
<b>Figura 61.</b> porcentaje de concentración de reactivos para diferentes matrices de emulsión .....	125
<b>Figura 62.</b> Visualización de análisis de control de calidad de la emulsión .....	128

### Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Resumen cronológico de la trayectoria profesional. ....	3
<b>Tabla 2.</b> Descripción detallada de la titularidad de Industrias Cachimayo S.A. ....	9
<b>Tabla 3.</b> Temperaturas de ingreso y salida de los flujos en el refrigerador de gases. ....	47
<b>Tabla 4.</b> Propiedades fisicoquímicas del amoníaco. ....	62
<b>Tabla 5.</b> Condiciones de operación por etapas del compresor Borsig .....	69
<b>Tabla 6.</b> Composición en % volumen de los gases que son impulsados por el turbocompresor88	
<b>Tabla 7.</b> Altura de las torres de oxidación .....	91
<b>Tabla 8.</b> Composición de materia prima e insumos, según tipo de emulsificante .....	114
<b>Tabla 9.</b> Resultados de la prueba de ciclaje térmico. ....	124

# CAPÍTULO I

## 1. GENERALIDADES

### 1.1. Introducción

INCASA (Industrias Cachimayo S.A.) es una empresa líder en la fabricación de nitrato de amonio, emulsión y productos derivados. Está ubicada en Cachimayo, provincia de Anta, en el departamento de Cusco. Tiene como compromiso brindar soluciones químicas de calidad y contribuir al crecimiento de la industria. INCASA, donde la excelencia y la innovación son prioritarios.

La sociedad continúa experimentando un crecimiento constante, impulsada por la aparición diaria de nuevos inventos que brindan productos y servicios innovadores, con el objetivo primordial de mejorar nuestra calidad de vida. En el presente informe, se describe detalladamente el proceso productivo de los explosivos de nitrato de amonio, desde la perspectiva de la ingeniería química. Este enfoque resulta de gran relevancia para la industria de explosivos, así como para aquellos colegas que están en proceso de formación y desean especializarse en el sector minero. Además, es importante tener en cuenta que se están llevando a cabo nuevas investigaciones y cambios en la elaboración de explosivos, lo cual añade un elemento adicional a la discusión.

La ingeniería química está estrechamente relacionada con los cálculos de balance de materia y energía. A lo largo de los años, se ha trabajado arduamente en su mejora, realizando ajustes y optimizaciones con el objetivo de evitar cualquier desperdicio de energía, por mínimo que sea. Trabajar en la industria química puede resultar desafiante debido a la necesidad de mantenerse a la vanguardia en cuanto al funcionamiento de numerosos equipos, como intercambiadores de calor, tuberías, purgas, subproductos, compresores y turbinas, los cuales

operan de manera continua. Esta exigencia constante puede resultar un tanto complicada, pero es crucial para garantizar un rendimiento óptimo en esta industria.

## **1.2. Objetivos**

### ***Objetivo General***

Brindar un informe detallado sobre las actividades llevadas a cabo en el proceso productivo de la fabricación de emulsión de nitrato de amonio. Esto incluye desde la transformación de la materia prima hasta la obtención del producto final, como el ANFO y la emulsión. Además, se abordará la trayectoria de evolución de los diferentes productos de emulsión, adaptados según las necesidades de nuestros clientes.

### ***Objetivos Específicos***

- Proporcionar una descripción detallada de las actividades y responsabilidades desempeñadas durante mi trayectoria laboral en la empresa Industrias Cachimayo S.A., brindando una visión clara de mi experiencia en el ámbito de la fabricación de emulsiones.
- Destacar las habilidades técnicas y conocimientos adquiridos a lo largo de mi experiencia laboral, en relación con el proceso productivo de emulsiones, desde la transformación de la materia prima hasta la obtención del producto final.
- Evaluar la calidad y rendimiento de las emulsiones obtenidos en el proceso productivo, considerando parámetros como estabilidad, energía y seguridad en su manipulación.
- Informar la evolución de los productos de emulsión a lo largo del tiempo, analizando las adaptaciones y mejoras realizadas para satisfacer las necesidades específicas de nuestros clientes.



### 1.3.Trayectoria Profesional

#### 1.3.1. Resumen Cronológico

**Tabla 1.**

*Resumen cronológico de la trayectoria profesional.*

<i>05/2023 - Actualidad</i>	Encargado del Área de Control de Calidad.
<i>03/2022 – 04/2023</i>	Supervisor de Producción en INDUSTRIAS CACHIMAYO SA. (Área de Producción).
<i>04/2018 – 02/2022</i>	Analista de Control de Procesos en INDUSTRIAS CACHIMAYO SA. (Área de Control de Procesos).
<i>07/2015 – 03/2018</i>	Analista de Control de Calidad en INDUSTRIAS CACHIMAYO SA. (Área de Control de Calidad).
<i>04/2014 - 05/2015</i>	Analista de Procesos de la PTAR San Jerónimo Seda-Cusco en VEOLIA (Proactiva Medio Ambiente). (Área de Procesos).
<i>08/2013 – 03/2014</i>	Analista de Control de Procesos en INDUSTRIAS CACHIMAYO SA. (Área de Control de Procesos).
<i>08/2012 – 07/2013</i>	Prácticas Profesionales-INDUSTRIAS CACHIMAYO S.A. (Área de Control de Procesos).
<i>2012</i>	Prácticas Pre-Profesionales - Planta Piloto de Chocolates – UNSAAC.

### ***1.3.2. Desarrollo Profesional***

#### *1.3.2.1. Encargado del Área de Control de Calidad en Industrias Cachimayo S.A. (01/05/2023*

*– A la actualidad)*

- Tomar decisiones en base a los resultados de los análisis de calidad realizados con la finalidad de cumplir con las especificaciones del producto elaborado.
- Llevar a cabo el control directo de los insumos, materiales reactivos y otros que se empleen en el control de la calidad para dar cumplimiento a lo establecido.
- Verificar la correcta preparación y estandarización de las soluciones que se empleen en los diferentes laboratorios con el objetivo de que se respeten los protocolos estipulados.
- Supervisar el desarrollo de las actividades de los laboratorios para validar los muestreos y trabajos realizados en los mismos.
- Sustentar el presupuesto anual del área a la gerencia de planta con la finalidad de alcanzar los objetivos del Área de Control de Calidad.
- Generar reuniones permanentes con la gerencia de Producción y la jefatura de producción para reportar resultados de los productos intermedios y finales del proceso productivo para mantener la calidad de estos.
- Coordinar con el área de producción respecto a las incidencias detectadas con el objetivo de corregir la calidad de los productos de acuerdo a los parámetros especificados.
- Coordinar con las jefaturas de la planta los planes y programas de producción para la mejor consecución de los objetivos.
- Controlar la emisión de certificados de calidad de los diferentes productos de la planta con el fin de garantizar que los productos cumplan con las especificaciones de calidad y sea de satisfacción del cliente.

- Proponer nuevos procedimientos, métodos y sistemas de modernización de equipos e instrumentos para mejorar los procesos relacionados a análisis de control de calidad.
- Supervisar y controlar el cumplimiento de las actividades en temas de Seguridad y Salud Ocupacional (SSO), Sistemas de Gestión Ambiental (SGA), Insumos Químicos y Bienes Fiscalizados (IQBF).

*1.3.2.2. Supervisor de Producción en Industrias Cachimayo S.A. (01/03/2022 -30/04/2023)*

- Supervisar el desarrollo operacional de la planta de acuerdo con los programas de producción, mantenimiento, entre otros.
- Desarrollar los informes de producción y las notificaciones en los sistemas correspondientes.
- Asegurar el abastecimiento de insumos y materias primas necesarias para la producción de las diferentes matrices que se emplean en el proceso productivo.
- Llevar los controles y funcionamiento del mantenimiento y reparaciones efectuadas en las maquinarias, equipos e instalaciones de la planta.
- Dar seguimiento al presupuesto, proyecciones de ventas, producción y costos para asegurar la rentabilidad de la planta.
- Supervisar y analizar la entrega de reportes de gastos, inversiones e información relevante a la gerencia con el fin de facilitar la toma de decisiones del negocio.
- Desarrollar procesos en la planta como: cálculo de consumos y producciones diarias, así como análisis de ratios energéticos con el fin de garantizar una mayor rentabilidad.
- Resolver los problemas de carácter administrativo y técnico que se presenten relacionados a la planta.

- Desarrolla sistemas de control eficientes que permitan apoyar un proceso de distribución continuo con el fin de evitar interrupciones en el proceso que generen costos no planificados.
- Coordinar con el jefe de turno la disposición de personal de mantenimiento que realice trabajos de reparación mientras continua la operación con el fin de asegurar la mantención predictiva y correctiva de los equipos.
- Coordinar con el jefe de producción los programas de producción y despachos de la matriz para dar cumplimiento a las órdenes de compra en los tiempos establecidos.
- Coordinar con las diferentes áreas la asignación de recursos a nivel de equipos y recursos humanos en los tiempos establecidos para la ejecución de la operación.

*1.3.2.3. Analista de Control de Procesos en Industrias Cachimayo S.A. (01/04/2018 – 28/02/2022)*

- Analizar los reportes de producción y verificar los parámetros en campo con la finalidad de identificar las oportunidades de mejora.
- Diseñar los procesos mejorados a implementar (elaboración de propuestas para implementación de mejoras analizadas).
- Coordinar con las diferentes áreas la asignación de recursos a nivel de equipos y recursos humanos en los tiempos establecidos para la ejecución de la operación.
- Coordinar las paradas programadas, según los análisis de las demandas de Carga emitidas por el SEIN y corroborados con el suministrador de energía.
- Asegura y gestiona la conectividad y da soporte TI a las diferentes áreas de planta.
- Realizar reportes estadísticos de consumos de producción y stock de productos en las diferentes plantas.

- Realizar análisis cualitativo de la información de los procesos de las diferentes plantas de producción (cálculo de consumos y producciones diarias de las diferentes plantas).
- Analizar ratios energéticas y de producción con la finalidad de generar potenciales ahorros.
- Elaborar informes a entidades estatales (BCR, PRODUCE, SUCAMEC, COES, ANA, SUNAT) coordinar con instituciones externas para solicitar autorizaciones.

*1.3.2.4. Análisis de Control de Calidad en Industrias Cachimayo S.A. (01/07/2015 – 31/03/2018)*

- Realizar muestreos periódicos de los productos en las plantas de producción, con la finalidad de cumplir los cronogramas establecidos.
- Realizar los muestreos y análisis de los efluentes externos de fábrica y del río de los molinos aguas arriba, y aguas abajo con el apoyo de la jefatura para cotejar las soluciones químicas requeridas en las plantas.
- Analizar las muestras químicas obtenidas de las plantas para asegurar los estándares de calidad determinados en los procesos de producción y en los productos finales.
- Efectuar los análisis, verificación y comprobaciones necesarias en cada una de las plantas para permitir un correcto desarrollo de la producción.
- Informar los resultados de los análisis efectuados, así como las ocurrencias y/o desviaciones encontradas a partir de las especificaciones técnicas con el propósito de alertar problemáticas presentadas en el desarrollo de los productos intermedios y finales.
- Generar reportes periódicos de los análisis e incidencias presentadas con la finalidad de facilitar la toma de decisiones en la resolución de problemas.
- Llevar a cabo la emisión de certificados de calidad en el control de materias primas o productos para que se brinde dicha información a los clientes.

- Analizar la composición química de los productos no conformes por los clientes o generados en planta con el objetivo de identificar la causa de la no conformidad y tomar medidas correctivas.
- Control y verificación del producto y de los productos intermedios a mantener las especificaciones establecidas por control de calidad.
- Coordinar con el área de producción para la corrección de la calidad del producto de acuerdo con el parámetro establecidos.
- Reporte diario del análisis de las propiedades del producto final.
- Personal turnista (analista de planta y analista de ANFO).
- Análisis de Parámetros Fisicoquímicos en general de Agua vía húmeda y por espectrofotometría.

*1.3.2.5. Practicante Profesional en Industrias Cachimayo (15/08/2012 – 12/07/2013)*

- Digitalizar los reportes y actualizar todos los datos de operación de planta para realizar los análisis de estos.
- Actualizar los estadísticos de planta, para poder hacer seguimiento a las variaciones de parámetros de operación.
- Coordinar con el analista de control de procesos, para el análisis de los diferentes procesos de planta, para la elaboración de informes y toma de decisiones.
- Realizar reportes estadísticos de consumos de producción y stock de productos en las diferentes plantas.
- Realizar los reportes de eventos ocurridos en planta, para determinar las disminuciones de producción.

## CAPÍTULO II

### 2. LA EMPRESA

#### 2.1. Aspectos Generales

##### 2.1.1. Titularidad de la Empresa:

**Tabla 2.**

*Descripción detallada de la titularidad de Industrias Cachimayo S.A.*

Razón social	INDUSTRIAS CACHIMAYO S.A.
Representante Legal	Ing. Jesus Sullca Retamozo
Dirección Fiscal	Av. Agustín Gamarra N° 100, Cachimayo – Anta – Cusco
RUC	20507447369
C.I.U.U.	Concordante con el CIUU N° 2012 – Fabricación de nitrato de amonio y productos derivados
Área Total del predio (actual)	44.76 has: -Área de la Planta Industrial: 17.87 has -Área de mitigación de impacto ambiental: 26.89 has
Zonificación	I-4 (Industrial Tipo 4)
Abastecimiento de agua	El agua es captada del el rio Los Molino y conducida a la planta mediante tubería subterránea.

##### 2.1.2. Historia de Industrias Cachimayo S.A.

En 1962, se inició la construcción de Industrias Cachimayo por el consorcio alemán UHDE FERROSTAL HOCHTIEF y la Cooperación para la Reconstrucción y Desarrollo del Cusco (CRIF).

En 1965, fue inaugurada en presencia del presidente Arq. Fernando Belaunde Terry, como Fabrica de Fertilizantes Nitrogenados de Cachimayo.

En 1983, Industrias Cachimayo diversifica su producción, con la producción de Nitrato de Amonio Técnico y Nitrato de Amonio Grado ANFO; con el cual ingreso al mercado de la minería.

En 1996, Industrias Cachimayo fue adquirida por YURA S.A. Empresa miembro del Grupo GLORIA, Continuando su operación en forma normal.

En 2014, Enaex reingresa al Perú comprado Chemtrade, iniciando así su participación activa en el mercado peruano con los servicios de suministro de explosivos con la línea completa de productos y el servicio de voladura con la incorporación de camiones fábrica de alto tonelaje Milodon.

En 2018, Enaex compra industrias Cachimayo lo que permite a Enaex ampliar su capacidad de producción local con la instalación de la planta más moderna de emulsión matriz con una capacidad de producción de 10000 ton/año y la ubicación estratégica de la zona sur del Perú.

En 2019, se concluyó la construcción de la planta de emulsión más moderna del Perú con una capacidad de producción de 10000 ton/año y puede alcanzar hasta 20000 ton/año. También la empresa ofrece a la industria minera los subproductos como: amoníaco, ácido nítrico, nitrógeno gas y líquido, oxígeno industrial y agua desmineralizada.

En 2022, Certificamos la energía de nuestra planta de Cachimayo como verde. Este certificado nos permite fabricar productos más ecológicos y contribuir así con la descarbonización de Enaex y de nuestros clientes.



En 2023, se inició con la ampliación de nuestra planta de emulsión implementando más silos para almacenar nuestro producto y tanques de almacenamiento para nuestros insumos, de igual forma se realizó experimentaciones en laboratorio nuevas formulaciones de emulsión, de acuerdo al requerimiento de nuestros clientes.

Actualmente (2024), se viene realizando estudios técnicos y económicos para el remplazo de los electrolizadores de la planta de producción de hidrogeno con tecnología actual del mercado, para incrementar el proceso productivo y optimizar recursos y servicios.

## **2.2. Características de la Empresa**

### ***2.2.1. Descripción de Responsabilidades***

Las posiciones que ocupan los colaboradores se encuentran distribuidos en niveles o categorías, en función al puntaje o valor relativo de cada uno de los puestos, obtenido mediante la metodología de valoración de puestos, utilizada por la compañía.

### ***2.2.2. Línea de Productos***

Actualmente, Industrias Cachimayo S.A. se dedica a la producción de nitrato de amonio en prills, tanto en grado ANFO como en grado técnico. Estos productos se presentan en big bags de 1 tonelada métrica (TM) y 1.25 TM, y también se fabrican fertilizantes en volúmenes más pequeños de 50 kg, según la demanda del mercado.

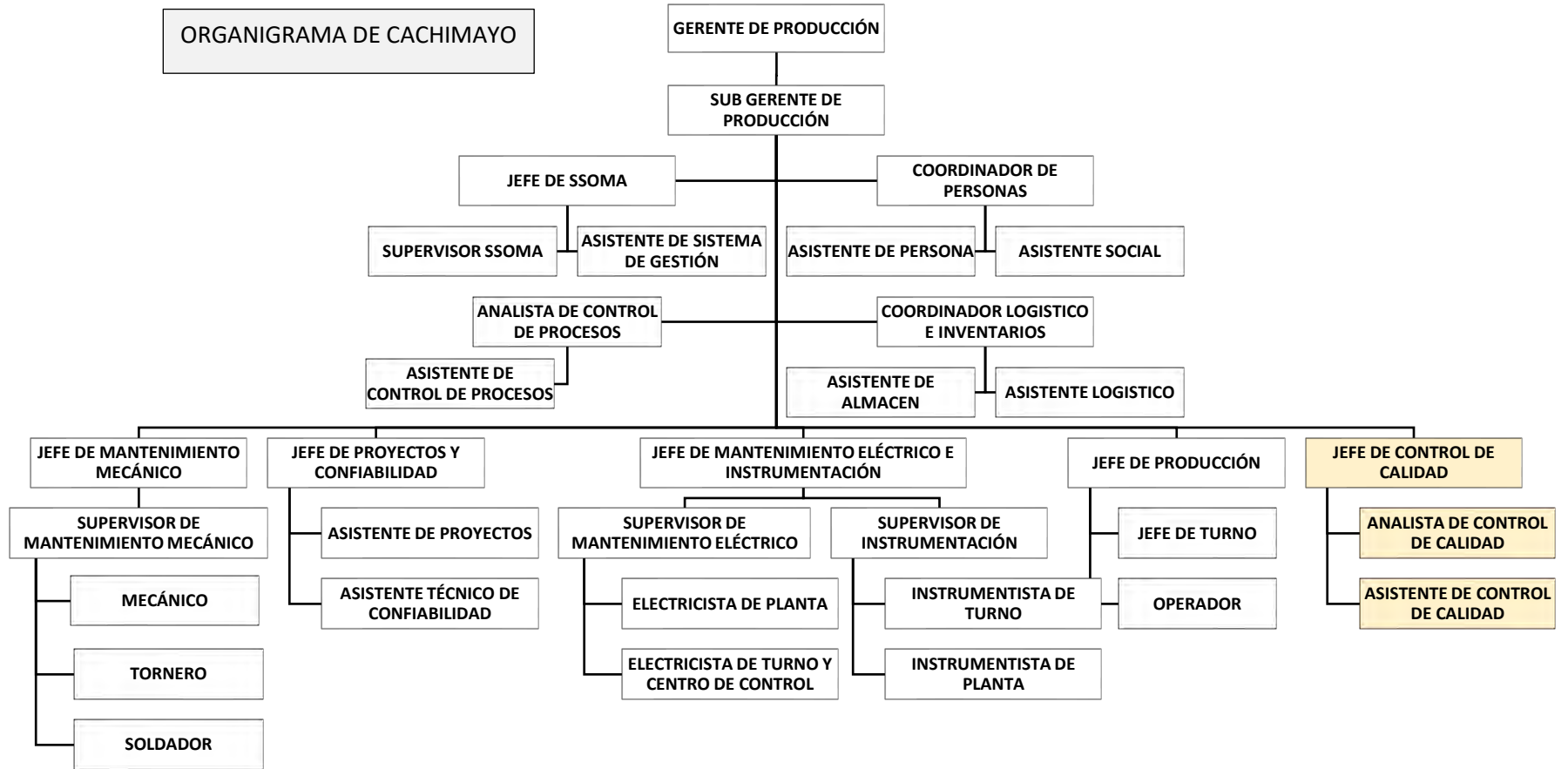
Además de la producción de nitrato de amonio, también fabricamos emulsiones con composiciones diversas, adaptadas a las necesidades y características de nuestros clientes. Estas emulsiones se despachan en camiones de bombonas con capacidades que oscilan entre 30 y 33 toneladas métricas.

Por otro lado, como parte de nuestras iniciativas este año, hemos impulsado la venta de subproductos en el mercado local. Entre estos subproductos se incluyen el oxígeno y el nitrógeno líquido.

2.2.3. Organización

Figura 1

Organigrama actual de Industrias Cachimayo S.A.



#### **2.2.4. Ubicación geográfica de Industrias Cachimayo**

La Planta Industrial de INCASA se encuentra estratégicamente ubicada en la Av. Agustín Gamarra N° 100, en el distrito de Cachimayo, a tan solo 14 km de la ciudad del Cusco. Pertenece a la provincia de Anta, en el departamento de Cusco.

La propiedad de INCASA abarca un área total de 44.76 hectáreas, distribuidas de la siguiente manera: 17.87 hectáreas corresponden a la planta industrial, mientras que 26.89 hectáreas se destinan a la mitigación de impacto ambiental.

En la figura 2, imagen satelital, se muestra claramente la ubicación del predio de INCASA, resaltando tanto la planta industrial como las áreas destinadas a la mitigación de impacto ambiental.

En INCASA, estamos comprometidos con la sostenibilidad y el cuidado del medio ambiente, por lo que asignamos una extensa área para implementar medidas que minimicen cualquier impacto negativo de nuestras operaciones.

## Figura 2

Imagen Satelital del límite territorial de Industrias Cachimayo S.A.



### 2.3. Fundamentos Para el Éxito de Industrias Cachimayo S.A.

#### 2.3.1. Misión Institucional

*“Mejoramos la vida de nuestro clientes y colaboradores”*. Nuestra misión principal es proporcionar productos y servicios de alta calidad que satisfagan las necesidades de nuestros clientes, contribuyendo así al éxito y crecimiento de las empresas mineras. Además, Industrias Cachimayo S.A. se compromete a cuidar y valorar a sus colaboradores, creando un entorno de trabajo seguro y favorable que promueva su desarrollo personal y profesional.

#### 2.3.2. Visión Institucional

**“Ser la compañía más prestigiosa en la industria, entregando soluciones premium a las regiones mineras más importantes del mundo”**. Tenemos como visión convertirnos en la empresa más reconocida y respetada dentro de la industria, al proporcionar soluciones de alta

calidad y de valor superior en las principales regiones mineras a nivel global. La compañía busca destacar por su prestigio, excelencia y capacidad para satisfacer las necesidades específicas de los mercados mineros.

### ***2.3.3. Filosofía Institucional***

***“No hay trabajo tan urgente, ni tan importante como para no tomarse el tiempo de realizarlo en forma segura”.*** Industrias Cahimayo S.A. prioriza la seguridad en todas sus actividades y es fundamental tomarse el tiempo necesario para realizar cada tarea de manera segura y sin poner en riesgo la integridad de los trabajadores y del entorno. Esta filosofía refleja el compromiso firme de la empresa con la seguridad, promoviendo una cultura de prevención, capacitación constante y el cumplimiento riguroso de los protocolos de seguridad.

### ***2.3.4. Principios de los Valores***

#### ***2.3.4.1. La Vida***

- La empresa, pone la Seguridad e integridad de las personas en primer lugar.
- Es responsable con el medio ambiente.
- Esta comprometido con el desarrollo social de las comunidades en las que opera.

#### ***2.3.4.2. Los Clientes***

- La empresa, tiene la vocación de servicio.
- Es empático y resuelve sus necesidades.
- Entiende la relación con los clientes como una sociedad (Partnership).
- Tiene la pasión de entregar soluciones de valor excepcional.

#### ***2.3.4.3. La Excelencia***

- La empresa, se esfuerza por obtener los más altos estándares de calidad tecnológica y de servicio.

- Cumple con los compromisos trazados.
- Trabaja en equipo con alta responsabilidad y honestidad.
- Es ágil. Colabora y tiene siempre al cliente al centro de las decisiones.

#### *2.3.4.4. La Innovación*

- La empresa, Desarrolla en sus trabajadores la audacia en la búsqueda de soluciones.
- Toma riesgos para resolver problemas resignados.
- Tiene una mirada de largo plazo.
- Es ágil. Entregamos valor temprano y continuo al cliente.

## CAPITULO III

### 3. MARCO TEORICO

La planta se inicia con el tratamiento del agua, cuya calidad y parámetros dependen del uso específico requerido. Se suministra agua para servicios, refrigeración, calderas y para procesos industriales. En este último caso, se utiliza en la planta de electrolisis del agua, donde se produce hidrógeno como producto principal y oxígeno como subproducto.

Por otro lado, se cuenta con la planta de fraccionamiento del aire mediante destilación criogénica. En este proceso, se separa el nitrógeno de los demás gases presentes en el aire, aprovechando su diferencia de temperatura de ebullición. El nitrógeno obtenido de esta planta y el hidrógeno de la planta de electrolisis se envían a la planta de síntesis de amoníaco en una proporción de 1:3. Mediante el proceso de Haber-Bosh, se obtiene amoníaco a partir de esta combinación.

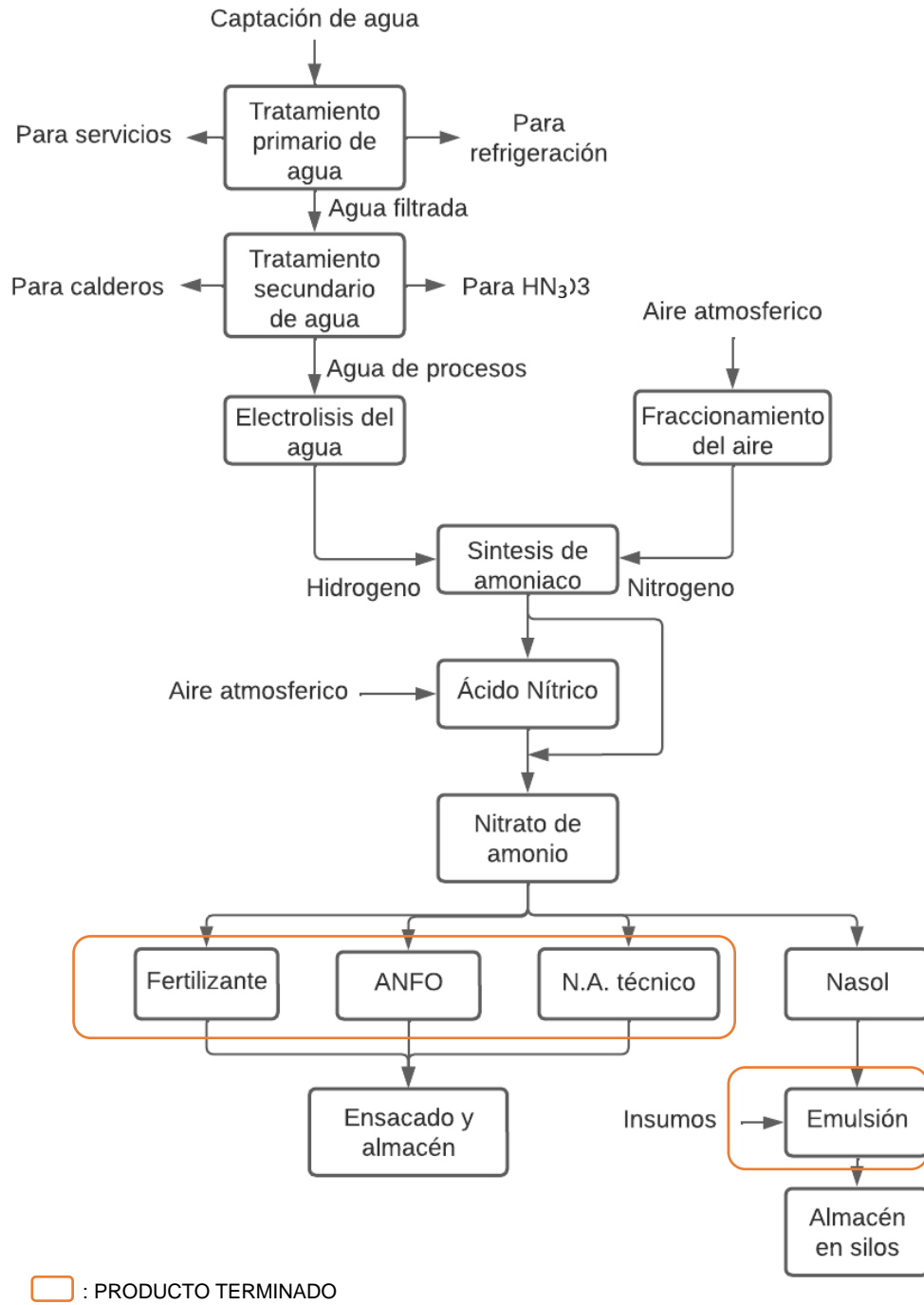
El amoníaco resultante, junto con el aire, se utiliza como materia prima en la obtención de ácido nítrico en la planta correspondiente, aplicando el método de Ostwald. Finalmente, el ácido nítrico y una proporción del amoníaco se envían a la planta de nitrato de amonio, donde se produce el producto final, ya sea en forma de ANFO o como NASOL, este último sirve de materia prima para la producción de emulsión, que es procesado en otra planta modular.

En la figura 3, se muestra el diagrama de bloques indicando las plantas que se tiene en Industrias Cachimayo.



**Figura 3**

*Diagrama de bloques de todo el proceso productivo en Industrias Cachimayo S.A.*



*Nota.* El gráfico representa al proceso productivo partiendo de la materia prima hasta obtener el producto final.

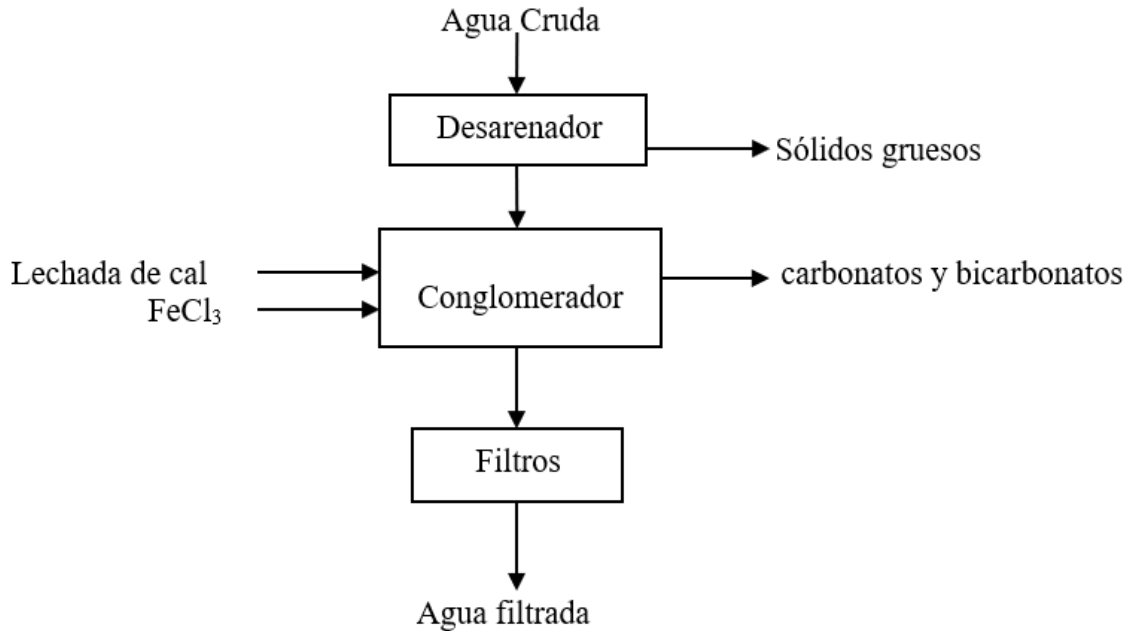
### **3.1. Planta Tratamiento Primario de Agua**

El agua cruda que proviene del río los Molinos, llega al desarenador donde los sólidos gruesos o la arena se precipitan por gravedad, seguidamente, este agua es bombeada hacia el conglomerador conjuntamente con la lechada de cal ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) que se adiciona en los saturadores y el cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ), con el fin de reducir la dureza del agua (carbonatos) por precipitación. El agua que sale por rebose del conglomerador es filtrada en los filtros que contienen cuarzo y finalmente es bombeada hacia la planta de tratamiento del agua secundario y a la torre de refrigeración.

Como se puede ver en la figura 4, se ve el diagrama de bloques, teniendo como equipos principales el desarenador, conglomerador y filtros.

## Figura 4

Diagrama de bloques de la planta de tratamiento principal



*Nota.* En la planta de tratamiento primario, específicamente en el conglomerador, es donde se adiciona los productos químicos para reducir la dureza temporal.

### 3.1.1. Desarenador

El agua proveniente desde el punto de captación, que está a una distancia aproximada de 4 km, es conducida hasta la planta mediante tuberías subterráneas. Una vez ahí ingresa al desarenador (fig. 5) que tiene una capacidad máxima de operación de 100 m<sup>3</sup>/h. La función del desarenador es precipitar la materia orgánica en suspensión (arena, lodo, graba) a medida que va recorriendo su trayectoria mediante un flujo laminar de corriente; en la base de este desarenador se encuentra un dique a un metro de la parte final de la trayectoria, para evitar que la materia orgánica precipitada pase a la cámara de succión. Adicionalmente se cuenta con 2 rejas de doble tamaño: la primera reja es de 50 mm y la segunda de 8 mm para retener el paso de materia orgánica

de baja densidad (pasto, hojas, plásticos, etc.), que no logró sedimentarse en la trayectoria. El desarenador y las rejillas es limpiado según la cantidad de materia orgánica que se tenga acumulada en ella, inspección visual (Corbacho & Izquierdo, 1977).

### **Figura 5**

*Desarenador de material particulado*

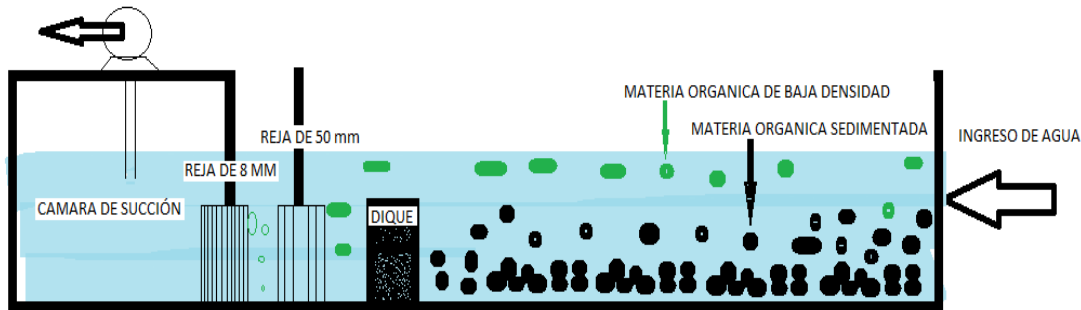


*Nota.* En el desarenador se retiene toda la materia de gran tamaño, que puedan ser separados por la influencia de la gravedad.

Al final la corriente de agua es distribuida a dos cámaras de succión, mientras una se encuentra en reserva en casos que haya un desperfecto o mantenimiento mecánico en relación a la bomba de succión, la otra cámara entra en operación, bombeando hacia el conglomerador. En la figura siguiente se aprecia gráficamente la parte estructural del desarenador.

**Figura 6**

*Vista de perfil derecho del desarenador*



*Nota.* se realizó el esquema de perfil derecho para identificar las partes del desarenador.

### **3.1.2. Conglomerador**

El conglomerador puede llegar a operar a 300 m<sup>3</sup>/h en condiciones de máxima demanda es de forma cilíndrica de material de concreto armado teniendo una altura desde la base del suelo de 4 m. En la parte superior céntrica se tiene al motor del agitador mecánico, que mueve las paletas del agitador que se encuentran distribuidos adecuadamente hacia el fondo del conglomerador con la finalidad de remover el agua de ingreso y homogenizar con los aditivos químicos que son la lechada de cal y el tricloruro férrico, este último es dosificado por la parte superior (ver fig. 7), la mezcla se da en el cilindro interno del conglomerador, saliendo luego la mezcla por la parte inferior con un flujo laminar para no perturbar los flóculos de material orgánico que se van sedimentando con el tiempo.

Por la parte superior mediante rebose se capta el agua ya tratada libre de impurezas y más blanda logrando disminuir la dureza de 28 °dH a 21 °dH aproximadamente; para luego ser enviado a los filtros (Corbacho & Izquierdo, 1977).

## Figura 7

### Vista del conglomerador



*Nota.* En la figura se aprecia el conglomerador operando en estado estacionario.

Los sólidos en suspensión pueden tardar días o incluso décadas para asentarse en el agua de forma normal (Rand, 2020). Es por eso que actúa el cloruro férrico hidrolizándose en el agua, formando iones de hierro solubles y complejos que neutralizan los sólidos negativamente cargados, conjuntamente se aplica la lechada de cal proporcionando un control del pH, reducción de olores y desinfección. El carbonato de calcio que se forma en la reacción del hidróxido de calcio y bicarbonato, proporciona una estructura granular que incrementa la porosidad del lodo, lo que permite tener un mejor desaguado en el proceso de filtración (Calidra, 2002).

- $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$
- $\text{Ca(OH)}_2 + \text{Ca(HCO}_3)_2 \rightarrow 2 \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$
- $\text{Ca(OH)}_2 + \text{MgCl}_2 \rightarrow \text{Mg(OH)}_2 + \text{CaCl}_2$

### 3.1.3. Saturador de Cal

500 kg de Cal viva (CaO) se vierte a un depósito donde es tratada con agua a temperatura ambiente, dependiendo de la reactividad de la cal, la mezcla levantara una temperatura maso menos

rápida, durante todo este proceso es muy importante llegar a una temperatura óptima de 80°C y esa temperatura tiene que ser homogénea en cualquier punto (Group, 2023), finalmente se deja enfriar y es bombeada diluyendo a los recipientes de saturador de cal donde es aforado hasta los canales de rebose con agua, aproximadamente 25 m<sup>3</sup> de volumen del recipiente, logrando obtener una alcalinidad de fenolftaleína de  $p= 5.0$  mVal/l (Corbacho & Izquierdo, 1977). Esta cal hidratada es enviada constantemente al conglomerador, el flujo de ingreso será controlado según análisis de laboratorio, se mantendrá el nivel de rebose en el saturador insuflando agua hasta llegar a un valor de alcalinidad de fenolftaleína de  $p$  inferior al valor de operación.

### **Figura 8**

*Vista de los saturadores de cal*



*Nota.* El saturador que se encuentra vacío es el saturador A y el que está en funcionamiento es el saturador B.

Es muy importante que la pasta se mantenga sumergida en agua ya que en contacto con la atmosfera se produce la carbonatación generando un endurecimiento, como se puede apreciar en los canales de captación de la figura 8.



### **3.1.4. Filtración**

El agua que es rebosado en el conglomerador es conducida hacia los tanques de filtración constituida por grabas de arena de cuarzo de una profundidad de 2.4 m donde se elimina la mayor cantidad de sedimentos, saliendo el agua completamente purificada. El nivel debe mantenerse constante en todo momento para evitar rebosamiento o la descarga completa del agua, este nivel es contralado por una válvula que es accionada por una boya flotante (Corbacho & Izquierdo, 1977).

Como podemos ver en la figura 9, se cuenta con 3 filtros, uno de ellos se encuentra en reserva, en casos que se necesite mayor producto filtrado o cuando uno de ellos está en mantenimiento. Una vez que se sature los filtros se procede a lavar con aire y agua a presión, que se insufla por la parte inferior.

#### **Figura 9**

*Vista de los filtros de graba*



*Nota.* Los filtros son la última etapa en la planta de tratamiento primario, logrando eliminar la mayor cantidad de dureza temporal en todo este tratamiento.



El agua filtrada es conducida al tanque de agua purificada donde será bombeada para agua de lavado, agua de refrigeración y agua de servicios según demande cada planta.

Para la regeneración del filtrado de arena se debe tener en cuenta que el tanque de agua filtrada este llena, el compresor de aire y la bomba de lavado estén listos para su funcionamiento; las válvulas de filtros estén abiertas y la resistencia del filtro a lavar indique el grado de ensuciamiento máximo admisible.

Se conecta el compresor de aire, comprobando que el agua de refrigeración circula por la bomba, 10 o 15 minutos, luego se conecta la bomba de lavado, comprobando si el manómetro indica la presión requerida, se ajusta a 100 m<sup>3</sup>/h con el indicador aproximadamente 10 minutos y desconectar el compresor de aire, luego bombear agua filtrada a 160 m<sup>3</sup>/h hasta que salga agua de lavado bastante clara, desconectar la bomba de agua de lavado y se pone en servicio los filtros de arena de cuarzo.

### ***3.1.5. Preparación de Reactivos***

#### ***3.1.5.1. Preparación de la solución de sulfito de sodio***

- Abrir la válvula de agua y tenerla abierta hasta llegar más o menos a la mitad del tanque del nivel del tanque de sulfito de sodio.
- Se cierra la válvula de ingreso de agua al tanque.
- Agregar 3 kilogramos de sulfito de sodio (Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) al tanque.
- Aforar 4 litros de solución de lejía sódica (NaOH) del tanque de lejía hacia el tanque de sulfito.
- Abrir la válvula de ingreso de agua hasta llenar el tanque de sulfito (completamente al nivel máximo).
- Agitar la solución utilizando el agitador manual por unos 5 a 10 minutos.

### ***3.1.5.2. Preparación de la solución de polifosfato***

- Llenar el tanque hasta la marca (más o menos).
- Pesarse polifosfato (10 kilos) y disolverlo separadamente en un cubo con agua caliente.
- Echar la solución de polifosfato al tanque trasvasado al tanque de preparación.
- Conectar el agitador de tanque, pulsando la posición de arranque.
- Determinar la concentración resultante utilizando un densímetro.
- Finalmente desconectar el agitador.

### ***3.1.5.3. Preparación de la solución de cloruro férrico***

- La preparación se realiza en un tanque de 1m<sup>3</sup> 40 kg de cloruro férrico y se afora a 1m<sup>3</sup> con agua y se agita constantemente y finalmente se toma la densidad y se determina la concentración.

### ***3.1.5.4. Preparación de lechada de cal***

- Se tiene una zona “Caldero apagado de cal” zona de preparación de lechada en donde se carga 500 kg de cal CaO (80% de pureza) (Group, 2023).
- Se humedece con agua lentamente hasta que la cal quede completamente cubierta por agua.
- La cal (CaO) se agita mediante una rejilla, hasta que la formación de vapor disminuya.
- Luego de aproximadamente 02 horas se evacua a al “Tanque de lechada de cal” la solución de lechada de cal (Ca(OH)<sub>2</sub>).
- Se llena con agua hasta agotar la cal del recipiente de apagado de cal y después conectar el agitador.
- Luego se bombea al saturador correspondiente, se apertura un flujo constante de agua para dosificar por reboce la lechada de cal al conglomerador.

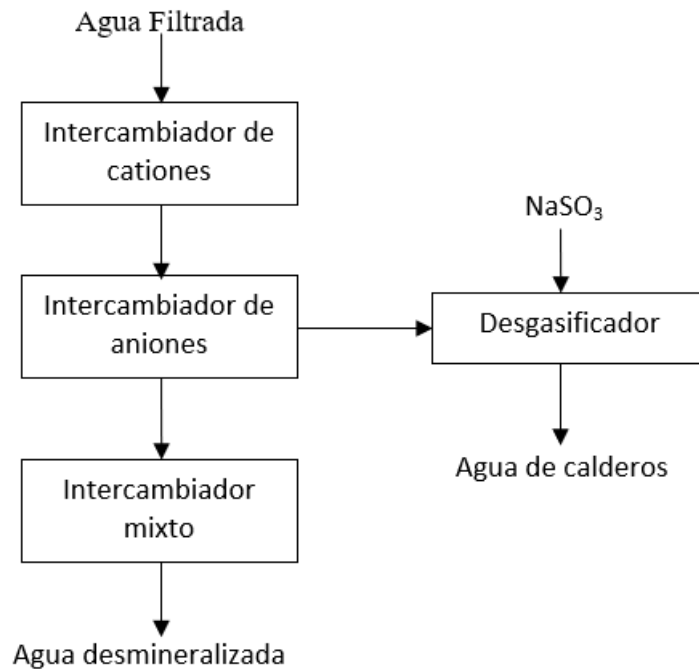
### **3.2. Planta de Tratamiento Secundario de Agua**

Una vez el agua es filtrada en la planta de tratamiento primario es bombeado a la planta de tratamiento secundario para ser desmineralizado en los intercambiadores iónicos, la planta cuenta con: intercambiador catiónico, intercambiador aniónico e intercambiador de lecho mixto; se tiene doble equipo de cada uno ya que mientras una línea de equipos está en operación la otra línea está en regeneración, el cambio se realiza cada inicio de turno (Corbacho & Izquierdo, 1977).

En los intercambiadores se eliminan al máximo los iones que contiene el agua para que, una vez tratada, sea usada como agua de procesos, esta agua es altamente pura con 0 ppm de dureza. En este proceso se utilizan resinas que tienen la capacidad de intercambiar selectivamente sus propios iones por los iones del agua, pasado un cierto periodo las resinas se agotan al haber intercambiado todos sus iones y pasan a la etapa de regeneración mediante reacción con productos químicos.

## Figura 10

Diagrama de bloques de la planta de tratamiento secundario de agua



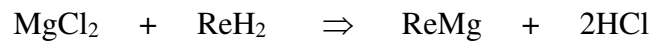
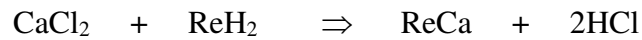
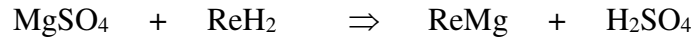
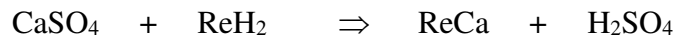
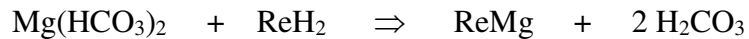
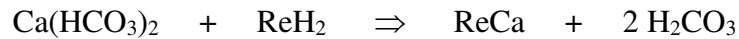
El agua filtrada que proviene de la planta de tratamiento de agua primario, ingresa al intercambiador de cationes (contiene una resina catiónica Lewatit S-100), en donde se retienen todos los elementos catiónicos (ej.:  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Sr}^{++}$ ,  $\text{Fe}^{++}$ ,  $\text{Mn}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ , etc.), luego pasa por el intercambiador aniónico (contiene una resina aniónica Lewatit M-600), donde se retiene todos los elementos aniónicos (ej.:  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{NO}_3^{-2}$ ,  $\text{Cl}^{-1}$ ,  $\text{PO}_4^{-3}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SiO}_3^{-2}$ ), el agua que sale del intercambiador aniónico ingresa al desgasificador, al cual se le añade solución de sulfito de sodio ( $\text{NaSO}_3$ ) para eliminar el oxígeno del agua que es muy perjudicial para las tuberías de las calderas, luego el agua (agua de calderos) es enviada hacia las plantas de síntesis y ácido nítrico. El agua (agua de procesos) que sale del intercambiador mixto es enviada a la planta de electrolisis del agua.

### 3.2.1. Intercambiador Catiónico

El agua filtrada llega directamente al intercambiador catiónico (ver fig. 11), ingresa por la parte superior donde entra en contacto con las resinas de hidrogeno ( $\text{ReH}_2$ ), sus principales características son:

- Reduce la dureza porque remueve los iones de calcio y magnesio.
- Reduce los sólidos totales disueltos, debido a que se eliminan los iones del agua.
- El pH se torna ácido, porque los iones hidrogeno de la resina pasan al seno del agua.

Las reacciones que suceden dentro del intercambiador catiónico son:



**“sales con cationes” “Resina de H” “Resina gastada” “Ácidos”**

Tal como se observa en las reacciones los cationes de calcio y magnesio son captados por la resina desprendiendo de esta forma cationes de hidrogeno, estos al encontrarse con los aniones de carbonatos, sulfatos y cloruros forman ácidos, originando que esta corriente torne a un pH ácido.

## Figura 11

*Recipiente del intercambiador catiónico, lado B*



*Nota.* Mientras el lado B del intercambiador catiónico está en funcionamiento, el lado A está en proceso de regeneración.

Una vez que se encuentran saturadas las resinas de hidrogeno con iones de calcio y magnesio, se procede a la regeneración con una solución diluida de ácido fuerte, el ácido nítrico es utilizado en planta.

### **3.2.2. Intercambiador Aniónico**

El agua procedente del intercambiador catiónico pasa al intercambiador aniónico, en el cual los aniones de sales disueltas en el agua son atrapados por las resinas aniónicas, a las que denominaremos  $R(OH)_2$ .

Las principales características del intercambio aniónico son:

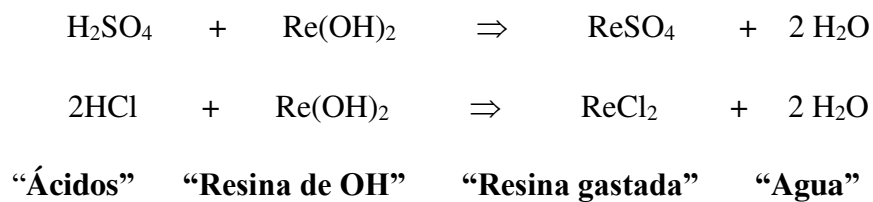
- Es utilizado para neutralizar el agua que sale ácida del Intercambio Catiónico debido a la formación de HCl y/o H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.
- No reduce la dureza, porque no remueve los iones calcio y magnesio.
- Reduce los sólidos totales disueltos, porque se elimina la sílice y el ion hidrogeno.
- El pH tiende a tomarse neutro, por la misma razón anterior.

**Figura 12**

*Vista del intercambiador aniónico, lado B*



Las principales reacciones del intercambiador aniónico se basan en la neutralización de los ácidos formados en el intercambiador catiónico:



Como se observa, en las reacciones los ácidos son neutralizados por las resinas aniónicas, que al final llegan a saturarse, por tanto, deben ser regeneradas. También se forman moléculas de agua que van a formar parte del agua que se procesa.

Las resinas aniónicas con iones sulfato, cloruro y carbonato se regeneran con una solución diluida de una base fuerte, la solución utilizada en planta es el hidróxido de sodio.

### **3.2.3. Desgasificador.**

El agua libre de iones a la salida del intercambiador aniónico pasa a un desgasificador donde se elimina el oxígeno y el ácido carbónico, debido a que se añade sulfito de sodio (NALCO) como secuestrante de oxígeno. El ácido carbónico que fue producido en el intercambiador catiónico es un compuesto muy inestable que fácilmente se descompone en agua y  $\text{CO}_2$  (Cabezas Oruna , 2012).

En el desgasificador también se añade NaOH diluido, para evitar la corrosión de las tuberías dentro del circuito de los calderos. El pH adecuado oscila entre 11 y 12, en base a los resultados del análisis se adecua el flujo de la dosificación del NaOH.

El agua en el desgasificador pasa por cascadas introduciendo vapor al mismo tiempo, en la base se tiene el agua hirviendo a más de  $104\text{ }^\circ\text{C}$  y una presión de 0.2 atm para lograr una desgasificación óptima (Corbacho & Izquierdo, 1977). El producto que sale de este desgasificador se denomina agua de calderos y es utilizado en las calderas de la planta de síntesis de amoníaco, planta de ácido nítrico (caldera Lamont) y la caldera auxiliar.

Como podemos ver en la figura 13, el desgasificador está ubicado en el segundo nivel de la planta de tratamiento secundario. Y se aprecia las tuberías de ingreso de insumos químicos, vapor de agua y el agua a tratarse.



### **Figura 13**

*Vista de perfil del desgasificador*



*Nota.* Al desgasificador ingresa permanentemente los insumos químicos para acondicionar y enviar a los calderos.

#### ***3.2.4. Intercambiador de Lecho Mixto.***

El agua de la pureza más alta se requiere en la planta de electrolisis, este debe estar libre de toda impureza, es por esta razón que además de pasar por los intercambiadores catiónicos y aniónicos debe de pasar por un intercambiador de lecho mixto el cual contiene resinas acidas y alcalinas en un solo intercambiador, aquí se logra eliminar por completo los iones que no fueron retenidos en los intercambiadores anteriores.

## Figura 14

Vista del tanque de lecho mixto de la línea D



Los intercambiadores se controlan por conductividad. Se tiene un sensor a la salida del tanque aniónico y el otro a la salida del tanque de lecho mixto, los cuales se puede visualizar los valores en el panel de control y tomar la decisión para ver si las resinas ya se agotaron y la necesidad de ser regenerados.

### 3.2.5. Inspección de la Planta.

Al inspeccionar la planta se debe tener en cuenta que:

- La presión de entrada de agua a los intercambiadores debe tener una presión normal de 6 kg/cm<sup>2</sup> con un mínimo de 4 kg/cm<sup>2</sup> y un máximo de 7 kg/cm<sup>2</sup> (ver manómetro).
- La presión de vapor de la caldera auxiliar debe tener una presión normal de 5-6 kg/cm<sup>2</sup>, con un mínimo de 3 kg/cm<sup>2</sup> y un máximo 7 kg/cm<sup>2</sup> (ver manómetro de presión de la caldera).
- El nivel del desgasificador debe tener un nivel del desgasificador normal entre 50-60% con un nivel mínimo de 20% y un máximo de 95%.

- Las presiones de agua de calderos hacia Síntesis tienen una presión normal entre 3-4 kg/cm<sup>2</sup> con un mínimo de 2 kg/cm<sup>2</sup> y un máximo de 6 kg/cm<sup>2</sup>; lo mismo para el ácido nítrico con una presión normal entre 24-25 kg/cm<sup>2</sup>, con un mínimo de 20 kg/cm<sup>2</sup> y un máximo de 30 kg/cm<sup>2</sup>. La presión de salida a electrolisis tiene una presión normal entre 4-6 kg/cm<sup>2</sup>, con un mínimo de 1.5 kg/cm<sup>2</sup> y un máximo de 7 kg/cm<sup>2</sup>.
- El nivel del tanque de dosificación de “NALCO” (metabisulfito con sulfito de sodio) en el tanque es de 3 kg mezclado aforado a 300 litros, que corresponde al 1% en peso, con una densidad de 1.010 g/cc.
- El nivel del tanque de dosificación de NaOH, con un volumen de 250 litros preparado al 0.67% en peso y una densidad de 1.008 g/cc.
- Para corregir anomalías, si las hay, se debe cambiar de línea en tratamiento secundario (si está agotado la línea A), Línea A por Línea B.
- Para arrancar la caldera auxiliar (en caso de parada de la planta de ácido nítrico o cuando se necesite) se debe controlar el nivel de agua de caldera (en el visor de agua), nivel de tanque de petróleo (en el indicador de nivel), arrancar la bomba de petróleo, esperar un tiempo de 5 a 10 minutos para el calentamiento del petróleo. La presión en la tubería de petróleo debe llegar más o menos a 1.8 kg/cm<sup>2</sup>; posteriormente arrancar la caldera. Después del arranque más o menos de 5 a 8 minutos, regular el aire de acuerdo a la necesidad o presión de vapor que se necesite.

### ***3.2.6. Regeneración de Intercambiadores Iónicos.***

#### ***3.2.6.1. Determinando la Concentración de la Lejía Sódica (NaOH).***

Primeramente, se debe tomar muestra de NaOH en una probeta de 100 ml, luego determinar la concentración mediante el densímetro y por medio de la tabla respectiva, determinar volumen de lejía a través de la tabla de concentración para luego marcar con el indicador de nivel en el tanque de NaOH (color morado).

#### ***3.2.6.2. Determinando la Concentración de Ácido Nítrico (HNO<sub>3</sub>).***

Primeramente, se debe tomar muestra de HNO<sub>3</sub> en una probeta de 100 ml, luego determinar la concentración y densidad mediante el densímetro y por medio de la 1° tabla respectiva, determinar volumen de ácido a través de la tabla de concentración para luego marcar con el indicador de nivel en el tanque de HNO<sub>3</sub> (color rojo).

#### ***3.2.6.3. Lavado e Inyección de Ácido en la Masa Intercambiante de Cationes.***

Se debe realizar un retro lavado de las resinas por 15 minutos, luego dosificar ácido nítrico hasta tener 275 litros que es equivalente a 200 kg. Y con una solución de ácido con agua de 1.033 de densidad midiéndolo en un densímetro, finalmente se le reposa con agua por espacio de una hora donde en el contómetro se consume aproximadamente 5m<sup>3</sup> de agua para el enjuague de la columna y limpiar el resto de ácido que pueda quedar como remanente.

#### ***3.2.6.4. Lavado e Inyección de Hidróxido de Sodio en la Masa Intercambiante de Aniones.***

Se realiza un retro lavado por 15 minutos, controlando la masa intercambiante, después se dosifica con hidróxido de sodio según a la densidad (1.17-1.20) por espacio de una hora mezclando con 9m<sup>3</sup> de agua; posteriormente se apertura el de ingreso de agua, después se

determina la densidad de la solución con el densímetro (debe estar entre 1.030 a 1.032), posteriormente se apaga la bomba dosificadora de lejía sódica y se deja abierta la línea de agua para su limpieza por 4 minutos.

Para eliminar el hidróxido de sodio se debe abrir la línea de agua a  $8\text{m}^3/\text{h}$ , luego se analiza el valor +P después de haber pasado aproximadamente  $5\text{m}^3$  de agua; analizando el valor +P y si llega a 5 Mral/G significa que el lavado ya está terminado y hacer circular el agua por 10 minutos. El circuito queda listo para poder entrar en servicio.

### ***3.2.7. Regeneración de Intercambiadores de Lecho Mixto.***

#### ***3.2.7.1. Lavado y Separación de la Masa Inter cambiante.***

Se debe realizar un retro lavado masa intercambiante durante 15 a 20 minutos aproximadamente.

#### ***3.2.7.2. Regeneración de la Masa Intercambiante de Aniones.***

Se debe calentar el agua con vapor y arrancar la bomba dosificadora de lejía sódica, se determina la densidad mediante un densímetro sacando la solución de lejía diluida (la densidad debe estar en un rango 1.030-1.032 g/cc.), se controla la temperatura de la lejía más o menos  $40^\circ\text{C}$  en el termómetro; al terminar la inyección de lejía sódica desconectar la bomba dosificadora (en el volumen previsto), durante 5 a 10 minutos.

#### ***3.2.7.3. Eliminación de hidróxido de Sodio.***

Se pone un flujo de agua de  $2.7\text{ m}^3/\text{h}$ , aumentar el flujo a  $3,5\text{ m}^3/\text{h}$  aproximadamente después de 30 minutos, determinar el valor +P sacando 100 ml de muestra.

#### ***3.2.7.4. Regeneración de la Masa Intercambiante de Cationes.***

Se debe dosificar de ácido nítrico y ajustar a la posición deseada luego determinar la densidad de la solución con el densímetro (debe encontrarse en un rango entre 1.032 y 1.033), por un periodo de 5 minutos.

#### ***3.2.7.5. Eliminación del Ácido Nítrico.***

Ajustar un flujo de agua de  $0,75 \text{ m}^3/\text{h}$ , determinar el valor de “m” y si el valor de  $m = 0.3 \text{ Mval/L}$ , el lavado está terminado, posteriormente se deja con un nivel de agua por encima de la Masa de intercambio.

### **3.3. Planta de Electrolisis del Agua.**

La planta de electrólisis del agua produce hidrógeno y oxígeno gaseoso mediante la reacción de descomposición del agua. Esto se logra gracias a la alta intensidad y tensión de corriente eléctrica continua que se conecta directamente a las celdas electrolíticas. En Industrias Cachimayo, actualmente se cuenta con 6 electrolizadores alcalinos que operan de manera continua para obtener  $\text{O}_2$  y  $\text{H}_2$  con una pureza del 99.9%.

El hidrógeno generado se utiliza en la planta de síntesis de amoníaco para obtener  $\text{NH}_3$ , mientras que el oxígeno se utiliza de diferentes formas. Una parte se emplea en la planta de ácido nítrico para mejorar la conversión de  $\text{NO}$  a  $\text{NO}_2$ , mientras que la otra se ventila a la atmósfera o se embotella según los requerimientos de los clientes, ya sea para uso de oxígeno medicinal o industrial.

#### ***3.3.1. Introducción Técnica.***

El hidrógeno es una esperanza energética global. Su uso ha comenzado gracias al desarrollo tecnológico y la necesidad de energía limpia y sostenible. Sin embargo, su implementación

requiere una infraestructura adecuada y su camino hacia el futuro no está garantizado. Actualmente se cuenta con diferentes tecnologías para la obtención del hidrógeno.

**Figura 15**

*Denominación de tipos de hidrógeno, según la tecnología empleada en su producción*



*Nota.* En Industrias Cachimayo se produce el hidrógeno verde. Tomado de (Merino, 2022)

De todos estos métodos, el hidrógeno verde es una opción más factible y prometedora que hace uso de fuentes renovables y la electrólisis para producir hidrógeno. Sin embargo, su principal desafío es la disponibilidad de una gran cantidad de electricidad, lo cual limita su generación a momentos de excedente de energía renovable (Merino, 2022).

### **3.3.1.1. Obtención de Hidrógeno Mediante Electrolisis.**

La electrólisis del agua es uno de los métodos más directos para obtener hidrógeno y oxígeno gaseoso con un alto grado de pureza. El hidrógeno es el elemento de mayor interés práctico, ya que se utiliza principalmente en refinerías de hidrocarburos y en la producción de síntesis de amoníaco (Alonso Vante, 2002) y actualmente se está impulsando su uso como vector energético eficiente y no contaminante.

Existe, a nivel industrial, dos versiones diferentes para el proceso de ruptura electrolítica de la molécula de agua para producir hidrogeno con alto grado de pureza, a saber (Alonso Vante, 2002):

- Electrolisis del agua con electrolito alcalino usando un diafragma poroso para separar los compartimentos anódicos y catódicos.
- Electrolisis del agua con membrana o electrolito polimérico solido donde se utiliza una membrana de intercambio iónico, conductora de protones.

La adecuada elección de los materiales de los electrodos y la configuración del sistema, con el control preciso de la cantidad de electricidad suministrada, son aspectos fundamentales para garantizar una eficiente electrólisis del agua y obtener hidrógeno y oxígeno gaseoso de alta pureza. (Miranda Sánchez & Quishpi Chasiluisa, 2021).

### ***3.3.1.2. Electrolito.***

La solución de agua y electrolito que se suministra al electrolizador para llevar a cabo la reacción de descomposición no está determinada por el valor de pH. Tanto si es una solución alcalina como ácida, el producto final obtenido será siempre hidrógeno y oxígeno gaseoso. Sin embargo, se prefiere utilizar soluciones alcalinas debido a que su efecto corrosivo en los materiales de construcción de las celdas es menor en comparación con las soluciones ácidas. A pesar de que la conductividad obtenida con un electrolito alcalino es considerablemente menor que la obtenida con un electrolito ácido, se elige esta opción debido a la mayor tolerancia de los materiales a las condiciones alcalinas. (Chicas Padilla & Guzmán Cruz, 2021).



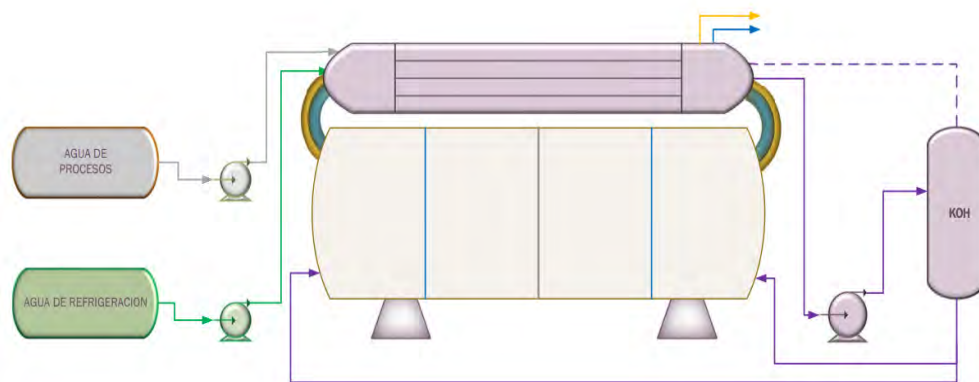
### 3.3.2. Descripción de Operación de la Planta

En general, el proceso de electrólisis ocurre cuando se introduce agua químicamente pura junto con electrolito al electrólitor, en la parte inferior. En esta etapa, tiene lugar una reacción no espontánea en la cual el agua se disocia en hidrógeno y oxígeno mediante una reacción redox. Los gases resultantes son capturados por separado y dirigidos hacia el tanque de separación, ubicado encima del electrólitor. Este tanque cuenta con una sección para separar el hidrógeno y otra para separar el oxígeno. Una vez que estos gases se han separado de la solución de KOH, son enviados a unos colectores de hidrogeno y oxigeno donde se combinan con los gases obtenidos de otros electrólitor. Posteriormente, estos gases son enfriados en un intercambiador de calor de tubo concéntrico.

Como podemos ver en la figura 16, se aprecia las partes principales que tiene la pila electrolítica.

**Figura 16**

*Esquema general de las pilas electrolíticas*



La supervisión de la planta se restringe actualmente a los controladores importantes de puntos de medición, como la temperatura, la pureza de los gases, la intensidad y la tensión de

corriente, los cuales se monitorean durante las inspecciones rutinarias. Todos los puntos críticos para el funcionamiento del electrólitor se someten instrumentos de automatización y cualquier anomalía en el servicio se notifica de inmediato mediante señales ópticas y acústicas. En caso de producirse perturbaciones, el sistema se desconecta automáticamente.

### **3.3.3. *Electrólitor Alcalino.***

Actualmente, se cuenta con 6 electrolizadores alcalinos. Cada electrolizador está dividido en 4 bloques, con 135 celdas en cada uno, donde ocurren las reacciones redox. El funcionamiento global de cada electrolizador se realiza a una corriente promedio de 6000 Amperios y 500 Voltios. Estos electrolizadores operan a alta presión, con los gases resultantes saliendo a una presión de 30 kg/cm<sup>2</sup> y a una temperatura de 83 °C a 90 °C.

#### **Figura 17**

*Vista del electrólitor Q6*



*Nota. El electrolitor Q-6, es el más nuevo que se tiene en planta de los 6 electrolitores*

Estos electrolizadores son de tipo tanque (monopolares), que consiste en un tanque horizontal grande de acero al carbono. Los electrodos son laminas planas cilíndricas del mismo material y con polaridades alternadas, los ánodos son recubiertos con níquel y envueltos por asbestos para separar el oxígeno generado del hidrógeno catódico, esta separación evita que se mezclen estos dos gases y generen una atmosfera explosiva. Esta configuración corresponde a un conjunto de celdas en paralelo que tienen una canalización especial que hace que estos gases generados sean enviados por separado a los tanques de separación, el electrolizador trabaja a aproximadamente 2 voltios y con grandes corrientes, que dependen del tamaño y del número de electrodos utilizados (Alonso Vante, 2002).

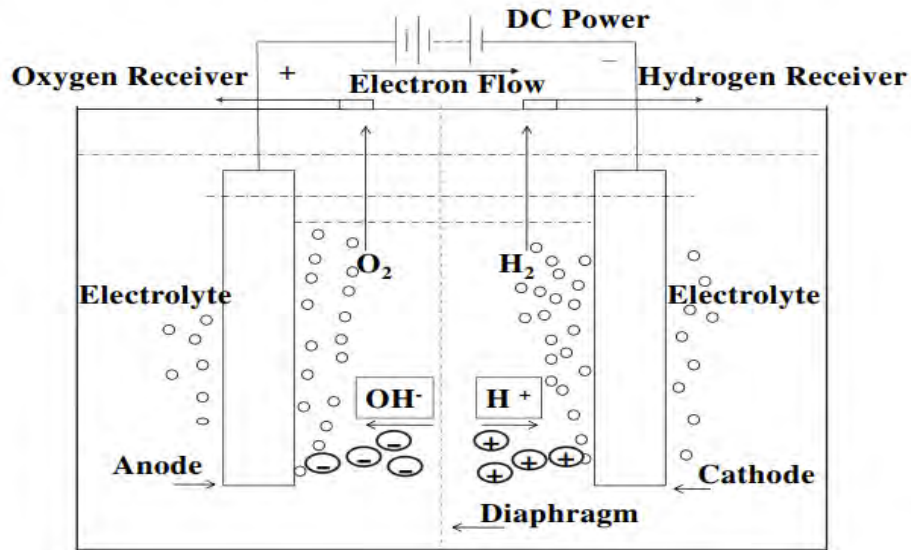
#### ***3.3.3.1. Química de la Electrolisis del Agua.***

Se aplica una corriente continua (CC) para mantener el equilibrio eléctrico y los electrones fluyen desde el terminal negativo de la fuente de CC hacia el cátodo, donde los electrones son consumidos por los iones de hidrógeno para formar hidrógeno. Para mantener la carga eléctrica en equilibrio, los iones hidróxido (aniones) se transfieren a través de la solución electrolítica al ánodo, donde los iones hidróxido ceden electrones y estos electrones regresan al terminal positivo de la fuente de CC (Zeng & Zhang, 2009).

En la figura 18, se muestra de forma gráfica lo descrito en el párrafo superior.

**Figura 18**

*Ilustración esquemática de un sistema básico de electrolisis del agua*



*Nota.* En la figura se aprecia la dirección de los iones que se dirigen a los electrodos.

Además, en un electrolitor, 1 amperio produce  $0.111 \text{ m}^3$  de hidrogeno; entonces en 6000 amperios se produce  $666 \text{ m}^3$  de hidrogeno. Es por eso que en un electrolitor se produce  $666 \text{ m}^3$  a  $720 \text{ m}^3$  de hidrogeno por hora, esta variación se debe que en algunos electrolitores varía el amperaje.

#### **3.3.4. Separador de gases.**

Los gases de hidrogeno y oxigeno producidos en la reacción anterior salen arrastrando legía a una temperatura de aproximadamente  $90^\circ\text{C}$  y pasan a los separadores, estos separadores están constituidos por un serpentín y un nivel de lejía que debe mantenerse en un 50% de forma constante, para eso existe reguladores de niveles y conexión de tuberías por la parte inferior entre separadores. Por el serpentín pasa agua de refrigeración intermedia (agua de procesos más nitritos) a  $15 \text{ m}^3/\text{h}$ , y enfría al gas y a la lejía en cada separador hasta llegar a una temperatura de  $56^\circ\text{C}$ .

### Figura 19

*Separadores de gases de oxígeno (azul) y nitrógeno (amarillo)*



*Nota.* Los separadores de gases se ubican en la parte superior de la pila electrolítica.

Por la parte superior del separador de hidrógeno ingresa agua de procesos (conductividad < 1uS/cm), para reponer el agua que se consume en la reacción.

#### **3.3.5. Refrigeración de gases.**

Una vez que los gases de hidrogeno y oxigeno salen purificados de los tanques de separación es conectado a una tubería de matriz principal para cada gas y a esto se va uniando el flujo de gases de cada electrolitor, al final de ello esta tubería es conectado a un intercambiador de calor de tubos concéntricos donde estos gases son enfriados con el agua de refrigeración intermedia.

**Tabla 3**

*Temperaturas de ingreso y salida de los flujos en el refrigerador de gases.*

<b>Flujos</b>	<b>Ingreso (°C)</b>	<b>Salida (°C)</b>
---------------	---------------------	--------------------

<b>Hidrógeno</b>	65	25
<b>Oxígeno</b>	65	25
<b>Refrigerante intermedio</b>	20	60

*Nota.* Estas temperaturas llegan a variar ligeramente según la variación de las condiciones de operación.

### **3.3.6. Refrigeración intermedia.**

El refrigerante intermedio debe de contar con un aditivo, nitrito de sodio, como agente anticorrosivo, para evitar el daño del material de tuberías dentro del circuito, el análisis de la concentración de este aditivo se realiza periódicamente.

Una vez que este refrigerante intermedio haya refrigerado la solución de KOH y los productos ( $H_2$  y  $O_2$ ), tiene que ser enfriado para nuevamente retomar su ciclo, para lo cual se cuenta con un intercambiador de placas donde nuevamente es enfriado con el agua de la torre de refrigeración.

**Figura 20**

*Intercambiador de calor de placas para el refrigerante intermedio*



*Nota.* Se cuenta con dos intercambiadores de calor de placas, para evitar cortes por falta de agua de refrigeración cuando se realice limpieza de ellas.

### **3.4. Planta de fraccionamiento del Aire.**

La planta de fraccionamiento de aire en Industrias Cachimayo S.A. tiene como objetivo principal separar el nitrógeno del oxígeno y otros gases presentes en pequeñas cantidades en la corriente de aire, mediante el proceso de destilación criogénica. Para lograrlo, se somete la corriente de aire a un ciclo de refrigeración que reduce su temperatura hasta alcanzar un equilibrio entre estado líquido y vapor. A continuación, los componentes se separan en una columna de destilación mediante diferencias de la temperatura de ebullición. El nitrógeno líquido obtenido se almacena en un tanque criogénico y el gaseoso es enviado a la planta de síntesis de amoníaco, mientras que el oxígeno es aprovechado para enfriar la corriente de entrada de aire y posterior a ello se libera a la atmósfera.

La planta tiene una capacidad instalada de 2500 Nm<sup>3</sup>/h de nitrógeno gas de 99.99% de pureza y de 40 Nm<sup>3</sup>/h de nitrógeno líquido.

#### ***3.4.1. Filtro de admisión de aire***

El filtro de admisión de aire desempeña un papel crucial al proteger el compresor CENTAC contra partículas sólidas y contaminantes. Su función principal es prevenir el desgaste prematuro de los componentes internos del compresor. Al mantener el aire comprimido limpio y de alta calidad, asegura un suministro confiable y eficiente. Por lo tanto, el filtro de admisión de aire es de vital importancia para el correcto funcionamiento y la prolongación de la vida útil del compresor CENTAC.



El filtro de admisión de aire es un filtro de 2 etapas, tipo seco, que consta de 8 filtros de paneles en cada etapa. Los filtros de la primera etapa pueden ser reutilizados después de ser limpiados, mientras que los filtros de la segunda etapa deben ser desechados. La limpieza o reemplazo de los filtros se realiza cuando se detecta una caída de presión, ya que esto indica que los filtros están saturados y es necesario mantener un flujo de aire adecuado. Esta práctica asegura un rendimiento óptimo del sistema y garantiza que el compresor esté protegido contra partículas y contaminantes no deseados.

### **Figura 21**

*Filtro para el aire ingresado al compresor CENTAC*



*Nota.* El filtro de ingreso se encuentra en la parte interna del aspirador de color azul, la tobera de salida de aire en el costado derecho es para regular la presión del aire comprimido.

#### **3.4.2. Compresor CENTAC.**

La compresión del aire es fundamental ya que, sin aumentar su presión, la temperatura de ebullición no se reduciría lo suficiente para permitir la licuefacción de una fracción del aire. Además, la compresión del aire es necesaria para su posterior expansión, lo cual facilita su



enfriamiento mediante el efecto Joule-Thomson. Este proceso de compresión y expansión del aire es crucial en la producción de aire líquido o en procesos de refrigeración, donde se busca obtener temperaturas muy bajas. Al comprimir el aire, se incrementa su densidad y se generan las condiciones adecuadas para que, al expandirse, se produzca una disminución significativa de la temperatura. De esta manera, la compresión del aire desempeña un papel esencial en numerosas aplicaciones industriales y científicas que requieren temperaturas extremadamente bajas (Beltrán Sempértegui & Pulla Iñiguez, 2021).

El compresor CENTAC es una unidad centrífuga que consta de cuatro etapas de compresión, impulsada por un motor eléctrico. Antes de ingresar al compresor, el aire atmosférico pasa a través de un filtro de admisión para su purificación. Luego, el aire purificado ingresa al compresor CENTAC, donde se regula el flujo mediante una válvula de mariposa FIC-2, que en estado estacionario está abierto 51%. A medida que el aire avanza a través de las etapas de compresión, su presión aumenta gradualmente. Específicamente, la segunda etapa del compresor CENTAC logra una presión de succión de  $0.36 \text{ Kg/cm}^2$ , la tercera etapa alcanza una presión de succión de  $1.15 \text{ Kg/cm}^2$  y la cuarta etapa alcanza una presión de succión de  $3 \text{ Kg/cm}^2$ . Finalmente, a la salida del compresor el aire sale a  $6 \text{ Kg/cm}^2$ , Cada etapa del compresor juega un papel crucial en el proceso de compresión, contribuyendo a elevar la presión del aire.

Al comprimir el aire se eleva la temperatura del flujo, por tal razón se cuenta con intercoolers en la salida de cada etapa de compresión, los cuales tienen como objetivo reducir la temperatura cercana a los  $28^\circ\text{C}$ , las primeras etapas tendrán una temperatura ligeramente menor. Esto se hace para evitar el sobrecalentamiento del gas y prevenir posibles problemas estructurales en el compresor. Para lograr este enfriamiento, se utiliza un flujo de agua refrigerante con un caudal aproximado de  $189 \text{ l/min}$ .

A medida que el flujo de aire va elevando su presión, la humedad del aire comprimido puede condensarse. Por lo tanto, después de cada intercambiador de calor, se purga el agua condensada para evitar daños al siguiente compresor en la secuencia. Esto se hace para garantizar que el aire comprimido permanezca seco y libre de líquidos.

Después de la salida del compresor, se encuentra una válvula para regular la presión de la corriente de aire. Esta regulación se logra mediante la apertura controlada de la válvula de tipo mariposa FIC-1, que en estado estacionario se encuentra con una apertura del 80%, que permite liberar el aire hacia la atmósfera. También se tiene un aftercooler, cuya función es eliminar las trazas restantes de humedad. Es necesario eliminar por completo la humedad en la corriente para evitar cristalizaciones en los equipos posteriores donde trabajan con temperaturas mucho más bajas.

## Figura 22

*Vista del compresor CENTAC*



*Nota.* La tubería de mayor diámetro es la tubería de ingreso del filtro al compresor y la delgada es la salida del aire comprimido. Las tuberías laterales es el ingreso y salida del líquido refrigerante.

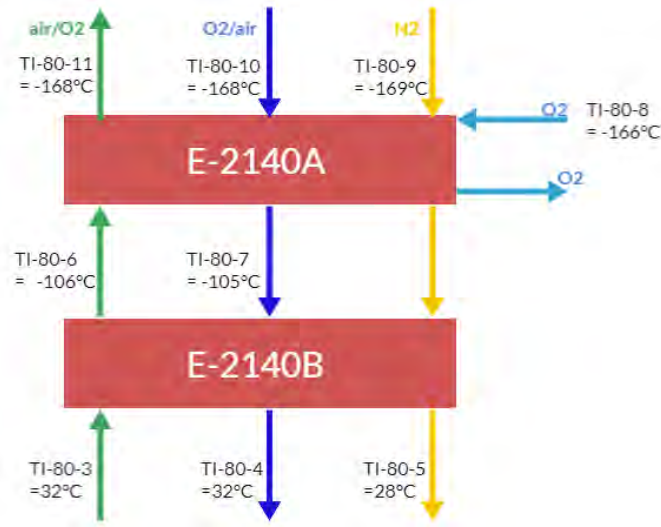
### ***3.4.3. Intercambiadores de Calor E-2140A y E-2140B.***

Los intercambiadores de calor están conectados en serie en donde se aprovechan de las temperaturas bajas que salen del destilador, tanto de la línea del nitrógeno como del oxígeno transfiriéndolo al flujo de aire comprimido.

En la figura 23, se muestra las temperaturas de las corrientes de entrada y salida para el aire, oxígeno y nitrógeno.

**Figura 23**

*Diagrama de bloques de los intercambiadores de calor*



*Nota.* Las líneas verdes son el ingreso del aire, las líneas azules de O<sub>2</sub> y las amarillas de N<sub>2</sub>.

Cuando la temperatura del aire desciende demasiado, el CO<sub>2</sub> presente en el aire comienza a condensarse en el primer intercambiador (E-2140B) y a cristalizarse en el siguiente intercambiador (E-2140A). Para evitar esta cristalización, se cuenta con un juego de 4 válvulas KV (time valve) en la entrada del intercambiador y 4 válvulas check en la salida. Cada 5 minutos, estas válvulas cambian la línea de suministro de aire a la línea de oxígeno y viceversa, evitando así la acumulación y cristalización de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O en los intercambiadores; ya que al hacer este cambio la línea de oxígeno arrastra todos estos contaminantes y es expulsado a la atmosfera. Esta medida es crucial para mantener un rendimiento óptimo y evitar posibles obstrucciones en el sistema. Mientras que la línea de nitrógeno después de ceder calor a la línea de aire es enviado a la planta de síntesis de amoníaco, debido que ya es el producto final enriquecido.

#### **3.4.4. Destilador Criogénico**

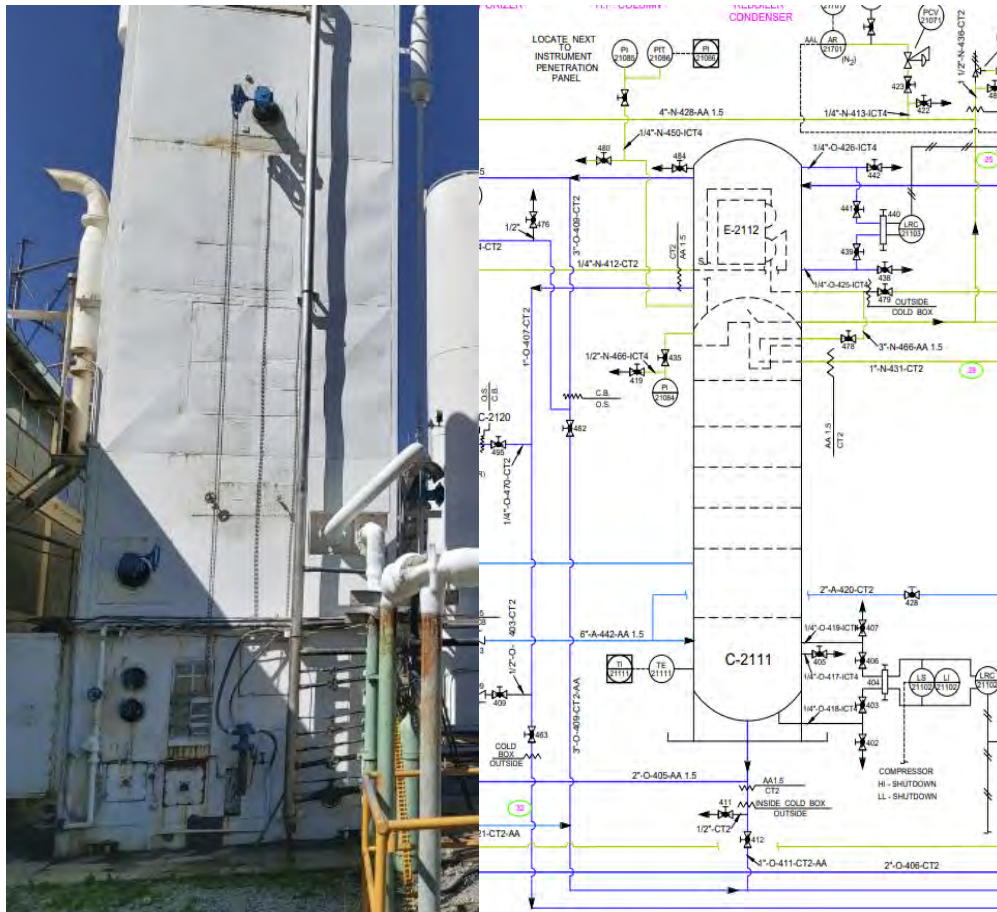
Aunque la diferencia en los puntos de ebullición de los componentes mayoritarios del aire, como el O<sub>2</sub> (-183°C), N<sub>2</sub> (-196°C) y Ar (-186°C), no es significativa, y no existen puntos azeotrópicos, estos componentes pueden separarse mediante destilación fraccionada (Magaña Mortel & Alfonso, 2020).

El aire, una vez que sale del intercambiador de calor E-2140B a una temperatura de -168°C, se encuentra parcialmente licuado y se dirige hacia el destilador criogénico de alta presión HP (High pressure) que opera a una presión de 5.45 kg/cm<sup>2</sup>, cuenta con 40 platos diseñados específicamente para obtener nitrógeno puro. A medida que el aire asciende a través de los platos, el componente más volátil, el nitrógeno, se va enriqueciendo gradualmente, hasta alcanzar en el domo, nitrógeno casi puro. Este gas se dirige al recipiente de baja presión LP (Low Pressure), que mediante un circuito de tuberías es condensado parcialmente debido que por la parte externa de las tuberías se encuentra oxígeno líquido a 2.3 kg/cm<sup>2</sup> y 80% de nivel proveniente del fondo del destilador, previamente eliminados los hidrocarburos en el adsorbedor. De ahí el gas nitrógeno sigue su recorrido y pasa por el licuefactor E-2150 y los intercambiadores de calor E-2140A y E-2140B, donde cede calor; y el nitrógeno condensado se envía al tanque LIN con una apertura de la válvula de 54% y el resto del líquido retorna al destilador para mantener un equilibrio líquido vapor en los platos.

Por otro lado, los platos ubicados por debajo del plato de alimentación en el destilador van concentrando oxígeno a medida que se desciende en la columna. El oxígeno de baja concentración obtenido en el fondo del destilador también se dirige al licuefactor E-2150 y, posteriormente, al adsorbedor de hidrocarburos.

**Figura 24**

*Vista de la caja fría y el diagrama P&ID del destilador criogénico*



*Nota.* Dentro de la caja fría se encuentra el destilador, los intercambiadores de calor, el tanque LIN y el adsorbedor de hidrocarburos.

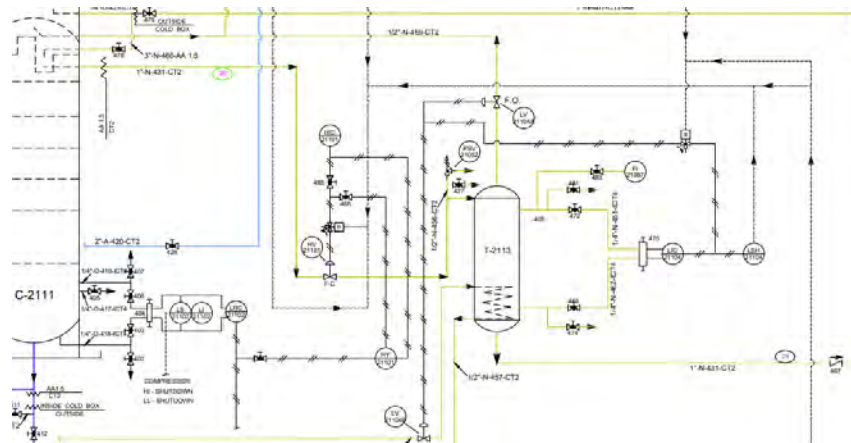
### **3.4.5. Tanque de Transferencia LIN.**

El tanque de transferencia LIN es un recipiente que contiene un serpentín interno presurizado ubicado dentro de la caja fría, el tanque se utiliza para acumular nitrógeno líquido de la columna de alta presión antes de la carga transfiriéndolo intermitentemente al tanque de almacenamiento. El nitrógeno gaseoso caliente usado para presurizar el tanque de transferencia es

extraído de la línea de producto corriente abajo de los intercambiadores y pasa a través del serpentín presurizado. Es luego descargado dentro del circuito recalentador del expandidor.

### Figura 25

Diagrama P&ID del tanque LIN



*Nota.* El tanque LIN está codificado como T-2113 y se encuentra en la parte interna de la caja fría.

Cuando el nivel de líquido en el tanque LIN alcanza el 40%, se procede al cierre automático de las válvulas asociadas al tanque y se inicia la presurización mediante la pequeña gasificación del nitrógeno. Esto ocurre como resultado del calor transferido en el serpentín, hasta alcanzar una presión de 6-7 kg/cm<sup>2</sup>. Posteriormente, esta presión expulsa el líquido hacia el tanque de almacenamiento de nitrógeno líquido.

#### 3.4.6. Tanque de almacenamiento y vaporizadores.

Los tanques de almacenamiento y vaporizadores se usan como respaldo a la planta para asegurar un suministro ininterrumpido de nitrógeno gaseoso a la planta de síntesis de amoníaco, en el caso de que la planta se pare o que haya una excepcional demanda de gas.



El tanque de almacenamiento tiene una capacidad de 22 TM de N<sub>2</sub> líquido a 5.4 kg/cm<sup>2</sup>, su estructura consiste en un tanque interior soportado a su vez por un tanque exterior. El espacio anular entre los tanques está lleno con un aislante en polvo y mantenido en vacío para aislar el tanque interior contra fuga de calor. El vacío puede ser constatado conectando un vacuómetro a la conexión tipo bayoneta en la válvula 506. Si el vacío se ha perdido, una bomba de vacío de suficiente capacidad puede ser anexada a la válvula 507 para evacuar la camiseta.

### **Figura 26**

*Vista del tanque de almacenamiento de nitrógeno líquido*



#### ***3.4.7. Gasificadores de nitrógeno líquido***

Para utilizar el nitrógeno líquido almacenado en el tanque se tienen que calentar hasta convertirse en gas y poder enviar a la planta de síntesis de amoníaco.



Los gasificadores A y B usan vapor para gasificar el nitrógeno. El vapor se provee a un promedio de 750 kg/h a 43 psig. El vapor pasa a través del cuerpo del gasificador donde se condensa, y el nitrógeno líquido pasa a través del tubo. El intercambio de calor resultante gasifica el nitrógeno líquido y lo calienta más o menos a la temperatura ambiente.

### **Figura 27**

*Vista del gasificador de nitrógeno líquido*



*Nota.* El recipiente derecho de color rojo ladrillo es el gasificador A y el de la izquierda es el gasificador B.

#### **3.4.8. Turbina de expansión**

La turbina de expansión es una máquina compuesta de un expansor ensamblado y un compresor de aire centrífugo que están montados en un mismo eje, pero de extremos opuestos. El lado del expansor de la máquina opera en frío y dentro de una envoltura aislada. La caja del cojinete y el lado del compresor de la máquina opera en caliente, esta parte no está aislada.

El lado del expansor consiste en una rueda de impulsión y una tobera de admisión montado en una carcasa. El conjunto de la tobera tiene paletas regulables, las cuales controlan directamente el flujo de entrada y por lo tanto afecta la potencia, la velocidad y la eficiencia del expansor. El gas que proviene del intercambiador E-2140A a  $2.2 \text{ kg/cm}^2$  y  $-151^\circ\text{C}$  lo expande hasta  $0.4 \text{ kg/cm}^2$  enfriando la temperatura del gas hasta  $-174^\circ\text{C}$ , este gas va al licuefactor E-2150, E-2140A y E-2140B que va cediendo calor en su trayectoria en cada uno de los intercambiadores de calor, finalmente es enviado a la atmósfera a  $32^\circ\text{C}$ .

El lado del compresor comprime el aire atmosférico y lo descarga en la atmosfera. Comprimiendo el aire, el compresor realiza trabajo, carga la turbina y extrae la energía (calor) del gas que se expande a través de la turbina.

### **Figura 28**

*Vista del lado caliente del turbo expansor*



*Nota.* El lado caliente del turbo expansor es el compresor y el lado frío es el expansor y se encuentra dentro de la caja fría.

### 3.4.9. Adsorbentes de hidrocarburos.

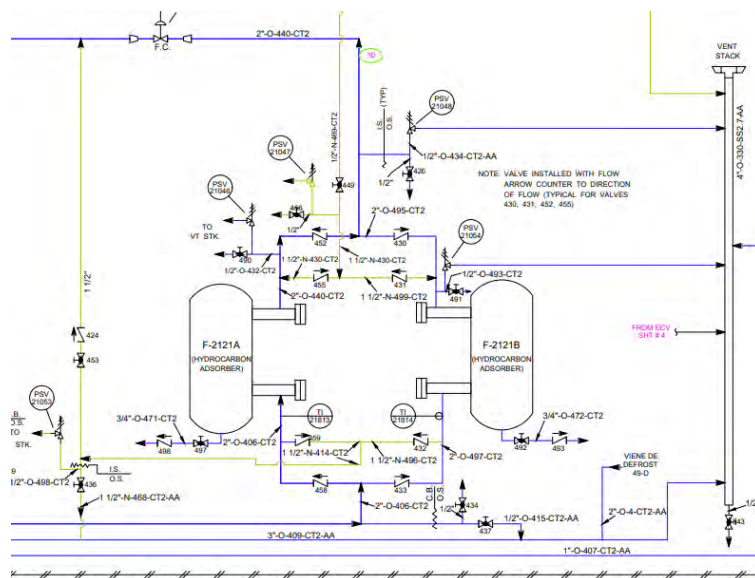
Se tiene 2 adsorbentes de forma cilíndrica que se encuentran de forma vertical ordenados de forma paralela, de manera que un cilindro pueda ser reactivado mientras que el otro está en servicio. Cada cilindro contiene una cama adsorbente de silica gel que elimina hidrocarburos del oxígeno crudo que sale de la columna de baja presión.

El cilindro adsorbedor tiene un filtro de entrada y otro de salida para ayudar a distribuir el flujo y para minimizar el adsorbente arrastrado. Se prevé un tapón de llenado y vaciado para cambiar al adsorbente cuando se requiera.

Estos adsorbentes están conectados al flujo que proviene de la parte inferior del destilador, ya que en esa sección se encuentra una concentración de oxígeno y una mezcla de oxígeno de esta pureza con los hidrocarburos puede generar un riesgo de deflagración. Por esta razón, es necesario eliminarlos como medida de seguridad.

**Figura 29**

*Diagrama P&ID de los adsorbentes de hidrocarburos*



### 3.5.Planta de Síntesis de Amoníaco.

En el año 1918, el químico alemán Fritz Haber (1868-1934) obtuvo el Premio Nobel de Química por sus investigaciones sobre la termodinámica de las reacciones gaseosas; estas investigaciones derivaron, en 1913, en el proceso de producción de amoníaco a escala industrial, que aún hoy se utiliza, y que lleva su nombre: proceso Haber-Bosch (Spath, 2023)

El amoníaco es obtenido industrialmente por el proceso Haber-Bosch utilizando catalizadores de hierro aluminio y níquel; en general el proceso tiene un rendimiento del 15%. Las materias primas son el nitrógeno  $N_2$  y el hidrógeno  $H_2$ .

#### 3.5.1. *Propiedades del amoníaco.*

El amoníaco es un gas alcalino incoloro, es irritante con un olor picante característico, altamente soluble en agua, se evapora rápidamente, poco conductor de electricidad. Es muy poco reactivo debido a los 3 enlaces presentes en el nitrógeno, actúa como un electrolito fuerte, al reaccionar con ácidos forma las sales de amonio.

##### 3.5.1.1. *Propiedades fisicoquímicas.*

En la tabla 2 se aprecia las propiedades fisicoquímicas del amoníaco en condiciones normales.

**Tabla 4.**

*Propiedades fisicoquímicas del amoníaco.*

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Peso molecular	17.03 g/mol
Temperatura de ebullición (1 atm)	-33.4 °C
Temperatura critica	132.44 °C

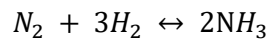
Densidad gas (20°C, 1 atm)	112.77 kg/m <sup>3</sup>
Densidad líquida (20°C, 1 atm)	683 kg/m <sup>3</sup>
Peso específico (1 atm)	0.6
Temperatura de autoinflamación	651 °C

*Nota:* Recuperado de (CIAFA, 2008)

### 3.5.1.2. *Propiedades cinéticas.*

Para la obtención de amoníaco se hace reaccionar hidrógeno gaseoso con amoníaco gaseoso siendo esta reacción reversible con una constante de equilibrio de  $3.6 \times 10^8$  a 25°C. Este alto valor de constante de equilibrio hace que la reacción sea muy lenta.

Cinética química de la síntesis de amoníaco.



Para la reacción existen dos constantes de velocidad para la reacción hacia los productos (k1) y para la reacción hacia los reactantes (k2):

$$k_1 = 1.79 \times 10^4 \exp\left(-\frac{8168}{T}\right) \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{h} \cdot \text{atm}^{1.5}$$

$$k_2 = 2.57 \times 10^{16} \exp\left(-\frac{23853}{T}\right) \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{h} \cdot \text{atm}^{1.5}$$

### 3.5.2. *Descripción General.*

El hidrógeno gaseoso, proveniente de la planta de electrólisis a una presión de aproximadamente 30 kg/cm<sup>2</sup>, arrastra una pequeña cantidad de solución de electrolito (KOH). Si no se eliminara, esto podría dañar los equipos posteriores. Por lo tanto, se elimina en un tanque adsorbente denominado tanque evasil. Luego, el nitrógeno e hidrógeno se mezclan en proporción estequiométrica. Sin embargo, tanto el hidrógeno electrolítico como el nitrógeno de la instalación

de fraccionamiento de aire contienen cantidades mínimas de oxígeno, que su presencia traería grandes daños a los equipos consecuentes para la síntesis de amoníaco. El oxígeno se elimina de la mezcla de gas mediante una depuración fina catalítica en la instalación del tanque de oxo.

La mezcla de gas libre de contaminantes se conduce al compresor de gas de síntesis, donde se comprime en cuatro etapas hasta  $260 \text{ kg/cm}^2$ . Luego se alimenta al convertidor de amoníaco. Dado que solo una parte de la mezcla de  $\text{N}_2$  e  $\text{H}_2$  se convierte en amoníaco durante el primer paso por el convertidor, es necesario un proceso de recirculación. Por lo tanto, se separa el amoníaco del gas no convertido mediante condensación, y el gas no convertido se devuelve al convertidor después de ajustar los parámetros de operación previamente.

En los siguientes subcapítulos 3.5.3.,...,3.5.12., se profundizará a mayor detalle el funcionamiento de cada uno de los equipos que están vinculados en la producción del amoníaco.

### ***3.5.3. Evasil.***

El hidrógeno proveniente de la planta de electrólisis contiene pequeñas concentraciones de KOH que deben eliminarse. Para lograr esto, el hidrógeno se conduce a través de un separador diseñado específicamente. En este separador, las gotas de la solución de KOH se separan de la corriente de gas debido a la caída de presión que ocurre cuando chocan con las placas especiales del separador. El KOH eliminado se recoge en el fondo del recipiente y se purga a través de una válvula reguladora de nivel. El gas pre purificado, libre de KOH, sale del separador en la parte superior y se envía al filtro de evasil.

El evasil es un silicato sintético de sodio-aluminio especialmente seleccionado debido a sus propiedades de adsorción. El evasil tiene una estructura porosa que permite acumular las partículas

de KOH arrastradas en forma de niebla. La regeneración del evasil se lleva a cabo mediante la conducción de agua a través del recipiente del filtro.

Tanto durante la adsorción como durante la regeneración, el flujo se realiza de abajo hacia arriba en el filtro. Además, el diseño del filtro está estructurado de manera adecuada para que el evasil permanezca en su posición y no pueda ser arrastrado por el flujo de gas. Asimismo, se cuenta con un tamiz para evitar la salida del evasil del filtro.

### **Figura 30**

*Tanque de adsorción de KOH*



Nota. Se tiene dos tanques de evasil, uno siempre está de reserva en el momento que se haga la regeneración.

#### **3.5.4. Mezclador proporcional de gas fresco**

Para mantener la proporción de 75% de hidrógeno y 25% de nitrógeno, se realiza un proceso de adición de nitrógeno al hidrógeno, después de que este último ha sido tratado en el evasil. La adición de nitrógeno se lleva a cabo en cantidades determinadas. Antes de formar la mezcla, se utiliza una válvula de diafragma para regular los flujos de los gases. Los dos valores obtenidos de esta medición se transmiten a través de transmisores a un regulador de proporción

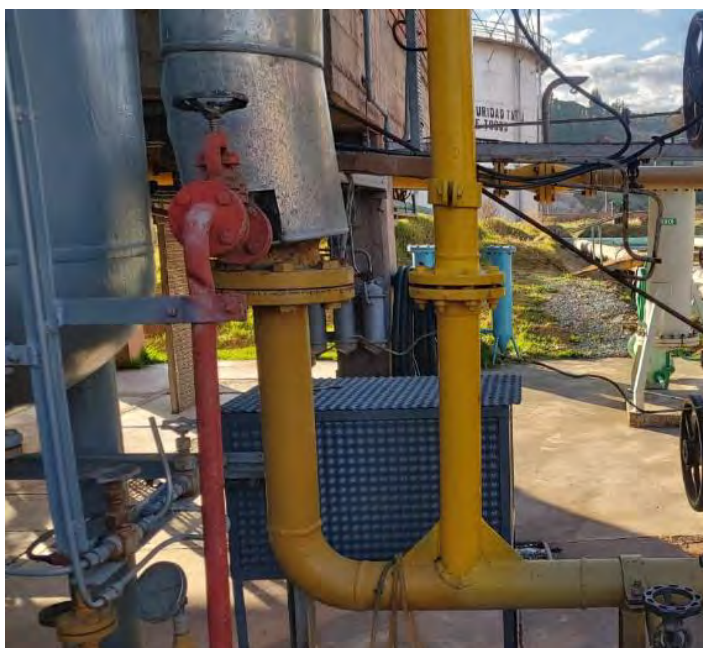


cuantitativa. Este regulador se encarga de ajustar la cantidad de nitrógeno mediante una válvula de regulación, que se encuentra en la tubería de circulación del compresor de nitrógeno. De esta manera, se mantiene la proporción cuantitativa ajustada entre el hidrógeno y el nitrógeno, que aproximadamente es 3300 Nm<sup>3</sup>/h de H<sub>2</sub> y 1100 Nm<sup>3</sup>/h de N<sub>2</sub>.

El objetivo de este proceso es garantizar que la proporción adecuada de gases se mantenga constante durante la preparación de la mezcla. Al regular la cantidad de nitrógeno añadido al hidrógeno, se logra mantener la proporción requerida para la síntesis de amoníaco de manera precisa y controlada.

### **Figura 31**

*Vista del empalme de líneas de N<sub>2</sub> y H<sub>2</sub> para formar la mezcla*



*Nota.* La tubería de color crema es la entra de H<sub>2</sub> y la tubería vertical que se empalma a la línea de H<sub>2</sub> es N<sub>2</sub>



### 3.5.5. *Deoxo*

La mezcla de hidrógeno y el nitrógeno contienen pequeñas cantidades de oxígeno. El hidrógeno electrolítico tiene un porcentaje en volumen de oxígeno del 0.1%, mientras que en el nitrógeno es de 0.01%. Aunque estas cantidades de oxígeno son pequeñas, pueden causar graves daños al convertidor, ya que actúa como un contaminante para el reactor. Por lo tanto, se somete la mezcla de gases a un proceso de purificación fina catalítica conocido como deoxo.

El procedimiento de purificación de gas en el deoxo implica una reacción entre el oxígeno y el hidrógeno mediante el uso de un catalizador de paladio. Esta reacción produce vapor de agua como producto. Sin embargo, se debe tener bajo control la temperatura, ya que es una reacción exotérmica, la temperatura que se debe mantener es 40°C.

La eliminación del KOH en el tanque de evasil es de suma importancia, ya que incluso pequeñas cantidades pueden obstruir la superficie activa y, en casos de cantidades mayores, llegar a dañar el cuerpo elemental del catalizador.

### **Figura 32**

*Vista del recipiente de purificación catalítica "deoxo"*



#### **3.5.6. Compresor BORSIG.**

El gas de síntesis, después de pasar por el proceso de deoxo, se enfría previamente en un intercambiador de calor hasta enfriar el gas de 40°C hasta una temperatura aproximada de 23°C. A continuación, se dirige hacia el compresor de pistón de alta presión Borsig, donde se comprime en cuatro etapas, partiendo de una presión de entrada de 30 kg/cm<sup>2</sup> y llegando a una presión final de aproximadamente 260 kg/cm<sup>2</sup>. Después de cada etapa de compresión, se encuentran intercambiadores de tubos concéntricos, a través de los cuales se enfría el gas comprimido mediante el uso de agua de refrigeración. Además, cada etapa de compresión cuenta con una camisa de refrigeración para evitar el aumento de temperatura del lubricante utilizado.

### Figura 33

*Compresor isotérmico del gas de síntesis de 4 etapas*



Nota. En la imagen se aprecia la 1ra y 2da etapa, al otro extremo se encuentra la 3ra y 4ta etapa; los anillos verdes son camisas de refrigeración para el lubricante.

El compresor es impulsado por un motor asíncrono con acoplamiento rígido, con una potencia de 910 kW, una tensión de 6.6kV y una frecuencia de 60 ciclos.

**Tabla 5**

*Condiciones de operación por etapas del compresor Borsig*

<b>Etapas</b>	<b>Presión de salida (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperatura de entrada (°C)</b>	<b>Temperatura de salida (°C)</b>
<b>1<sup>ra</sup></b>	59	23	110
<b>2<sup>da</sup></b>	125	28	90
<b>3<sup>ra</sup></b>	200	35	60
<b>4<sup>ta</sup></b>	258	20	40

*Nota.* los datos de la tabla se obtuvieron del reporte diario de operarios del día 02/06/2023

### 3.5.7. *Convertidor de amoníaco.*

La formación de amoníaco se realiza según la siguiente ecuación estequiométrica:



Los límites teóricos en los que se puede llevar a cabo la reacción de síntesis de amoníaco, a una temperatura y presión determinadas, están determinados por los valores de equilibrio del amoníaco. Durante este proceso, se genera calor y se reduce el número de moléculas, lo que resulta en un aumento de la concentración de amoníaco en el equilibrio.

En otras palabras, el equilibrio de la reacción de síntesis de amoníaco se ve afectado por los cambios en la temperatura y la presión. A medida que la reacción progresa y se generan más moléculas de amoníaco, el equilibrio se desplaza para favorecer la formación de amoníaco.

La circulación cerrada es una característica distintiva en la síntesis de amoníaco, y se utiliza debido a que el grado de transformación de nitrógeno e hidrógeno en amoníaco es relativamente bajo durante una sola pasada por el reactor. En este tipo de reactor, solo se logra convertir aproximadamente el 13% o 14% del volumen de alimentación en amoníaco.

## **Figura 34**

*Convertidor de amoníaco de 4 escalones para el suministro de gases*



### ***3.5.7.1. Catalizador de Amoníaco.***

Aunque a bajas presiones y temperaturas el amoníaco se encuentra en equilibrio, su formación no se puede observar en la fase homogénea del gas. Sin embargo, mediante el uso de catalizadores específicos, es posible reducir considerablemente las presiones necesarias para la formación de amoníaco.

El elemento principal de los catalizadores industriales para la síntesis de amoníaco es el hierro. Sin embargo, el hierro puro no puede ser utilizado directamente, ya que su actividad disminuiría rápidamente debido a las impurezas presentes en el gas de síntesis. Para aumentar la duración y estabilidad de los catalizadores de hierro, es necesario activarlos. En la práctica, esto se logra mediante la oxidación.

La función específica del catalizador es reducir considerablemente la energía de activación necesaria para la reacción entre el hidrógeno y el nitrógeno. Los catalizadores de amoníaco altamente activados se utilizan a temperaturas de servicio que oscilan entre los 420 y 550 °C.

#### ***3.5.7.2. Cinética de la formación de amoníaco.***

Para determinar las condiciones óptimas de operación de la reacción de síntesis, no basta con conocer únicamente el equilibrio. Es necesario contar con información adicional sobre la velocidad de formación del amoníaco, es decir, cómo una mezcla de hidrógeno y nitrógeno se acerca al equilibrio.

La formación de amoníaco se acelera cuando la mezcla de gases se desvía de su estado de equilibrio, para perturbar este equilibrio y la reacción se dirija hacia los productos se debe tener concentraciones bajas de amoníaco y altas presiones. Además, existe otro efecto que también influye, el cual depende de la temperatura y provoca un incremento en la velocidad de reacción a medida que la temperatura se eleva. Esta tendencia se debe a la energía de las moléculas y se rige por la ley de Arrhenius.

A través del control de la temperatura en los lechos catalíticos, las condiciones del proceso se ajustan para alcanzar velocidades de reacción óptimas o cercanas a ellas. En el convertidor tipo UHDE, se logra regular la temperatura dividiendo el volumen total del catalizador en cuatro escalones y enfriando el gas caliente de reacción entre estas capas mediante la adición de gas frío sin reaccionar.

#### ***3.5.7.3. Proporción entre el hidrógeno y el nitrógeno en el convertidor.***

El rendimiento óptimo del convertidor de amoníaco no se alcanza cuando la proporción estequiométrica de hidrógeno y nitrógeno es de 3:1. La proporción más favorable de hidrógeno y

nitrógeno se encuentra entre 2.5:1 y 2.7:1. Este fenómeno se debe a los procesos sintéticos que tienen lugar en la superficie del catalizador, los cuales se ven facilitados por una presión de nitrógeno más elevada que en el caso de la proporción estequiométrica.

### ***3.5.8. Caldera de recuperación de calor.***

El gas que sale del convertidor con una temperatura de 350°C, se enfría en la caldera de recuperación de calor para aprovechar parte de su calor en la producción de vapor de baja presión, con una presión de aproximadamente 3 kg/cm<sup>2</sup>. El gas se enfría hasta alcanzar una temperatura de aproximadamente 165°C.

La caldera de recuperación de calor está compuesta por un conjunto de serpentines paralelos de alta presión, los cuales están conectados a una entrada y una salida para el gas caliente en circulación. Estos serpentines están sumergidos en agua de alimentación de la caldera.

### **Figura 35**

*Caldera de recuperación de calor, para la producción de vapor*





### **3.5.9. Refrigerador de gases.**

El gas proveniente de la caldera de recuperación de calor es dirigido hacia el refrigerador de gases, donde se lleva a cabo la última etapa de enfriamiento del amoníaco, bajando la temperatura hasta aproximadamente 30 °C, utilizando agua de refrigeración, logrando que, en el refrigerador se produzca la condensación del amoníaco. Al igual que en la caldera de recuperación de calor, el refrigerador también cuenta con un conjunto de serpentines paralelos que están conectados mediante una entrada y una salida para el gas.

#### **Figura 36**

*Refrigerador de gas de síntesis, para condensar el amoníaco*



*Nota.* Se tiene dos intercambiadores de tubo y coraza en U, el gas ingresa por los tubos y el agua de refrigeración por la coraza.

### **3.5.10. Separador de amoníaco.**

El amoníaco líquido, obtenido tras el proceso de condensación en el refrigerador, es conducido al separador de amoníaco. En este recipiente, el amoníaco condensado se separa en la



parte inferior, manteniendo un nivel de  $\text{NH}_3$  al 50% y en caso baje el nivel a 48% suene la alarma. Sin embargo, debido a las condiciones de operación, todavía queda una pequeña cantidad de amoníaco sin condensar, que sale en la corriente de los gases. Para hacer frente a esto, el gas resultante del separador se expande mediante una válvula reguladora de nivel hacia el recipiente de expansión.

**Figura 37**

*Separador de amoníaco líquido del gas de síntesis*



**3.5.11. Recipiente de expansión.**

Casi todo el gas que se ha disuelto en el amoníaco líquido a la presión del convertidor se libera en el recipiente de expansión, expandiendo la presión hasta  $25 \text{ kg/cm}^2$ . El gas de expansión está saturado de amoníaco correspondiente a la temperatura del amoníaco líquido. Después de la compresión el gas es introducido de nuevo en la circulación del gas de síntesis. El amoníaco líquido es conducido al depósito de amoníaco por una válvula reguladora de nivel.

## **Figura 38**

### *Recipiente de expansión*



### **3.5.12. Bomba de circulación de gas**

Los gases no transformados, incluyendo los residuos de amoníaco no condensado en el refrigerador de gases, son succionados por una bomba de circulación y conducidos al convertidor de amoníaco. Debido a la baja diferencia de presión que el compresor de circulación debe compensar, regular la cantidad de gas a transportar sería difícil. Por esta razón, se ha instalado una tubería de circulación que permite que el exceso de gas fluya de regreso al lado de entrada del refrigerador de gases, en la dirección de aspiración.

**Figura 39**

*Bomba de circulación Borsig*



**3.5.13. Depósito de almacenamiento para el amoníaco.**

El amoníaco líquido se transporta de forma continua desde el recipiente de expansión hasta el depósito de almacenamiento. Este depósito tiene una capacidad de almacenar hasta 100 toneladas de amoníaco líquido y consta de 4 tanques cilíndricos horizontales. Cada tanque tiene un diámetro exterior de 2 metros, una longitud de 15 metros y un volumen de 45 m<sup>3</sup>. Estos recipientes están diseñados para soportar una presión de 20 kg/cm<sup>2</sup> y permiten el almacenamiento del amoníaco a temperatura ambiente. Cada tanque está equipado con un indicador de nivel y las estructuras necesarias.

Es importante destacar que, a una presión de 20 kg/cm<sup>2</sup>, el amoníaco se encuentra en estado líquido a temperaturas inferiores a 50 °C.

**Figura 40**

*Tanque de almacenamiento de amoniaco.*



### **3.6. Planta de Ácido Nítrico.**

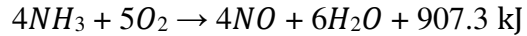
#### **3.6.1. Descripción General.**

##### **3.6.1.1. Método de Ostwald.**

El método basado en la oxidación catalítica del amoníaco fue patentado en 1902 por Wilhelm Ostwald. Donde las materias primas para obtener el ácido nítrico son: el amoníaco que por lo general es obtenido por una planta Haber-Bosch y la otra materia prima es el oxígeno, ambos deben de estar en estado gaseoso y con una relación molar de 4 a 5 respectivamente (Martin Martin, 2016).

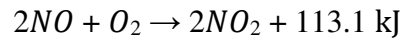
El proceso consta de 3 pasos, que son las siguientes:

- Oxidación de  $NH_3$  a  $NO$  (catalizado con platino y rodio).



Es una reacción exotérmica y se utiliza el platino/rodio como catalizadores (a una temperatura aproximada de 850°C), el cual actúa absorbiendo los gases en sus superficies y así ayuda a que se produzca mayor contacto entre los reactantes.

- Oxidación de  $NO$  a  $NO_2$  (sin catalizador). Es una reacción lenta.



El gas obtenido en la primera reacción se enfría y se hace reaccionar con oxígeno para obtener  $NO_2$ . Esta reacción es más favorable a bajas temperaturas y altas presiones; se trata también de una reacción exotérmica.

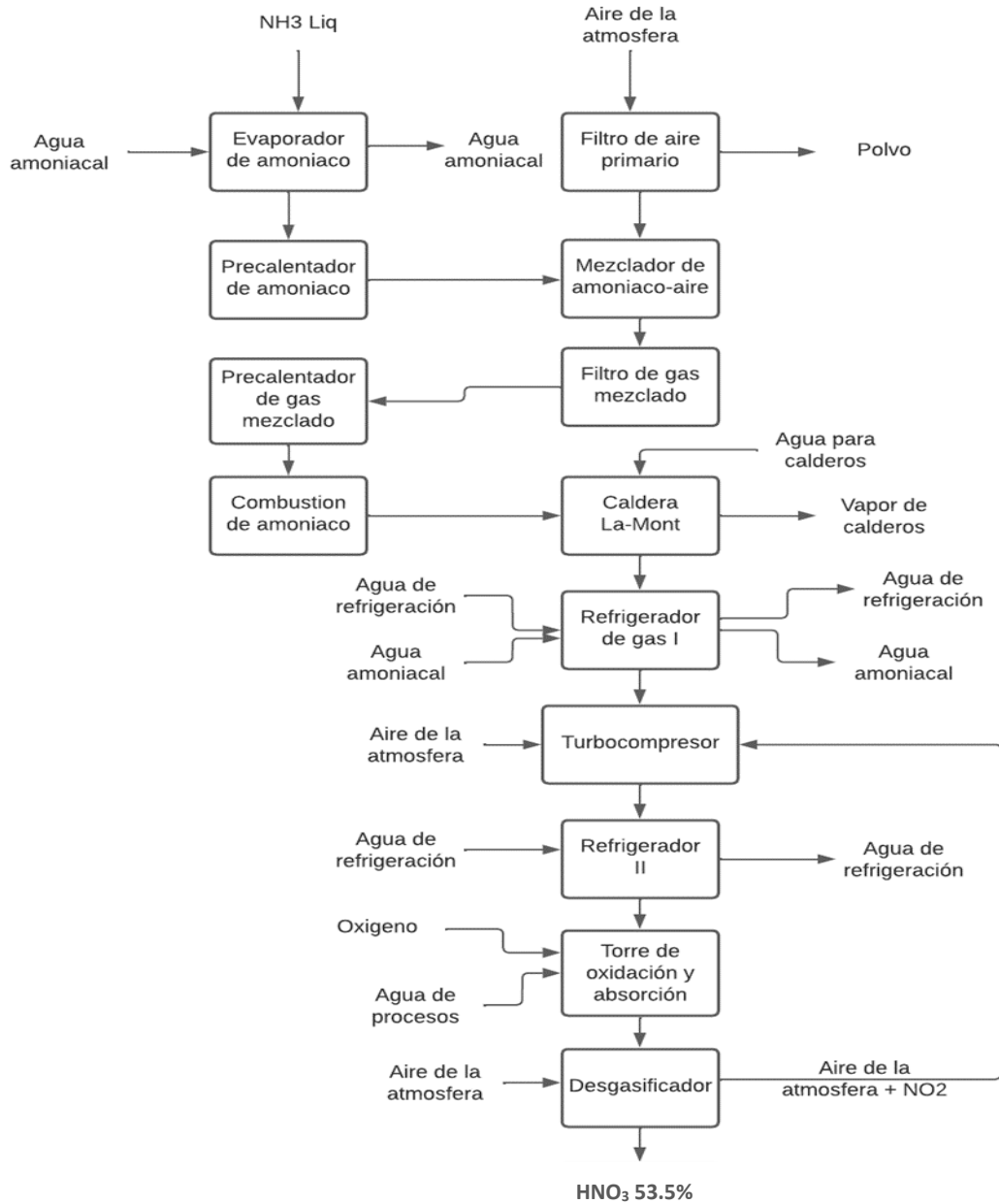
- Absorción con agua para la producción de ácido nítrico. Este paso conlleva a la formación del ácido nítrico mediante torres continuas de absorbedores reduciéndose el  $NO_2$  a  $NO$ . En la columna tiene lugar tanto la absorción como reacción. También ingresa al absorbedor el  $N_2O_4$  (dímero del  $NO_2$ ) por una zona diferente del absorbedor.



### 3.6.1.2. Diagrama de Bloques del Proceso

Figura 41

Diagrama de bloques de la obtención de ácido nítrico



### ***3.6.2. Evaporación de amoníaco.***

En el evaporador, se evapora una cantidad de 1059 kg/h de amoníaco líquido a una presión de 4 atm, lo que corresponde a una temperatura de ebullición de  $-2^{\circ}\text{C}$ . Se genera un volumen de 1373 Nm<sup>3</sup>/h de amoníaco en forma de gas.

El evaporador se presenta en forma de una caldera de tubos horizontales, por los cuales circulan 60 m<sup>3</sup>/h de agua amoniacal al 15% como medio de calefacción. El agua ingresa a una temperatura aproximada de  $10^{\circ}\text{C}$  y sale a una temperatura cercana a los  $5^{\circ}\text{C}$ . Una bomba de circulación impulsa el agua de amoníaco a través del circuito, que incluye el evaporador y el segundo escalón del refrigerador de gas I.

En el refrigerador de gas I, el agua de amoníaco absorbe el calor necesario y enfría al máximo los gases de combustión.

### ***3.6.3. Pre calentamiento de amoníaco.***

El gas NH<sub>3</sub> se encuentra a una temperatura de  $-2^{\circ}\text{C}$  debido a la presión de evaporación de 4 atm. Sin embargo, existe el riesgo de que la válvula de regulación se congele debido a la descomposición a una columna de agua de 250 mm, lo cual provocaría una disminución de la temperatura de aproximadamente  $10^{\circ}\text{C}$ . Para evitar esto, se ha instalado un precalentador de amoníaco que mantiene la temperatura a  $20^{\circ}\text{C}$  después de la descomposición.

### ***3.6.4. Filtro de aire primario***

El compresor aspira el aire primario a presión atmosférica y lo dirige a través de la tubería de aspiración hacia la instalación. Para eliminar el polvo presente en el aire, se utiliza un filtro de aire diseñado para manejar un caudal de 11000 Nm<sup>3</sup>/h. El filtro consta de 108 mangas de filtro, cada una protegida por una tela metálica y con una longitud de 2.3 m y un diámetro de 200 mm.

El filtro se divide en 6 cámaras, que se pueden desconectar y limpiar de forma independiente. La limpieza de las mangas de filtro se realiza manualmente mediante un dispositivo de golpeo, y el polvo se acumula en un cajón ubicado en la parte inferior del filtro. Es importante controlar la presión dentro del filtro para evitar sobrepasar los límites permitidos. Si la tela del filtro se daña, es necesario reemplazar las mangas de filtro por nuevas.

#### ***3.6.5. Mezcla de amoníaco – aire.***

Para lograr la mezcla adecuada, se debe asegurar que el contenido de amoníaco en el gas mezclado sea aproximadamente del 11.5% en volumen. Esto se controla mediante un regulador de mezcla. En caso de que el contenido de amoníaco exceda el límite permitido, se activa un cierre rápido mediante un contacto en el indicador de proporción.

El mezclador opera de manera que el amoníaco ingresa a través de un número específico de tubos de 24 mm.

#### ***3.6.6. Filtro de gas mezclado.***

La planta está equipada con dos filtros de gas mezclado que desempeñan la función de realizar una filtración fina del gas. Cada filtro cuenta con 301 bujías de cerámica, las cuales tienen una longitud de 1.0 m y un diámetro de 60/40 mm. Estas bujías son cruciales para retener partículas y asegurar la calidad del gas antes de su uso.

#### ***3.6.7. Precalentador de gas mezclado.***

La planta está equipada con dos precalentadores de gas mezclado que tienen como objetivo alcanzar la temperatura deseada en la red de distribución. Se prevé un calentamiento de la mezcla a aproximadamente 80°C. Este calentamiento se logra utilizando vapor a una presión de 7



atmósferas y una temperatura de 340°C. Cada precalentador cuenta con una superficie de calefacción de 35 m<sup>2</sup>, lo cual garantiza un eficiente intercambio de calor.

**Figura 42**

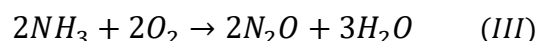
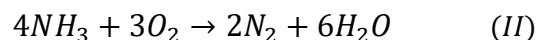
*Precalentador de gas mezcla*



**3.6.8. Combustión de amoníaco.**

En la planta de producción de HNO<sub>3</sub>, se utilizan dos reactores con un diámetro de 2.8 m. Cada reactor consta de una campana, un anillo intermedio y un faldón horno. La cantidad de amoníaco y aire se controla mediante un medidor de flujo de gas. Cada reactor de combustión está equipado con tres redes de catalizador de platino 90% paladio 5% y rodio 5%.

El amoníaco se somete a combustión en las redes de platino, generando óxido de nitrógeno. La temperatura de los gases de combustión alcanza aproximadamente los 830 °C. En el reactor, ocurren las siguientes reacciones químicas:



La combustión se controla de tal manera que la reacción II ocurre solo en un 3% aproximadamente. Esto significa que el rendimiento de la combustión según la reacción I es de aproximadamente el 97%. Sin embargo, la reacción III, que es indeseable, puede ocurrir a temperaturas más bajas que las de operación, lo cual debe evitarse.

### ***3.6.9. Caldera La-Mont.***

La cantidad de calor que se libera en el reactor por la combustión se aprovecha en una caldera L'Mont para la producción de vapor. La caldera se compone de un recalentador, un evaporador, un economizador, una camisa de chapa portante, un domo de evaporación, una bomba eléctrica y una bomba accionada por vapor para la circulación de agua caliente, así como tuberías y válvulas.

### Figura 43

*Visor de la caldera L'Mont*



*Nota.* El manto rojo que se observa por el visor es el catalizador platino-rodio, que se encuentra sobre los 330°C.

Los gases calientes ingresan a la caldera a una temperatura aproximada de 830 °C y se enfrían a medida que atraviesan el sistema, saliendo con una temperatura aproximada de 150 °C. La alimentación de agua se realiza a través de un depósito de agua de alimentación con una temperatura aproximada de 102 °C. La bomba de agua de alimentación, accionada eléctricamente y con una altura de carga de aproximadamente 5 m, impulsa el agua a través de los tubos del economizador hacia el domo de evaporación.

El nivel dentro del domo de evaporación se mantiene constante mediante un regulador de nivel que controla la entrada de agua de alimentación. La bomba de circulación de agua caliente, accionada eléctricamente, impulsa el agua desde el domo de evaporación a través del evaporador

en un circuito cerrado. El caudal de circulación se indica mediante un flujómetro de circulación con contactos de máximo y mínimo, generando una alarma en caso de desviaciones.

En caso de una interrupción en el caudal, se activa automáticamente la bomba de circulación de agua caliente accionada por vapor. El vapor saturado generado en el domo de agua fluye a través de la tubería de vapor saturado hacia los recalentadores, donde se recalienta a una temperatura de vapor caliente de aproximadamente 350 °C. La presión de circulación de vapor en la instalación es de aproximadamente 4.4 TM/h, con una presión de 15 atm y una temperatura de 350 °C.

#### **Figura 44**

*Domo de separador de fases*



#### **3.6.10. Refrigerador de gas I**

El gas que sale de la caldera La-Mont se dirige al refrigerador de gas I, el cual consta de dos partes. En la primera parte, los gases de combustión se enfrían desde 150 °C hasta 35 °C

mediante tubos verticales por los que circula agua de refrigeración y agua de amoníaco. Se requiere aproximadamente 135 m<sup>3</sup>/h de agua de refrigeración para este proceso.

En la segunda parte, se utiliza agua de amoníaco proveniente del evaporador para enfriar el gas a una temperatura de aproximadamente 20 °C, elevando la temperatura del agua de amoníaco de 5 °C a 10 °C. Durante este proceso, se produce la condensación del vapor de agua contenido en el gas. El condensado, que contiene aproximadamente un 1-3% de ácido nítrico, se almacena en el depósito de condensación y se impulsa mediante una bomba hacia la torre de absorción V.

Además, la bomba de condensación impulsa aproximadamente 2 m<sup>3</sup>/h de condensado a través de dos boquillas de inyección ubicadas en la entrada del refrigerador de gas I. Este pulverizado de condensación, a una presión de 12 atm, se utiliza para lavar la instalación y eliminar el amoníaco en caso de averías en el servicio. La superficie total del refrigerador es de 260 m<sup>2</sup>.

Después de pasar por el refrigerador de gas I, el gas se dirige al compresor. En esta tubería se encuentra una chapaleta que permite regular la carga de la instalación mediante control remoto. En caso de fallos en la instalación, se cierra automáticamente. Además, se encuentra una válvula de seguridad de vacío antes del refrigerador para proteger la instalación de un vacío excesivo que podría producirse debido a un manejo incorrecto de los dispositivos de cierre durante el funcionamiento del compresor.

### ***3.6.11. Turbocompresor con accionamiento por electromotor***

A la vista de las condiciones de servicio existentes, se considera económica para la instalación una presión de absorción de 1.8 atm. Esta presión es generada por el compresor de NO, el cual consta de un turbocompresor, un engranaje y un motor eléctrico. La velocidad del grupo compresor es de 8190 rpm, mientras que la del motor de accionamiento es de 1787 rpm.

En la tubería de aspiración del compresor, se combina la corriente de gas proveniente del refrigerador I con el aire secundario. El aire secundario se obtiene parcialmente del ambiente y pasa a través de la torre de desgasificación. La cantidad de aire secundario es aproximadamente de 4250 Nm<sup>3</sup>/h. Este aire aporta el oxígeno necesario para la oxidación del NO y la formación de NO<sub>2</sub>.

La cantidad total de gas que debe ser impulsada por el compresor es de aproximadamente 15500 Nm<sup>3</sup>/h, con una composición de:

**Tabla 6**

*Composición en % volumen de los gases que son impulsados por el turbocompresor*

Componentes	% volumen
NO	9.2
O <sub>2</sub>	9.2
N <sub>2</sub>	78.6
H <sub>2</sub> O	3

*Nota.* Los valores mostrados en la tabla es un promedio de los porcentajes que se trabaja en estado estacionario.

La regulación del caudal de impulsión se realiza de forma automática mediante una chapaleta ubicada en la tubería de aspiración, la cual es controlada desde la sala de control. Es importante asegurarse de que el canal de impulsión del ventilador no caiga por debajo del límite de bombeo, ya que esto podría ocasionar daños a la instalación y al propio ventilador.

Con el fin de evitar la acumulación de nitrato o nitrito amónicos en el compresor, se ha previsto realizar inyecciones periódicas de condensado de vapor en la tubería de aspiración. Este condensado se inyecta desde un depósito de almacenamiento mediante bombas.

El gas comprimido se dirige al sistema de absorción, y en la tubería de aspiración se ha instalado una chapaleta de retención para evitar el retroceso del gas y el funcionamiento inverso del compresor en caso de fallos en la instalación.

El compresor es impulsado por un motor eléctrico, cuyo rendimiento máximo es de 1100 kW, y el rendimiento normal es de 815 kW.

**Figura 45.**

*Turbo compresor de gas NO*



### ***3.6.12. Refrigerador de gas II***

El refrigerador de gas II cumple la función de enfriar el gas de oxidación que sale del turbo-compresor a una temperatura aproximada de 155 °C, reduciéndola a 60 °C. Este refrigerador está diseñado con una configuración de corriente transversal y tubos verticales, a través de los cuales circula el agua de refrigeración.

Debido a las bajas temperaturas y a la presión de 1.8 atm, se produce una intensa oxidación en el refrigerador de gas II. Como resultado de este proceso, se forma un condensado ácido con



una concentración del 30%. Este condensado se dirige específicamente entre las cámaras 5 y 6 hacia el sistema de absorción.

### ***3.6.13. Torre de oxidación y absorción***

La Oxidación es de  $\text{NO} + \text{O}_2$  a  $2\text{NO}_2$  y la absorción se da  $3\text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O}$  a  $2\text{HNO}_3 + \text{NO}$  en el proceso de formación de ácido nítrico, se utiliza un sistema de 8 torres que incluye refrigeradores de ácido, una bomba de ácido y un recipiente de nivel. En estas torres, el gas se somete a oxidación y luego se absorbe en agua. Cada torre tiene un diámetro de 3.4 m y una altura variable. Este sistema permite la producción eficiente de ácido nítrico a partir del gas oxidado.

La altura de las torres de oxidación y de absorción son:

**Tabla 7**

*Altura de las torres de oxidación*

Torres	Altura (m)
Torre de oxidación y torre de absorción 1:	20.2
Torres de absorción 2 y 3	19.8
Torres de absorción 4 y 5	19.4
Torres de absorción 6 y 7	19

Las torres de oxidación y absorción están dispuestas en forma de escalones, con una diferencia de altura de 400 mm entre ellos. Esto permite que el ácido producido se conduzca de un pozo al otro por gravedad. Para garantizar el paso libre entre los escalones, se utilizan recipientes de nivel que mantienen el nivel de ácido adecuado. Los escalones están llenos de anillos Rashing y se rocían con ácido en circulación, lo que permite la recolección de calor y el almacenamiento

del ácido en los pisos intermedios de las torres. Desde allí, el ácido se conduce a los recipientes de nivel o a la bomba de ácido, que lo impulsa a través de los refrigeradores de placas hacia los diferentes escalones.

En la torre de oxidación, los gases de óxido azoico ingresan a una temperatura de aproximadamente 70°C. La oxidación ocurre principalmente en los primeros dos escalones, y en el tercer escalón se alcanza una concentración de ácido del 53%. En la torre de absorción, se realiza la absorción de dióxido de nitrógeno y se continúa la oxidación de óxido de nitrógeno. El ácido formado en cada escalón fluye desde el último escalón hasta el tercer escalón. Las torres de absorción 4 y 6 funcionan con flujo cocorriente, mientras que las torres 1, 2, 3, 5 y 7 funcionan en contracorriente. El ácido final se extrae del tercer escalón.

En la última torre se agrega aproximadamente 2.2 m<sup>3</sup>/h de agua de proceso. Las condensaciones débilmente ácidas del refrigerador de gas I se dirigen al octavo escalón. Las condensaciones de ácido del 30% del refrigerador de gas II se conducen desde el rebose del sexto escalón hasta el quinto escalón. En la tubería de aspiración, frente a cada bomba de ácido, se encuentra un filtro para garantizar un flujo adecuado.

## **Figura 46**

### *Torres de oxidación y absorción de la planta de ácido nítrico*



#### ***3.6.14. Desgasificador de ácido***

Con el objetivo de reducir el contenido de  $\text{NO}_2$  libre en el ácido, se impulsa el ácido crudo desde el tercer escalón hacia el desgasificador de ácido, donde se le insufla aire en contracorriente. El aire necesario para este proceso se aspira mediante el compresor y se recircula nuevamente a la sección de absorción junto con los óxidos azoicos contenidos en él. La cantidad de aire se mide y puede regularse mediante una chapaleta teledirigida. En caso de una parada no planificada de la instalación, esta chapaleta se abre automáticamente para permitir que el compresor absorba el aire necesario a través de la tubería de aire secundario.

#### ***3.6.15. Tanque de almacenamiento***

Desde el desgasificador de ácido, el ácido desgasificado se dirige hacia los tanques de almacenamiento. Se cuenta con 2 tanques, cada uno con una capacidad de  $380 \text{ m}^3$ . Desde estos

tanques, el ácido finalizado es impulsado hacia la planta de nitrato de amonio mediante una bomba, según las necesidades requeridas.

### **Figura 47**

*Tanques de almacenamiento de ácido nítrico*



## **3.7. Planta de Nitrato de Amonio**

### ***3.7.1. Descripción general del proceso de arranque de planta***

La unidad de neutralización y evaporación existente se modificará el flujo de materias primas, por parte del operario con el fin de producir la cantidad requerida de solución de nitrato de amonio según del producto a obtener (grado ANFO, grado técnico, fertilizante o para emulsión). Esta modificación implica ajustar los parámetros operativos y los flujos de entrada de materia prima, como el ácido nítrico y el amoníaco, para obtener la concentración deseada de nitrato de amonio en la solución.

El operario realizará ajustes en la unidad de neutralización para garantizar la proporción adecuada entre el ácido nítrico y el amoníaco en la mezcla. Además, controlará la temperatura y

la presión del reactor de neutralización para favorecer la reacción química y obtener una neutralización eficiente.

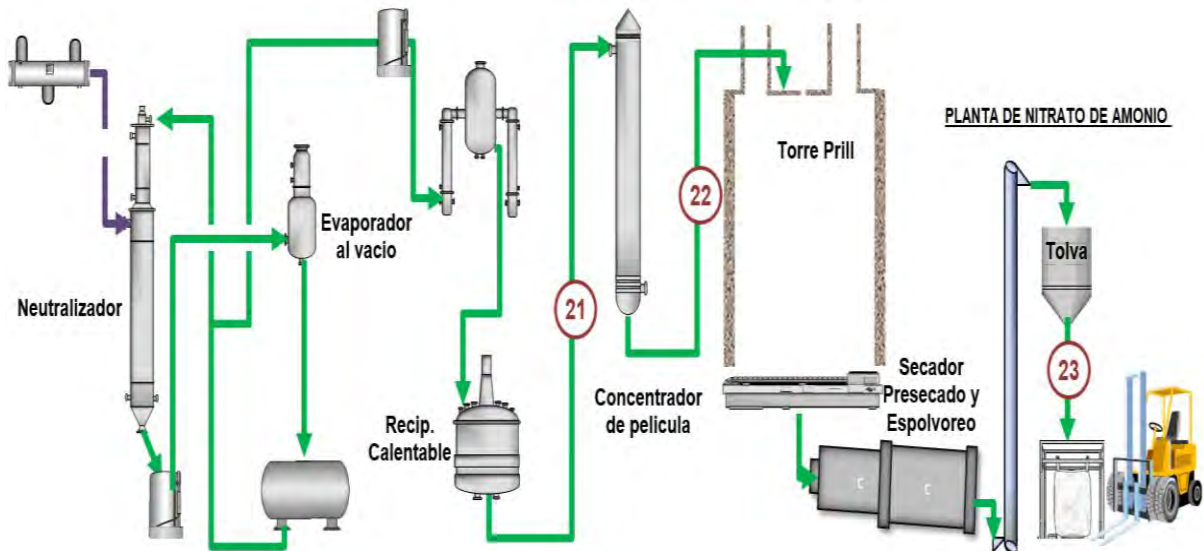
Una vez finalizada la etapa de neutralización, la solución de nitrato de amonio pasará a la unidad de evaporación. Aquí, el operario ajustará la configuración y los parámetros de operación para eliminar el exceso de agua y concentrar la solución de nitrato de amonio a la concentración deseada.

Es importante que el operario siga las instrucciones y los procedimientos establecidos para garantizar la seguridad durante las modificaciones realizadas en las unidades de producción. Además, se deben realizar pruebas de control de calidad en la solución de nitrato de amonio resultante para asegurar que cumple con las especificaciones requeridas antes de su posterior uso o almacenamiento.

La capacidad de modificar la unidad de neutralización y evaporación existente para adaptarse a las necesidades de producción permite ajustar la producción de solución de nitrato de amonio de manera eficiente y flexible, optimizando así el proceso de fabricación.

**Figura 48**

*Diagrama esquemático de la planta de nitrato de amonio*



### 3.7.2. Reacción en la columna de neutralización

De acuerdo con la ecuación de la reacción:



Se hace reaccionar las dos materias primas, amoníaco a 0.75 TM/h y ácido nítrico a 5.10 TM/h ambos a 49.4°C y 19.2°C de temperatura, respectivamente. Para evitar un recalentamiento de la solución de nitrato de amonio, esta reacción exotérmica se realiza en solución ya formada, que actúa como tampón para el calor al absorber el calor de la reacción como calor perceptible.

Es importante evitar un recalentamiento de la solución de nitrato de amonio (NASOL) durante esta reacción exotérmica. Por eso, el NASOL que sale del reactor a 95°C es enviado al recipiente del evaporador y este, a su vez, es enviado al recipiente para bombas. Finalmente, se bombea una parte de NASOL desde este recipiente de las bombas de vuelta al reactor para refrigerar la temperatura, mientras que la otra parte se envía al evaporador de vacío.

De esta manera, se evita que la temperatura se eleve a niveles peligrosos y se mantiene la estabilidad del proceso. De igual forma el analista de calidad está monitoreando permanentemente la relación de ácido nítrico y amoníaco en la reacción.

Es importante destacar que el amoníaco se suministra en forma líquida y se evapora antes de introducirlo en el proceso. Esto se lleva a cabo mediante un proceso de calentamiento controlado, donde el amoníaco líquido se convierte en gas y se alimenta en la reacción en forma continua.

El control del recalentamiento y la evaporación del amoníaco son aspectos críticos para mantener un proceso seguro y eficiente en la producción de nitrato de amonio.

#### **Figura 49**

*Vista de la columna de neutralización (color anaranjado)*



### **3.7.3. Área húmeda**

En el área húmeda de la planta de nitrato de amonio, se lleva a cabo la concentración del nitrato de amonio mediante la eliminación del agua presente en el producto. Para lograr esto, se utilizan varios equipos esenciales, como el separador de humedad al vacío, el recipiente calentable, el recipiente para bombas, el tanque de dilución de finos y el concentrador de película.

#### **3.7.3.1. Concentrador con vapor de calefacción**

Para lograr la concentración de la solución de nitrato de amonio (NASOL) a aproximadamente un 85%, se requiere vapor de calefacción a una presión de aproximadamente 12 bar absolutos. Este vapor se genera mediante la estrangulación de vapor a 15 bar absolutos.

Dado que se dispone de un suministro limitado de vapor a alta temperatura (aproximadamente 340 °C) con una presión de 15 bar absolutos, este vapor se enfría en primer lugar mediante inyección de agua de alimentación en un refrigerador. El volumen de agua inyectada se controla mediante un regulador de temperatura. Después de este enfriamiento, el vapor alcanza una temperatura de aproximadamente 200 °C y se estrangula de 15 a 12 bar, lo que asegura que el vapor se mantenga seco.

La calefacción de los equipos y las tuberías de la fusión se conecta a un sistema de presión intermedia separado. El vapor a aproximadamente 12 bar se estrangula nuevamente a 9 bar, y en este punto, el vapor tiene un punto de rocío de aproximadamente 372 °C. Esto garantiza que la fusión no se recalentará y se mantiene dentro de los límites de temperatura seguros.

En caso de que falle el regulador de vapor, se interrumpe el funcionamiento del concentrador para evitar situaciones inseguras. Por lo tanto, se ha implementado un sistema de regulación de vapor adicional. Si el vapor estrangulado supera los 14 bar, se interrumpe el



suministro de vapor. Del mismo modo, si la temperatura del vapor excede los 210 °C, también se detiene la alimentación de vapor.

Estas medidas de control y regulación del vapor aseguran un funcionamiento seguro y controlado del concentrador durante el proceso de concentración de la fusión de nitrato de amonio.

### ***3.7.3.2. Evaporador al vacío***

El separador de humedad al vacío desempeña un papel fundamental en la eliminación del exceso de humedad de la solución de nitrato de amonio. Este equipo crea un vacío que ayuda a extraer el agua presente en la solución, asegurando así que el nitrato de amonio alcance la concentración deseada.

### ***3.7.3.3. Tanque de dilución***

Este paso es especialmente importante cuando se tiene nitrato de amonio en polvo que no cumple con las especificaciones requeridas. En lugar de desecharlo, se lleva a cabo la reprocesamiento al introducirlo nuevamente en el tanque de dilución de finos. Aquí, el nitrato de amonio en polvo se mezcla con agua para diluirlo y lograr la concentración deseada.

Este proceso de dilución y ajuste de la concentración permite aprovechar nuevamente el nitrato de amonio en polvo que estaba fuera de las especificaciones, evitando así desperdicio y maximizando la eficiencia del proceso. Una vez que se logra la concentración adecuada, el nitrato de amonio diluido puede reintegrarse al flujo de producción y continuar con las etapas subsiguientes.

## **Figura 50**

*Vista del tanque de dilución de nitrato de amonio*



### ***3.7.3.4. Concentrador de película***

La solución de nitrato de amonio preconcentrado, con una concentración de aproximadamente 85%, se bombea desde la evaporación a una temperatura de 130-140 °C hacia el concentrador de película EO-01. Una pequeña cantidad de la solución fluye continuamente de regreso al recipiente de NASOL 72-2113 desde el sistema distribuidor en el cabezal del aparato. Esto se hace para mantenerlo caliente y evitar adherencias en la tubería de retorno, la cual está provista de una camisa calefactora.

En el concentrador de película EO-01, la solución de nitrato de amonio se concentra hasta alcanzar un 99.7%. La solución fluye en forma de una película delgada a lo largo de las paredes internas de los tubos del concentrador. Por fuera, los tubos son calentados con vapor para proporcionar el calor necesario para calentar el NASOL a aproximadamente 175 °C y para evaporar el agua en contracorriente a la solución de nitrato de amonio. Además, circula aire caliente, el cual es precalentado a aproximadamente 175 °C en el calentador de aire EO-02. El soplador KO-01 aspira el aire a través del filtro y lo inyecta al concentrador EO-01 después de pasar por el calentador de aire EO-02.

Para minimizar las salpicaduras de nitrato de amonio hacia la atmósfera con el aire inyectado en la parte inferior del concentrador, se instala un demister en el cabezal del concentrador. A medida que la fusión se concentra, el amoníaco disuelto en ella se expulsa en su mayor parte. Sin embargo, como la fusión de reacción ácida debe seguir descomponiéndose, se eleva nuevamente el valor de pH a 5.5-6.5 en el tanque de nitrato (bubbler) mediante la adición de amoníaco.

En la tubería de gas de amoníaco se coloca un filtro para retener impurezas como herrumbre. La concentración del NASOL y el valor de pH se controlan continuamente de forma manual.

#### ***3.7.4. Área seca***

Una vez que el nitrato de amonio ha sido concentrado y tiene una pequeña cantidad de agua, se envía a la torre de Prilling, donde se solidifica en forma de prills. Estos prills son pequeñas partículas sólidas de forma esférica o cilíndrica.

La función de la parte seca de la planta es procesar el producto proveniente de la unidad de prilling para hacerlo poroso, secarlo y separar los granos de tamaño excesivo y los de tamaño insuficiente en la estación de tamizado. Además, se encarga de enfriar el producto a la temperatura deseada para el ensacado.

#### ***3.7.4.1. Torre prilling***

El NASOL concentrado se bombea desde el tanque DO-01 utilizando la bomba PO-01 hacia la torre de prilling, donde se pulveriza. Durante su caída a través del aire frío en contracorriente que se mantiene en la torre, las gotas se solidifican y forman los prills. En el fondo de la torre, el rascador 72-1501 traslada los prills a la cinta transportadora 72-1507.

El punto de solidificación de la solución de nitrato de amonio se produce cuando el líquido claro y transparente se vuelve opaco y lechoso. La temperatura de cristalización debe ser de 124.5 °C, lo que corresponde a una concentración de la fusión del 95.5%. Es importante destacar que la temperatura de cristalización no debe ser inferior a 122 °C en ningún caso.

Si la temperatura de cristalización es inferior a 122 °C, significa que la concentración de la solución es menor al 95.1%. Esto indica que la solución concentrada tiene un mayor volumen de agua del que se permite. Sin embargo, esto resulta en una temperatura excesiva de los prills cuando llegan al fondo de la torre de Prilling. Esto se debe a que los prills tienen un tamaño mayor y, por lo tanto, una masa suficiente que no puede ser enfriada tan rápidamente por la corriente ascendente de aire. Por otro lado, si la temperatura de cristalización en el tanque de nitratos supera los 125 °C, existe el riesgo de que la solución esté sobreconcentrada, lo cual dificultaría su secado.

El control y mantenimiento de la temperatura de cristalización de la fusión de nitrato de amonio entre 122 °C y 125 °C se logra mediante la regulación de la corriente de aire caliente que

circula a través de los tubos del concentrador. Esto se puede lograr mediante ajustes en la posición de la válvula estranguladora o modificando la presión del vapor. Las condiciones óptimas deben ser determinadas a través de la experiencia y ajustadas para lograr la temperatura de cristalización deseada.

### **Figura 51**

*Vista exterior de la torre Prilling*



#### ***3.7.4.2. Clasificación de granulometría***

En la estación de tamizado, los prills son tamizados en el tamiz grueso 72-1005 y en el tamiz fino 72-1006. Los granos de tamaño excesivo que se encuentran en el tamiz grueso son triturados en el triturador de dos rodillos 72-1004 y luego devueltos a la estación de tamizado a través del elevador 72-1508. Por otro lado, los granos de tamaño insuficiente que se encuentran en el tamiz fino son llevados al tanque de disolución 72-1007.

### ***3.7.4.3. Horno de presecado y filtros de polvo (cámara antigua)***

El aire proveniente del tambor de secado 72-1008 se mezcla con el aire caliente proveniente del tambor de secado 72-1007. Ambos flujos de aire pasan por la carcasa de aspiración, donde se libera el polvo en la Cámara antigua 72-2201, y luego se descarga a la atmósfera a través del ventilador 72-1401. Las tuberías de alimentación de polvo del elevador 72-1508, el tamiz grueso 72-1005, el tamiz fino 72-1006 y el triturador 72-1004 también están conectadas al filtro 72-2201. El filtro se puede limpiar con aire caliente aspirado por el ventilador 72-1404 y calentado en el calentador de aire 72-2123.

El polvo proveniente del filtro es transportado por la rosca transportadora 72-1504 y llevado, junto con los granos de tamaño insuficiente del tamiz fino 72-1006, al tanque de disolución 72-2128 mediante la rosca transportadora 72-1505.

#### **Figura 52**

*visualización interna del cilindro de pre secado.*



#### ***3.7.4.4. Lecho fluidizado y filtro de polvo (Cámara Nueva)***

Luego, el producto fluye desde el cilindro de secado 72-1008 a través de la cinta transportadora HO-04 hasta el refrigerador del lecho fluidizado AO-02, donde se enfría a una temperatura de 30 °C en dos etapas. En la segunda etapa, donde se alimenta aire acondicionado del refrigerador/calentador de aire 72-2117/72-2118, se regula la temperatura final. La velocidad del aire es menor en la segunda etapa y apenas se produce polvo, por lo que el aire de salida de la segunda etapa puede ser recirculado a la primera etapa. En la primera etapa, la velocidad del aire es mayor y se expulsa el polvo adherido a los prills, así como los prills demasiado pequeños que hayan pasado el tamiz fino.

La regulación de las relaciones de presión en ambas etapas de enfriamiento se realiza mediante chapaletas. En el refrigerador de producto, el aire es calentado a 50 °C. El aire caliente y seco, contaminado de polvo, pasa a través del filtro (cámara nueva) FO-03, el cual se limpia automáticamente mediante impulsos de aire comprimido. El filtro incluye un aparato de mando electrónico, un compresor helicoidal KO-07, un secador de aire, un microfiltro, una tolva colectora de polvo (calefaccionada) y una rosca transportadora de polvo HO-07.

El polvo proveniente del filtro es transportado por la rosca transportadora HO-07 hasta la rosca transportadora 72-1504 y termina en el tanque de disolución 72-2128 junto con los granos de tamaño insuficiente provenientes del tamiz fino.

Desde el refrigerador de productos de lecho fluidizado AO-02, el producto es transportado por los transportadores HO-06, HO-11 y el transportador vibrador 72-1514 hasta el tambor de empolvado 72-1514.

Con el objetivo de evitar que el polvo cause molestias innecesarias en la planta de producción, los elementos de transporte, tamices, etc., están conectados al sistema de transporte de polvo existente mediante tuberías aspiradoras de polvo. El tambor de empolvado se alimenta con material en polvo proveniente de la tolva 72-2125, el dispositivo dosificador de polvo 72-1012, la rosca transportadora 72-1506, así como aditivos provenientes del recipiente DO-04. El producto pasa a través del tambor de empolvado y, mediante el elevador 72-1510, llega a la balanza 72-1010, donde es pesado y luego transportado a la planta de ensacado mediante la cinta transportadora 81-1007.

#### ***3.7.5. Productos obtenidos***

En base a las concentraciones de nitrato de amonio y ciertas características adicionales, se obtienen diferentes productos como el nitrato de amonio grado ANFO, nitrato de amonio técnico, fertilizante y NASOL. Estos productos tienen aplicaciones específicas en diferentes industrias.



### **Figura 53**

*Almacén final de nitrato de amonio, en sus diferentes presentaciones.*



#### ***3.7.5.1. Nitrato de amonio grado ANFO***

El nitrato de amonio grado ANFO se caracteriza por ser altamente concentrado y poroso. Esta porosidad permite que absorba fácilmente el petróleo al activarlo en la minería. La propiedad de porosidad se logra en el área seca con la ayuda de los hornos. Además, se añade un antiglomerante, que es un recubrimiento para evitar que se aglomere o cristalice en rocas cuando se almacena durante largos periodos de tiempo. El nitrato de amonio grado ANFO generalmente se presenta en presentaciones big bag de 1TM y 1.25 TM.

#### ***3.7.5.2. Nitrato de amonio grado técnico***

El nitrato de amonio técnico tiene propiedades similares al nitrato de amonio grado ANFO, pero no se le añade antiglomerante. Este producto se utiliza principalmente en plantas de emulsiones y su tiempo de uso es más corto. Por lo general, se diluye en la planta de emulsiones

para abastecerla de nitrato de amonio. El nitrato de amonio grado técnico generalmente se presenta en presentaciones de big bag de 1TM y 1.25 TM.

#### ***3.7.5.3. Fertilizante de nitrato de amonio***

En el caso del fertilizante de nitrato de amonio, no requiere una alta concentración. Por lo tanto, no pasa por el concentrador de película. Su concentración suele estar alrededor del 97% de nitrato de amonio. Sin embargo, se le añade tierra diatomea para darle propiedades de fertilizante. Este tipo de nitrato de amonio se utiliza específicamente como fertilizante en la agricultura. Se expende en presentaciones de sacos de 50 kg.

#### ***3.7.5.4. NASOL***

El NASOL es utilizado en la planta de emulsiones. Este producto no pasa por el área seca y se dirige directamente desde el recipiente calentable con una concentración de 82% a la planta de emulsiones. Sus propiedades y características son adecuadas para su uso en la producción de emulsiones.

### **3.8. Planta de Emulsión**

Una emulsión, es una mezcla de dos líquidos inmiscibles, de manera más o menos homogénea. Muchas emulsiones son de aceite /agua, como grasas alimenticias, Ejemplos de emulsiones incluyen la mantequilla y la margarina, la leche y crema, el expreso, la mayonesa, el lado foto sensitivo de la película fotográfica, el magma, y el aceite de corte usado en metalurgia.

En la actualidad, la planta de producción de emulsión ha estado operando de manera exitosa durante los últimos 5 años. La emulsión es una mezcla de explosivo con características superiores al nitrato de amonio, ya que ofrece una mayor velocidad de detonación y es especialmente adecuada para perforaciones en terrenos donde hay presencia de agua. A diferencia del nitrato de

amonio ANFO, cuyas propiedades se ven afectadas negativamente en estas condiciones, la emulsión mantiene su eficacia. Esta es la razón por la cual las empresas mineras en la actualidad optan por utilizar la emulsión como su elección preferida.

### ***3.8.1. Propiedades y funciones de las materias primas e insumos***

#### ***3.8.1.1. Nitrato de amonio***

El nitrato de amonio es una sal química compuesta por iones de nitrato ( $NO_3^-$ ) y amonio ( $NH_4^+$ ). En la producción de emulsiones explosivas, se utiliza como un oxidante, lo que significa que puede liberar oxígeno en reacciones químicas exotérmicas. El nitrato de amonio proporciona el oxígeno necesario para la combustión y es un componente clave para la generación de energía explosiva.

#### ***3.8.1.2. Petróleo***

El petróleo diésel es una mezcla compleja de hidrocarburos líquidos que se extrae de yacimientos naturales bajo la tierra o del fondo del mar. En las emulsiones explosivas, el petróleo se utiliza como fase oleosa, que actúa como el combustible. Proporciona la energía necesaria para la reacción explosiva cuando se combina con el oxidante (nitrato de amonio). El petróleo también puede actuar como un agente plastificante, mejorando la maleabilidad y la estabilidad de la emulsión.

#### ***3.8.1.3. Emulsionante***

Los emulsionantes son compuestos químicos que ayudan a estabilizar la emulsión, permitiendo que las fases acuosa y oleosa se mezclen de manera homogénea y evitando que se separen con el tiempo. Los emulsionantes reducen la tensión superficial entre las dos fases,

facilitando su dispersión y formación de una mezcla estable. Estos compuestos pueden incluir surfactantes, agentes tensioactivos o estabilizadores.

#### ***3.8.1.4. Urea***

La urea es un compuesto orgánico cristalino que contiene nitrógeno. En las emulsiones, se agrega urea para mejorar la estabilidad de la emulsión y reducir la sensibilidad a la humedad. La urea también puede actuar como un acelerador de la reacción, promoviendo la descomposición del nitrato de amonio y mejorando la eficiencia energética del explosivo.

#### ***3.8.1.5. Ácido acético***

El ácido acético es un compuesto orgánico que se encuentra comúnmente en forma líquida y se utiliza en muchas aplicaciones industriales. En las emulsiones, el ácido acético se utiliza como un aditivo para ajustar el pH de la emulsión y controlar la velocidad de reacción. También puede actuar como un estabilizante y mejorar la resistencia a la degradación de la emulsión.

#### ***3.8.1.6. Tiourea***

La tiourea es un compuesto orgánico que contiene azufre. Se utiliza en las emulsiones como un aditivo que mejora las propiedades físicas de la emulsión y actúa como catalizador en la gasificación química, como su viscosidad y capacidad de adherencia. La tiourea también puede contribuir a la estabilidad y resistencia al calor de la emulsión, lo que la hace más adecuada para su uso en condiciones extremas.

### ***3.8.2. Descripción general del proceso productivo***

En el proceso de producción de la emulsión, se llevan a cabo varias etapas fundamentales. En primer lugar, se prepara la solución continua (SOLCOM) mediante la mezcla de un

emulsionante en un 1.5% y un combustible en un 5.7%. Esta mezcla se realiza en un agitador y se almacena en un tanque.

A continuación, se prepara la solución dispersa (SOLOX) mezclando nitrato de amonio en un 74.5%, agua en un 17%, tiourea en un 0.2% y urea en un 1%. Estas sustancias se mezclan en un tanque batch, donde se monitorea continuamente la concentración de nitrato de amonio y el pH. Después de la mezcla, la solución dispersa se almacena en tanques adecuados.

La etapa crucial del proceso implica la emulsificación, donde se mezcla la solución continua (SOLCOM) con la solución dispersa (SOLOX) para formar la emulsión deseada. Durante esta etapa, se controlan rigurosamente los parámetros de operación y se ajustan las proporciones de ambas corrientes. Estos factores son críticos para determinar las propiedades finales de la emulsión, como el pH, la viscosidad, la densidad y la estructura interna.

Una vez obtenida la emulsión, se almacena en silos o recipientes adecuados hasta su posterior despacho y utilización en el proceso minero. Cabe mencionar que los porcentajes de los componentes pueden variar según los requisitos específicos de la emulsión que se desee producir.

### ***3.8.3. Proceso de producción de la emulsión explosiva***

#### ***3.8.3.1. Preparación de la fase acuosa (SOLOX)***

Para producir NASOL, se sigue un proceso que consta de varias etapas. En primer lugar, se disuelven los prills de nitrato de amonio en agua caliente para obtener una solución con una concentración del 80% de nitrato de amonio y un 20% de agua. Esta disolución se lleva a cabo en un tanque disolutor de nitrato de amonio llamado T-2264, con una capacidad de 5 m<sup>3</sup>.

Una vez completada la disolución, la solución resultante se envía al tanque de almacenamiento de NASOL, conocido como T-2244, con una capacidad de 100 toneladas métricas

(TM). En este tanque, el área de control de calidad realiza un monitoreo constante de los parámetros de concentración y pH.

A partir del tanque T-2244, se envía de manera continua el NASOL al tanque de preparación de SOLOX, denominado T-2967, con una capacidad de 5 m<sup>3</sup>. En el tanque de preparación de SOLOX, se agregan pequeñas cantidades de tiourea, urea, ácido acético y otras soluciones especiales, dependiendo del tipo de emulsión que se desea producir. Los porcentajes de estos insumos varían en función de las especificaciones de la emulsión requerida.

La mezcla final resultante en el tanque de preparación de SOLOX se considera el SOLOX preparado y se envía al tanque de almacenamiento de SOLOX, designado como T-2955, con una capacidad de 8 m<sup>3</sup>.

#### ***3.8.3.2. Preparación de la fase oleosa (SOLCOM)***

En la etapa de preparación de la fase oleosa, se lleva a cabo la mezcla del petróleo proveniente del tanque T-2920 de 10 m<sup>3</sup> con el emulsificante proveniente del tanque T-2950 de 50 m<sup>3</sup>. Estas dos corrientes se combinan en el tanque de preparación de SOLCOM, con una capacidad de 2 m<sup>3</sup>, para obtener una mezcla homogénea.

Una vez lograda la homogeneidad, la mezcla se almacena en los tanques T-2954A y T-2954B, ambos con una capacidad de 15 m<sup>3</sup>. Estos tanques permiten almacenar SOLCOM en diferentes proporciones, lo cual resulta beneficioso al momento de cambiar la línea de producción a otro tipo de emulsión.

Posteriormente, se envía de manera continua la mezcla de SOLCOM desde los tanques T-2954A y T-2954B al tanque pulmón de almacenamiento de SOLCOM, con una capacidad de 5

m<sup>3</sup>. Este tanque pulmón sirve para mantener un suministro constante de SOLCOM y asegurar un flujo continuo hacia las siguientes etapas del proceso.

### ***3.8.3.3. Emulsificación de la fase acuosa y oleosa***

Después de la preparación de las fases acuosa y oleosa, se lleva a cabo la emulsificación, que es una etapa crucial del proceso de producción. En esta fase, las dos fases se mezclan cuidadosamente para formar una emulsión estable. Se utilizan equipos y métodos específicos para garantizar una mezcla adecuada y uniforme de las fases.

En primer lugar, se utiliza un agitador para asegurar la adecuada mezcla de las fases acuosa y oleosa. Este agitador permite un movimiento constante y controlado para lograr una dispersión uniforme de las fases y promover la formación de la emulsión.

Además, se emplea un ultra cizallador, que es un equipo especializado, para incrementar la viscosidad del producto resultante. El ultra cizallador proporciona una fuerza de corte intensa a la emulsión, lo que ayuda a romper las gotas más grandes y favorece la formación de una emulsión con un tamaño de partícula más pequeño y estable.

Una vez que se ha obtenido la emulsión deseada, se utiliza una bomba de cavidad progresiva para enviar el producto a los silos de almacenamiento. La bomba de cavidad progresiva asegura un flujo continuo y controlado de la emulsión hacia los silos, donde se almacena hasta su posterior despacho.

Como podemos ver en la tabla 6, la composición de las materias primas e insumos varía según el tipo de emulsión a producir.

**Tabla 8***Composición de materia prima e insumos, según tipo de emulsificante*

<b>COMPONENTES</b>	<b>MATRIZ 1</b>	<b>MATRIZ 2</b>	<b>MATRIZ 3</b>	<b>MATRIZ 4</b>
PETROLEO DIESEL	5.50	5.50	5.50	5.70
EMULSIFICANTE	1.50	1.50	1.50	1.30
<b>TOTAL, FASE COMBUSTIBLE</b>	<b>7.00</b>	<b>7.00</b>	<b>7.00</b>	<b>7.00</b>
NITRATO DE AMONIO	88.49	88.49	76.50	76.50
UREA			2.00	2.00
THIOUREA	0.50	0.50	0.50	0.50
PERCLORATO DE POTASIO	4.00	4.00	4.00	4.00
ACIDO ACETICO GLACIAL 99 %	0.01	0.01		
NITRATO DE CALCIO			10.00	
NITRATO DE SODIO				10.00
<b>TOTAL, FASE OXIDANTE</b>	<b>93.00</b>	<b>93.00</b>	<b>93.00</b>	<b>93.00</b>
<b>TOTAL</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>

*Nota.* Estas variaciones de composición se deben que algunos de los insumos adicionados dan propiedades diferentes. Se realiza en base a factores geológicos que se enfrentara la emulsión

#### ***3.8.3.4. Acondicionamiento y almacenamiento de la emulsión***

Después de la emulsificación de la emulsión, se realiza el acondicionamiento final para asegurar que la emulsión cumpla con los requisitos deseados antes de su almacenamiento y uso. Esta etapa implica varias acciones importantes.

En primer lugar, se utiliza un agitador estático y sensores de presión, temperatura y densidad para monitorear y ajustar los parámetros de la emulsión. El agitador estático ayuda a mantener una distribución uniforme de los componentes en la emulsión, mientras que los sensores permiten controlar y ajustar la viscosidad, temperatura y densidad.

Además, se tiene un ultra cizallador en línea que permite ajustar la viscosidad a la que se requiere variando la velocidad de cizallamiento.



Después de los ajustes finales, la emulsión se enfría a una temperatura cercana al ambiente mediante un intercambiador de placas, donde se realiza un intercambio de calor con agua de refrigeración. Esto garantiza que la emulsión alcance una temperatura óptima para su almacenamiento y uso seguro.

Finalmente, la emulsión se almacena en silos adecuados, cumpliendo con las condiciones específicas de almacenamiento recomendadas para preservar su estabilidad y seguridad a largo plazo. Estas condiciones pueden incluir temperaturas controladas, protección contra la humedad y otros factores que puedan afectar la calidad y estabilidad de la emulsión.

#### **Figura 54**

*Silos de almacenamiento de emulsión listo para despacho.*



#### **3.8.4. Control de calidad**

En la planta, se cuenta con un laboratorio completamente equipado y especializado en la realización de pruebas y el control de calidad de muestras en todas las etapas de la cadena productiva de la emulsión explosiva. Este laboratorio está diseñado específicamente para llevar a cabo análisis exhaustivos y garantizar que la emulsión cumpla con los estándares más rigurosos de calidad y seguridad.

El personal del laboratorio está altamente capacitado y calificado, con experiencia en la realización de pruebas específicas y en la interpretación de los resultados. Siguiendo estrictos protocolos y estándares de calidad, el equipo de laboratorio realiza pruebas de rutina y pruebas especializadas en cada lote de emulsión producido.

Estas pruebas y análisis cubren diversos aspectos, como la composición química de las materias primas, la pureza, la concentración, la viscosidad, la estabilidad, la sensibilidad y el rendimiento explosivo. Además, se realizan pruebas de control de calidad durante todo el proceso de producción para asegurarse de que se mantengan las especificaciones requeridas en cada etapa.

El laboratorio desempeña un papel fundamental en la garantía de la calidad de la emulsión explosiva, ayudando a identificar cualquier desviación o problema potencial y tomando medidas correctivas adecuadas. Esto contribuye a mantener altos estándares de seguridad, rendimiento y consistencia en la producción de emulsiones explosivas utilizadas en la minería.

##### **3.8.4.1. Prueba y análisis de las materias primas**

En esta etapa del control de calidad, se llevan a cabo pruebas y análisis de las materias primas utilizadas en la producción de la emulsión explosiva. Estas pruebas pueden incluir:

- Análisis químico: Se realizan análisis para determinar la pureza y las características químicas de las materias primas del nitrato de amonio, el petróleo y los emulsionantes. Esto asegura que cumplan con los estándares de calidad requeridos.
- Pruebas de humedad: Se verifica el contenido de humedad de las materias primas para garantizar que estén dentro de los límites aceptables. La humedad excesiva puede afectar la estabilidad y la calidad de la emulsión explosiva.
- Análisis de impurezas: Se realizan pruebas para identificar y cuantificar cualquier impureza presente en las materias primas. Estas impurezas pueden afectar la estabilidad y el rendimiento de la emulsión final.

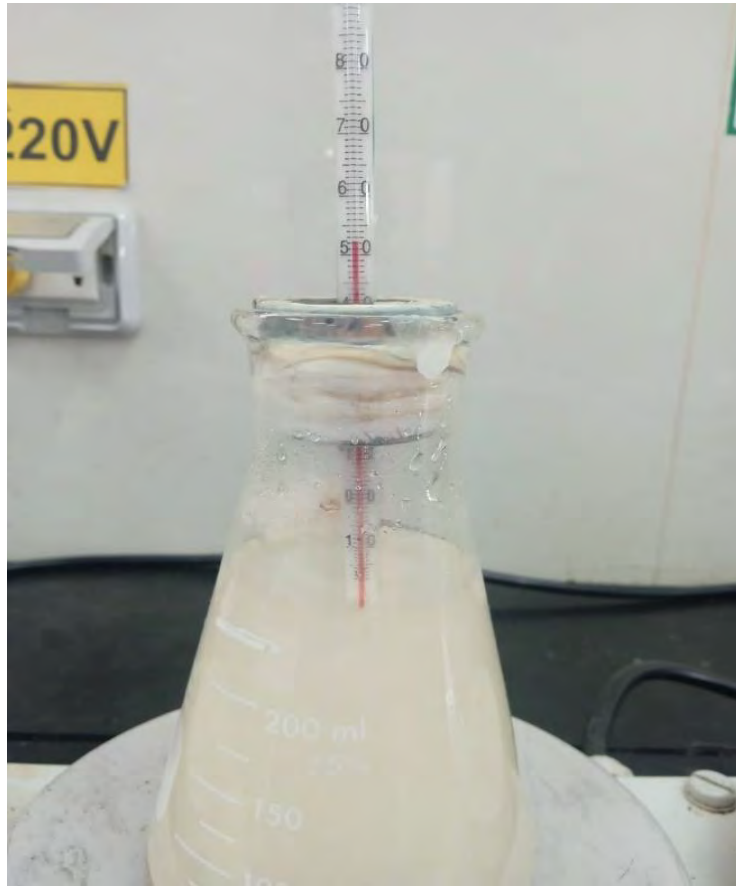
#### ***3.8.4.2. Prueba y análisis durante el proceso de producción***

Durante el proceso de producción de la emulsión explosiva, también se realizan pruebas y análisis para asegurar la calidad y consistencia del producto. Estas pruebas pueden incluir:

- Monitoreo de Concentración del NASOL: Se realiza la verificación de la densidad y la temperatura, para determinar la concentración de la solución.
- Análisis de Flush Point: Se verifica el punto de cristalización, para corroborar la concentración de la solución.

**Figura 55**

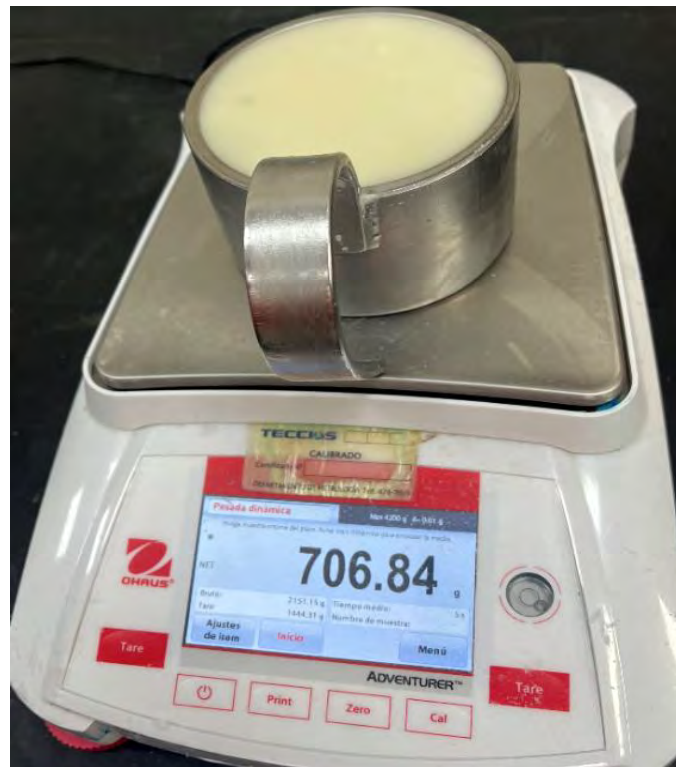
*Análisis de Flush Point en muestra de NASOL.*



- Análisis de Densidad de la emulsión en Caliente y Frio: Se realiza la verificación de la densidad, para saber la buena formación y concentración de la emulsión.

**Figura 56**

*Medición de la densidad de la emulsión en frío.*



- Monitoreo de la temperatura: Se verifica y controla la temperatura en diferentes etapas del proceso para garantizar que se mantenga dentro de los rangos óptimos. Esto es importante para lograr una emulsión adecuada y prevenir posibles problemas de estabilidad.
- Pruebas de viscosidad: Se realizan pruebas para medir la viscosidad de la emulsión en diferentes puntos del proceso. Esto permite ajustar y controlar la viscosidad para cumplir con las especificaciones requeridas.

**Figura 57**

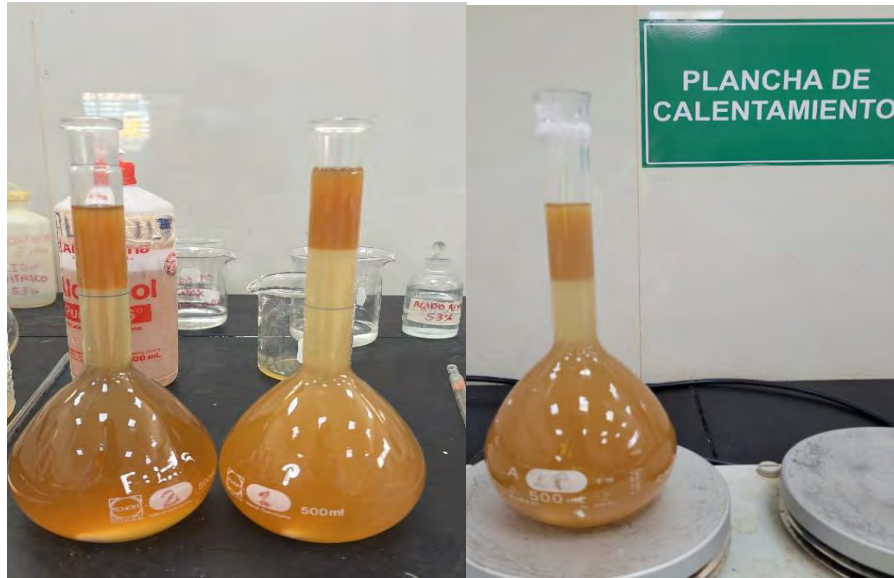
*Medición de viscosidad de la emulsión en diferentes etapas del proceso.*



- Evaluación de la estabilidad: Se llevan a cabo pruebas de estabilidad a lo largo del proceso para verificar que la emulsión se mantenga homogénea y no presente separación de fases o cambios significativos en sus propiedades físicas.

## Figura 58

*Análisis de separación de fases acuosa y oleosa.*



### ***3.8.4.3. Evaluación de la calidad de la emulsión final***

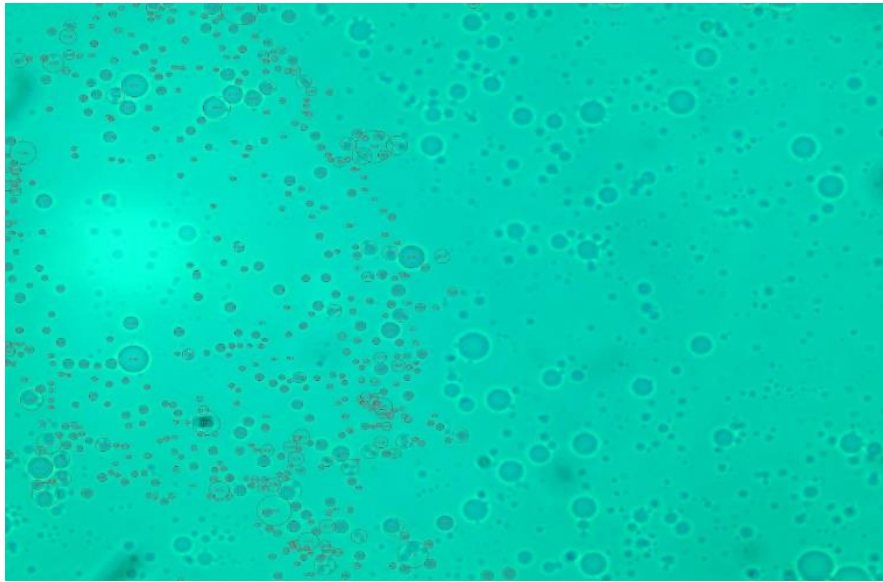
Una vez que se ha completado la producción de la emulsión explosiva, se realiza una evaluación final de la calidad. Esto puede implicar:

- Pruebas de sensibilidad: Se realizan pruebas de sensibilidad para evaluar la respuesta de la emulsión a estímulos externos, como impacto, fricción o calor. Estas pruebas ayudan a determinar la seguridad y estabilidad de la emulsión.
- Análisis de tamaño de partículas: Se utilizan técnicas de análisis para determinar el tamaño y la distribución de partículas en la emulsión final aplicando un microscopio de alta resolución. Esto es importante para garantizar la homogeneidad y la eficiencia energética de la emulsión.



## Figura 59

*Vista microscópica de la emulsión.*



- Test de Transporte: Se realiza la simulación del transporte de nuestra emulsión hasta la unidad minera, y verificar que no haya variación en sus características físico-químicas.

## Figura 60

*Prueba de test de transporte con muestras de emulsión.*





- Ciclaje Térmico: se realiza el ciclaje térmico a la emulsión, que consta en someter a la emulsión a temperaturas de hasta 40°C por 12 horas y a -4°C por 12 horas, durante 5 días, esto para determinar la estabilidad de la emulsión en el tiempo.

**Figura 61**

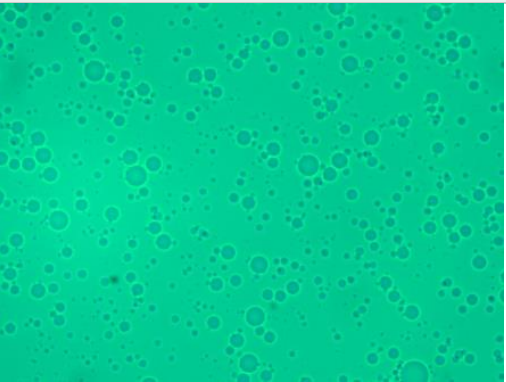
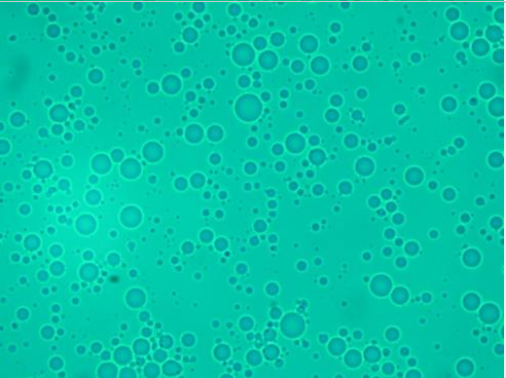
*prueba de temperatura en ambientes fríos y calientes.*



Tamaño de celda de la emulsión

**Tabla 9**

*Resultados de la prueba de ciclaje térmico.*

CICLAJE TERMICO				
Ciclo	Viscosidad cP	Temp. °C	Imagen	Observaciones
1	25600	27		Sin presencia de cristales
5	25600	11.30		Sin presencia de cristales

#### **4. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE LA EMULSIÓN**

Proceso de producción de emulsiones de nitrato de amonio

##### **4.1. Preparación de las Soluciones**

###### **4.1.1. Solución combustible**

La fase combustible se prepara mezclando principalmente petróleo diésel con un agente emulsificante. Típicamente, la proporción es de alrededor de 5.5% de petróleo diésel y 1.5% de emulsificante, aunque estas proporciones pueden variar ligeramente según la formulación

específica (J & A, 2018). El emulsificante juega un papel crucial en la estabilidad de la emulsión final, ya que disminuye la tensión superficial entre las fases acuosa y oleosa.

#### 4.1.2. Solución oxidante

La solución oxidante se compone principalmente de nitrato de amonio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) en una concentración que suele oscilar entre 76% y 88% (BROWN, 2019). Adicionalmente, se pueden incorporar otros componentes como urea (hasta un 2%), thiourea (0.5%), perclorato de potasio (4%), y en algunos casos, pequeñas cantidades de ácido acético glacial (0.01%). Algunas formulaciones pueden incluir también nitrato de calcio o nitrato de sodio (hasta un 10%) para modificar las propiedades de la emulsión final (Garcia, 2017).

#### Figura 62

*porcentaje de concentración de reactivos para diferentes matrices de emulsión.*

COMPONENTES	MATRIZ 1	MATRIZ 2	MATRIZ 3	MATRIZ 4
PETROLEO DIESEL	5.50	5.50	5.50	5.70
EMULSIFICANTE	1.50	1.50	1.50	1.30
<b>TOTAL FASE COMBUSTIBLE</b>	<b>7.00</b>	<b>7.00</b>	<b>7.00</b>	<b>7.00</b>
NITRATO DE AMONIO	88.49	88.49	76.50	76.50
UREA			2.00	2.00
THIOUREA	0.50	0.50	0.50	0.50
PERCLORATO DE POTASIO	4.00	4.00	4.00	4.00
ACIDO ACETICO GLACIAL 99 %	0.01	0.01		
NITRATO DE CALCIO			10.00	
NITRATO DE SODIO				10.00
<b>TOTAL FASE OXIDANTE</b>	<b>93.00</b>	<b>93.00</b>	<b>93.00</b>	<b>93.00</b>
<b>TOTAL</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>

## **4.2. Proceso de Emulsificación**

El proceso de emulsificación es crucial para la calidad y estabilidad del producto final. Se lleva a cabo en un reactor de mezcla especializado donde la solución combustible y la solución oxidante se combinan bajo condiciones controladas de temperatura, presión y agitación.

### ***4.2.1. Mecanismo de formación de la emulsión***

Durante el proceso de mezcla, la solución oxidante (fase dispersa) se dispersa en forma de pequeñas gotas o glóbulos dentro de la solución combustible (fase continua). Este tipo de emulsión se conoce como emulsión agua en aceite (W/O, por sus siglas en inglés) (Lee, 2018). El emulsificante presente en la fase combustible se posiciona en la interfaz entre las gotas de la solución oxidante y la fase continua, estabilizando así la emulsión.

### ***4.2.2. Control de temperatura***

La temperatura durante el proceso de emulsificación es un parámetro crítico. Generalmente, se mantiene entre 70°C y 90°C para asegurar que la solución de nitrato de amonio permanezca líquida y facilite la formación de gotas de tamaño adecuado.

### ***4.2.3. Agitación y cizallamiento***

El sistema de agitación en el reactor debe proporcionar suficiente energía mecánica para dispersar la fase oxidante en gotas finas. Se utilizan mezcladores de alto cizallamiento para lograr una distribución de tamaño de gota uniforme, típicamente en el rango de 1 a 10 micrones.

### **4.3. Control de Calidad y Propiedades de la Emulsión**

#### ***4.3.1. Análisis de pH***

Se realiza un análisis de pH de la fase oxidante en cada lote de producción para asegurar la estabilidad química de la emulsión. El pH óptimo suele estar en el rango de 4.5 a 6.0.

#### ***4.3.2. Densidad y viscosidad***

La densidad y viscosidad de la emulsión se miden tanto en caliente (durante la producción) como en frío (producto final). La densidad típica de una emulsión de nitrato de amonio oscila entre 1.2 y 1.4 g/cm<sup>3</sup>, mientras que la viscosidad puede variar significativamente dependiendo de la formulación específica.

#### ***4.3.3. Análisis de tamaño de partícula***

El tamaño de las gotas de la fase dispersa es crucial para la estabilidad y el rendimiento de la emulsión. Se utiliza microscopía óptica para analizar la distribución del tamaño de partícula, buscando un tamaño promedio de gota en el rango de 1 a 10 micrones.

#### ***4.3.4. Prueba de estabilidad***

Se realizan pruebas de estabilidad sometiendo muestras de la emulsión a ciclos térmicos y evaluando la separación de fases. Una emulsión estable debe mantener su integridad durante al menos 3 meses en condiciones de almacenamiento normales.

#### ***4.3.5. Análisis de flush point***

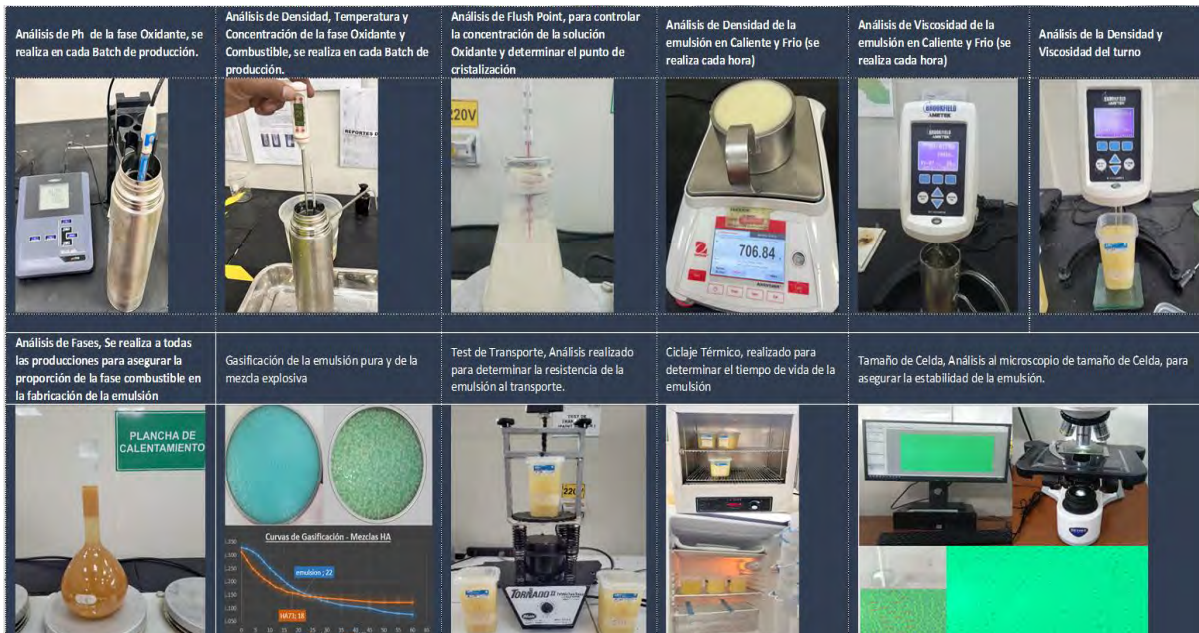
Esta prueba se realiza para controlar la concentración de la solución oxidante y determinar el punto de cristalización. Es crucial para garantizar que la emulsión mantenga sus propiedades a diferentes temperaturas de almacenamiento y uso.

### 4.3.6. Prueba de gasificación

Se evalúa la capacidad de la emulsión para generar gases al reaccionar. Esta prueba es importante para determinar la eficacia de la emulsión como agente explosivo. Se mide la tasa de evolución de gases y el volumen total generado.

**Figura 63**

*Visualización de análisis de control de calidad de la emulsión.*



## 4.4. Almacenamiento y Manejo

### 4.4.1. Condiciones de almacenamiento

Las emulsiones de nitrato de amonio deben almacenarse en tanques o contenedores apropiados, preferiblemente a temperaturas entre 15°C y 30°C. Es crucial evitar la contaminación con materiales incompatibles y proteger el producto de la luz solar directa y la humedad.

#### ***4.4.2. Seguridad***

Debido a la naturaleza potencialmente explosiva de estas emulsiones, se siguen estrictos protocolos de seguridad en su manejo y almacenamiento. Esto incluye el uso de equipos de protección personal adecuados, sistemas de ventilación apropiados y procedimientos de emergencia bien establecidos.

### **4.5. Innovación en el Proceso de Emulsión**

#### ***4.5.1. Tecnologías emergentes***

En Industrias Cachimayo, venimos trabajando en la implementación de nuevas tecnologías para mejorar la eficiencia y la calidad de nuestras emulsiones. La incorporación de equipos de agitación y homogeneización de última generación ha permitido una mayor estabilidad en nuestras emulsiones, logrando productos más uniformes y resistentes a la separación de fases. Además, hemos automatizado los sistemas de control para regular con precisión variables críticas como la temperatura, el flujo y la velocidad de agitación, lo que nos ha permitido aumentar la reproducibilidad de nuestros lotes y reducir la posibilidad de errores humanos.

#### ***4.5.2. Aditivos innovadores***

Como parte de nuestra constante búsqueda por mejorar, en industrias Cachimayo hemos desarrollado y adoptado el uso de nuevos aditivos que incrementan la estabilidad de nuestras emulsiones bajo condiciones extremas. Estos aditivos, además de mejorar la resistencia al choque térmico, han permitido reducir la viscosidad sin comprometer la densidad energética del producto, lo que facilita el manejo y bombeo de las emulsiones en los diferentes proyectos mineros y de construcción en los que participamos.

### ***4.5.3. Impacto de la automatización***

La automatización ha sido un pilar en la modernización de nuestros procesos de producción de emulsión. En Industrias Cachimayo, hemos implementado sistemas automatizados que monitorean en tiempo real las variables más críticas del proceso, como la temperatura, la velocidad de mezcla y la proporción de reactivos. Esto nos ha permitido obtener lotes más homogéneos, aumentando la seguridad en el proceso y reduciendo significativamente los tiempos de mantenimiento preventivo, lo cual se traduce en una mayor eficiencia operativa.

## **4.6. Sostenibilidad en la Producción de Emulsión**

### ***4.6.1. Reducción del residuos y emisiones***

En nuestra empresa, la sostenibilidad es una prioridad. Hemos optimizado nuestros procesos de producción de emulsiones para reducir la generación de residuos y minimizar las emisiones. En Industrias Cachimayo, trabajamos en la implementación de técnicas avanzadas de reciclaje para los subproductos generados, lo que nos permite reutilizar materiales y reducir la cantidad de desechos peligrosos que generamos. Esto no solo mejora nuestro desempeño ambiental, sino que también nos ayuda a cumplir con las normativas medioambientales.

### ***4.6.2. Economía circular***

En línea con nuestra política de sostenibilidad, hemos adoptado principios de economía circular en la producción de emulsiones. Los productos que antes eran desechados, ahora son reutilizados como materias primas secundarias, lo que no solo reduce nuestra dependencia de nuevos insumos, sino que también minimiza la generación de residuos. Este enfoque ha sido clave para mejorar la eficiencia de nuestros procesos y reducir el impacto ambiental de nuestras operaciones.



## 5. CONCLUSIONES

1. En el proceso productivo de fabricación de explosivos, se llevan a cabo diversas actividades desde la transformación de la materia prima hasta la obtención de los productos finales, como el nitrato de amonio y la emulsión. Estas actividades incluyen etapas clave como la selección y procesamiento de la materia prima, la mezcla y reacción de los componentes, y la posterior producción y envasado de los explosivos. Cada etapa desempeña un papel fundamental en el proceso global y contribuye a la calidad y seguridad de los productos finales.
2. Durante el transcurso del tiempo, los productos de emulsión han experimentado una notable evolución para satisfacer las necesidades específicas de los clientes. Se han realizado adaptaciones y mejoras significativas, aprovechando avances tecnológicos y realizando ajustes en ingredientes y procesos de fabricación. Estos cambios han contribuido a mejorar la calidad y eficiencia de los productos, asegurando un rendimiento óptimo y una mayor seguridad en su aplicación.
3. En este informe técnico, cumplí con los objetivos al ofrecer un informe detallado sobre el proceso productivo de emulsión de nitrato de amonio. Describí la fabricación del nitrato de amonio y la emulsión, destacando su evolución para adaptarse a las necesidades de los clientes.
4. En conclusión, mi trabajo ha sido significativo en el campo de la fabricación de emulsiones. A través de este informe técnico, he brindado un informe detallado del proceso productivo, destacando la evolución de los productos de emulsión para satisfacer las necesidades de los clientes. Los hallazgos de este estudio tienen implicaciones prácticas y pueden beneficiar tanto a nuestra empresa como a la industria en general.

## **6. RECOMENDACIONES**

Basado en los hallazgos de este informe técnico, se pueden hacer las siguientes recomendaciones para mejorar el proceso productivo de emulsiones:

1. Explorar nuevas tecnologías y métodos de fabricación que puedan optimizar la eficiencia y la calidad de los productos.
2. Continuar investigando y desarrollando ingredientes más seguros y respetuosos con el medio ambiente para reducir posibles impactos negativos.
3. Establecer programas de capacitación y actualización periódica para el personal involucrado en el proceso productivo, con el fin de mantener altos estándares de seguridad y calidad.
4. Fomentar la colaboración y el intercambio de conocimientos con otras empresas y expertos del sector para promover la innovación y el crecimiento conjunto.
5. Realizar estudios adicionales para evaluar y mejorar constantemente la eficiencia energética y la reducción de residuos en el proceso de fabricación

## 6. BIBLIOGRAFIA

- Alonso Vante, N. (2002). *Electroquímica y Electrocátalisis vol II: Técnicas de Investigación aplicada a Sistemas Electroquímicos en situ y ex situ*. Argentina: e-Libro.net.
- Beltrán Sempértegui, C. A., & Pulla Iñiguez, D. B. (2021). *Diseño de una Planta Criogénica separadora de aire en la Ciudad de Cuenca- Ecuador*. Ecuador : Universidad Ploitécnica Salesiana ses Cuenca.
- BROWN, T. L. (2019). *Oxidizer Solutions in Emulsion Explosives: Composition and Stability. Propellants, Explosives, Pyrotechnics*.
- Cabezas Oruna , J. (2012). *Obtencion de agua ultrapura en la industria mediante intercambio ionico*. Lima: Universidad Ricardo Palma.
- Calidra, G. (2002). *Manual de uso Ecologico del Agua*. Mexico: Uso de la cal en el tratamiento de aguas.
- Chicas Padilla, J. A., & Guzmán Cruz, W. M. (2021). *Producción de Hidrógeno por electrólisis de agua utilizando energía solar y evaluación de su uso como combustible fuente de energía térmica*. El Salvador: Universidad de el Salvador.
- CIAFA. (2008). *Ficha de datos de seguridad de materiales*. Obtenido de <https://www.ciafa.org.ar/files/CifCcpW51KkMYg09bNKhIpCOQInCwDiq5DiEB99T.pdf>
- Corbacho, J., & Izquierdo, E. (1977). *Manual de operador de: Planta de tratamiento de agua*. Cusco: Industrias Cachimayo.
- Garcia, M. J. (2017). *Advanced Oxidizer Formulations for Enhanced Emulsion Performance*. International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion.
- Group, P. (14 de marzo de 2023). *¿Cuales son las propiedades y aplicaciones de la cal apagada?* Obtenido de PPC Productos: [https://www.products.pcc.eu/es/blog/cuales-son-las-propiedades-y-aplicaciones-de-la-cal-apagada/#:~:text=Producci%C3%B3n%20de%20cal%20apagada&text=Basta%20apagar%20el%20%C3%B3xido%20de%20calcio%20\(cal%20quemada\)%20con%20agua](https://www.products.pcc.eu/es/blog/cuales-son-las-propiedades-y-aplicaciones-de-la-cal-apagada/#:~:text=Producci%C3%B3n%20de%20cal%20apagada&text=Basta%20apagar%20el%20%C3%B3xido%20de%20calcio%20(cal%20quemada)%20con%20agua).
- J, R. S., & A, B. J. (2018). *Formulation of Ammonium Nitrate Emulsions: Key Components and Their Roles*. Journal of Energetic Materials.
- Lee, H. S. (2018). *Microstructure and Stability of Water-in-Oil Emulsions in Explosive Formulations*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.
- Magaña Mortel, L. J., & Alfonso, A. O. (2020). Analysis of cryogenic distillation of air supported by process simulation. *Revista Cubana de Ingeniería*, 12.
- Martin Martin, M. (2016). *Industrial Chemical Process Analysis and Design*. Reino Unido: Elsevier.
- Merino, Á. (2022). *El Orden Mundial*. Obtenido de <https://elordenmundial.com/mapas-y-graficos/tipos-hidrogeno/>

Miranda Sánchez, S. M., & Quishpi Chasiluisa, N. T. (2021). *Recuperación de agua del proceso electroquímico en la producción de hidrógeno verde*. Ecuador: Escuela Superior Politécnica de chimborazo.


Rand, I. (1 de MARzo de 2020). *An Ingersoll Rand Business* . Obtenido de <https://www.lmipumps.com/es-pe/technologies/coagulation-and-flocculation-in-water-treatment#:~:text=La%20coagulaci%C3%B3n%20y%20la%20floculaci%C3%B3n,agua%20y%20reducen%20la%20turbidez>.

Spath, D. (Diciembre de 2023). *Preliminary Greening - Technical and Economic Assessment of Synthesis Gas to Fuel and Chemicals with Emphasis on the Potential for Biomasa - Derived Syngas*. Obtenido de National Renewable Energy Laboratory NREL: <https://www.nrel.gov/docs/fy04osti/34929.pdf>

Zeng, K., & Zhang, D. (2009). *Progress in Energy and Combustion Science*. Elsevier, 20.

## 7. ANEXOS

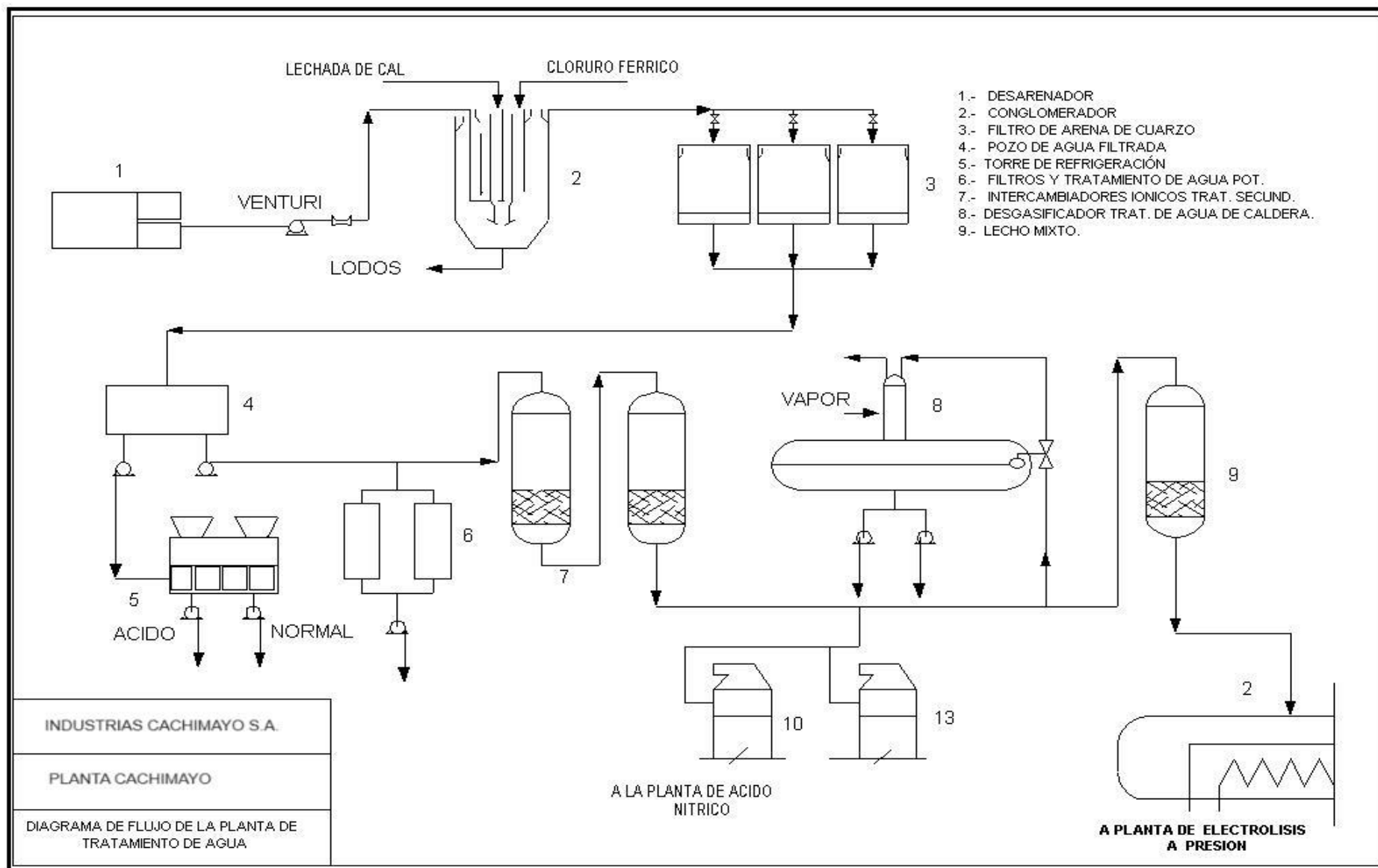
PE-ENX-CA-QC-L-01 Tabla de concentración de solución de nitrato de amonio %

		PLANTA CACHIMAYO																		GP	
Número del documento: PE-ENX-CA-QC-L-01		Tabla de concentración de solución de nitrato de amonio %																			
	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
1320	73.8	73.9	74.0	74.1	74.2	74.3	74.4	74.5	74.6	74.7	74.8	74.9	75.0	75.1	75.2	75.3	75.4	75.5	75.6	75.7	75.8
1322	74.1	74.2	74.3	74.4	74.5	74.6	74.7	74.8	74.9	75.0	75.1	75.2	75.3	75.4	75.5	75.6	75.7	75.8	75.9	76.0	76.1
1324	74.4	74.5	74.6	74.7	74.8	74.9	75.0	75.1	75.2	75.3	75.4	75.5	75.6	75.7	75.8	75.9	76.0	76.1	76.2	76.3	76.4
1326	74.8	74.9	75.0	75.1	75.2	75.3	75.4	75.5	75.6	75.7	75.8	75.9	76.0	76.1	76.2	76.3	76.4	76.5	76.6	76.7	76.8
1328	75.1	75.2	75.3	75.4	75.5	75.6	75.7	75.8	75.9	76.0	76.1	76.2	76.3	76.4	76.5	76.6	76.7	76.8	76.9	77.0	77.1
1330	75.5	75.6	75.7	75.8	75.9	76.0	76.1	76.2	76.3	76.4	76.5	76.6	76.7	76.8	76.9	77.0	77.1	77.2	77.3	77.4	77.5
1332	75.8	75.9	76.0	76.1	76.2	76.3	76.4	76.5	76.6	76.7	76.8	76.9	77.0	77.1	77.2	77.3	77.4	77.5	77.6	77.7	77.8
1334	76.1	76.2	76.3	76.4	76.5	76.6	76.7	76.8	76.9	77.0	77.1	77.2	77.3	77.4	77.5	77.6	77.7	77.8	77.9	78.0	78.1
1336	76.4	76.5	76.6	76.7	76.8	76.9	77.0	77.1	77.2	77.3	77.4	77.5	77.6	77.7	77.8	77.9	78.0	78.1	78.2	78.3	78.4
1338	76.8	76.9	77.0	77.1	77.2	77.3	77.4	77.5	77.6	77.7	77.8	77.9	78.0	78.1	78.2	78.3	78.4	78.5	78.6	78.7	78.8
1340	77.1	77.2	77.3	77.4	77.5	77.6	77.7	77.8	77.9	78.0	78.1	78.2	78.3	78.4	78.5	78.6	78.7	78.8	78.9	79.0	79.1
1342	77.4	77.5	77.6	77.7	77.8	77.9	78.0	78.1	78.2	78.3	78.4	78.5	78.6	78.7	78.8	78.9	79.0	79.1	79.2	79.3	79.4
1344	77.7	77.8	77.9	78.0	78.1	78.2	78.3	78.4	78.5	78.6	78.7	78.8	78.9	79.0	79.1	79.2	79.3	79.4	79.5	79.6	79.7
1346	78.0	78.1	78.2	78.3	78.4	78.5	78.6	78.7	78.8	78.9	79.0	79.1	79.2	79.3	79.4	79.5	79.6	79.7	79.8	79.9	80.0
1348	78.3	78.4	78.5	78.6	78.7	78.8	78.9	79.0	79.1	79.2	79.3	79.4	79.5	79.6	79.7	79.8	79.9	80.0	80.1	80.2	80.3
1350	78.7	78.8	78.9	79.0	79.1	79.2	79.3	79.4	79.5	79.6	79.7	79.8	79.9	80.0	80.1	80.2	80.3	80.4	80.5	80.6	80.7
1352	79.0	79.1	79.2	79.3	79.4	79.5	79.6	79.7	79.8	79.9	80.0	80.1	80.2	80.3	80.4	80.5	80.6	80.7	80.8	80.9	81.0
1354	79.4	79.5	79.6	79.7	79.8	79.9	80.0	80.1	80.2	80.3	80.4	80.5	80.6	80.7	80.8	80.9	81.0	81.1	81.2	81.3	81.4
1356	79.7	79.8	79.9	80.0	80.1	80.2	80.3	80.4	80.5	80.6	80.7	80.8	80.9	81.0	81.1	81.2	81.3	81.4	81.5	81.6	81.7
1358	80.0	80.1	80.2	80.3	80.4	80.5	80.6	80.7	80.8	80.9	81.0	81.1	81.2	81.3	81.4	81.5	81.6	81.7	81.8	81.9	82.0
1360	80.3	80.4	80.5	80.6	80.7	80.8	80.9	81.0	81.1	81.2	81.3	81.4	81.5	81.6	81.7	81.8	81.9	82.0	82.1	82.2	82.3
1362	80.7	80.8	80.9	81.0	81.1	81.2	81.3	81.4	81.5	81.6	81.7	81.8	81.9	82.0	82.1	82.2	82.3	82.4	82.5	82.6	82.7
1364	81.0	81.1	81.2	81.3	81.4	81.5	81.6	81.7	81.8	81.9	82.0	82.1	82.2	82.3	82.4	82.5	82.6	82.7	82.8	82.9	83.0
1366	81.3	81.4	81.5	81.6	81.7	81.8	81.9	82.0	82.1	82.2	82.3	82.4	82.5	82.6	82.7	82.8	82.9	83.0	83.1	83.2	83.3
1368	81.6	81.7	81.8	81.9	82.0	82.1	82.2	82.3	82.4	82.5	82.6	82.7	82.8	82.9	83.0	83.1	83.2	83.3	83.4	83.5	83.6
1370	81.9	82.0	82.1	82.2	82.3	82.4	82.5	82.6	82.7	82.8	82.9	83.0	83.1	83.2	83.3	83.4	83.5	83.6	83.7	83.8	83.9

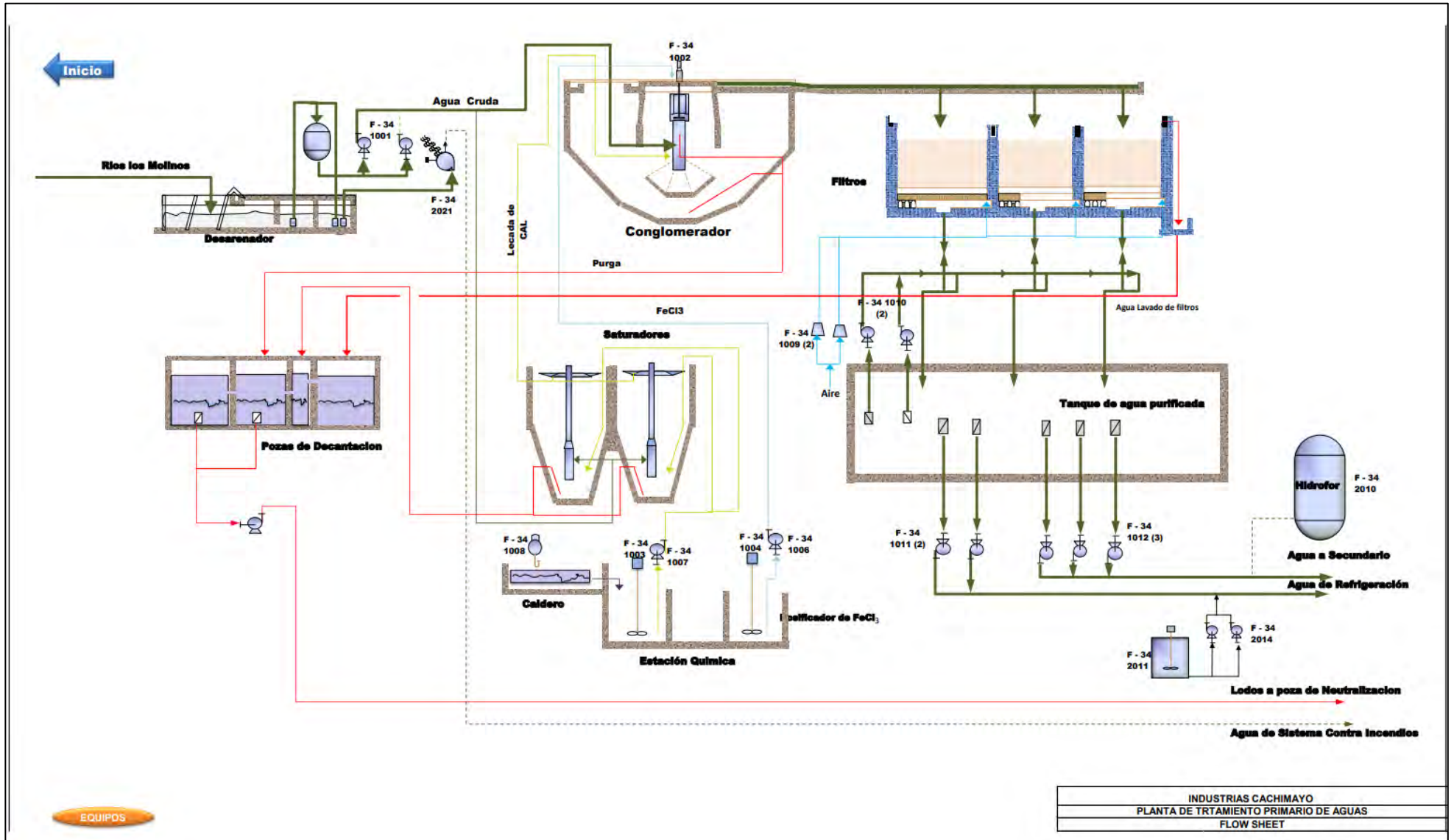
Revisión 08/01/2023

Versión 01

## DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA – DIAGRAMA GENERAL

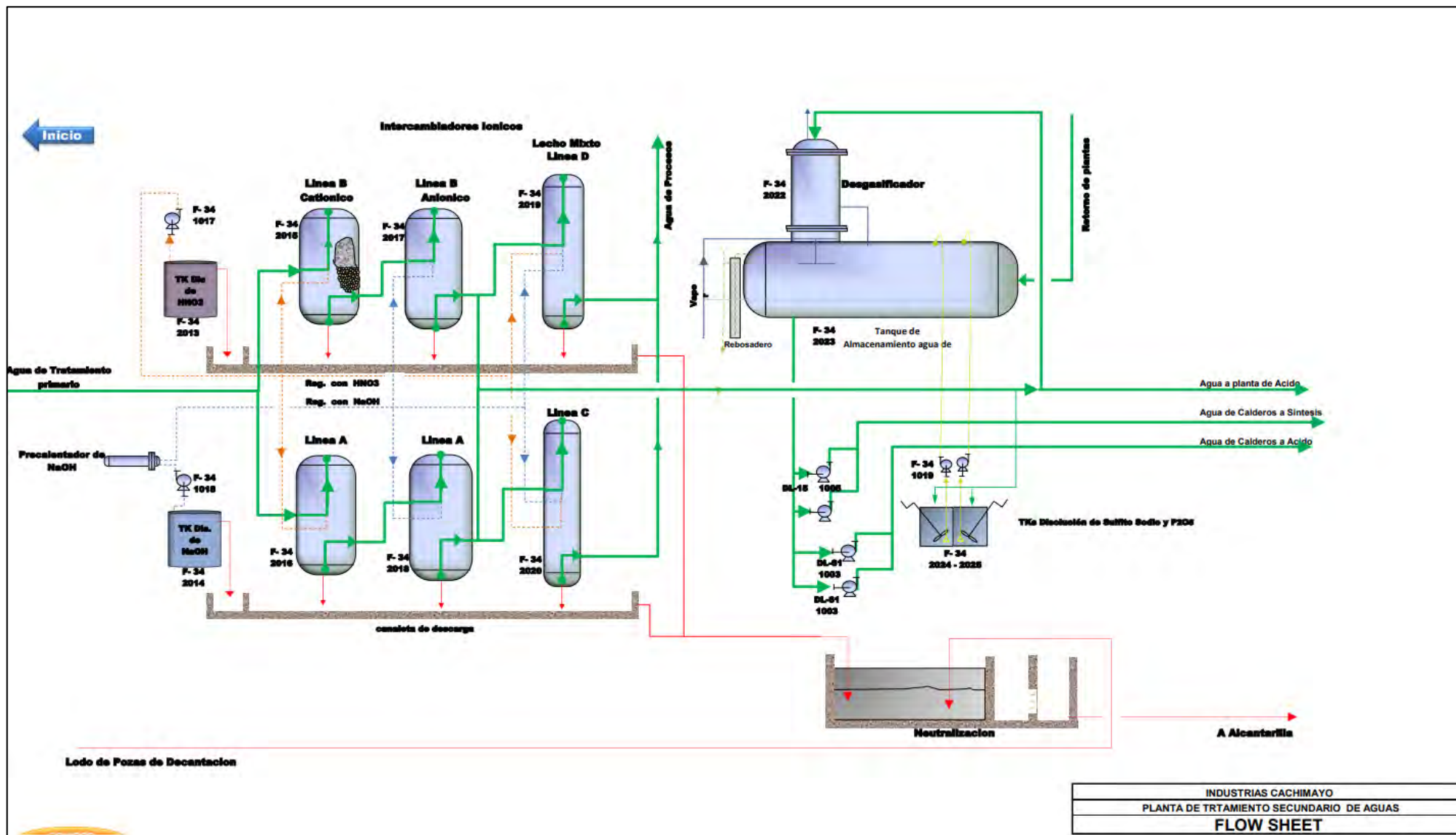


# DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA – PROCESO PRIMARIO



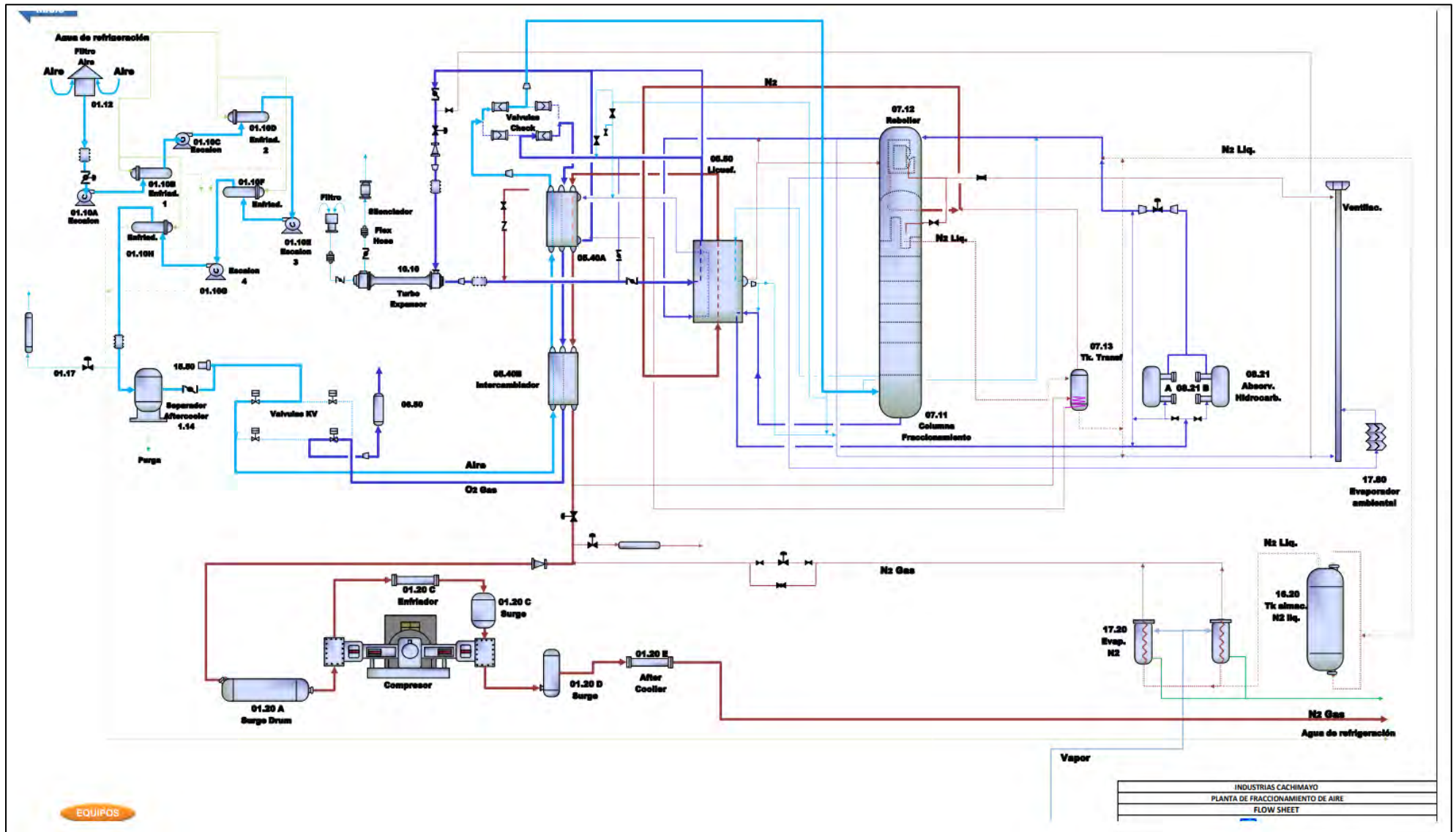


## DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA – PROCESO SECUNDARIO

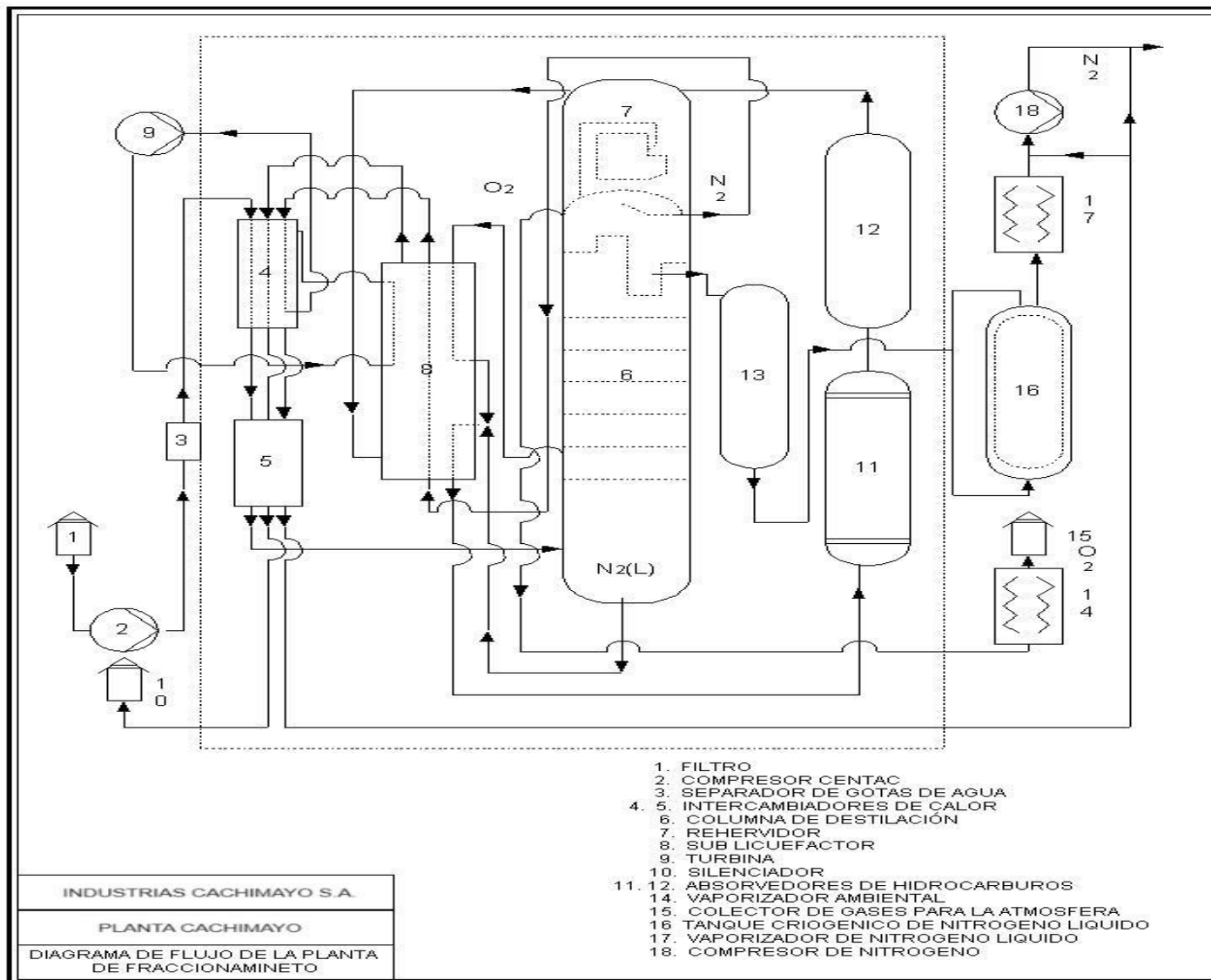




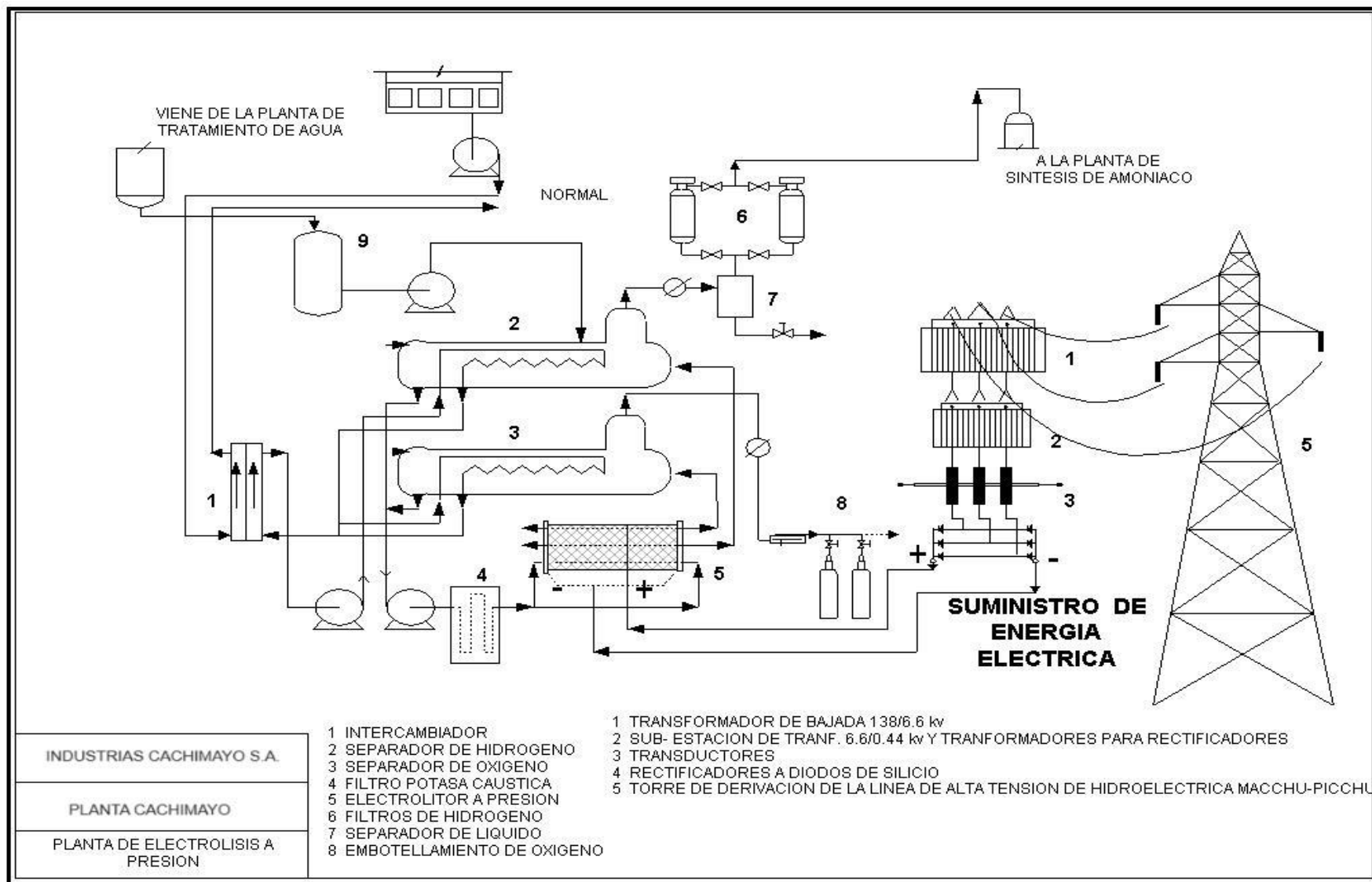
# DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PLANTA DE FRACCIONAMIENTO DE AIRE



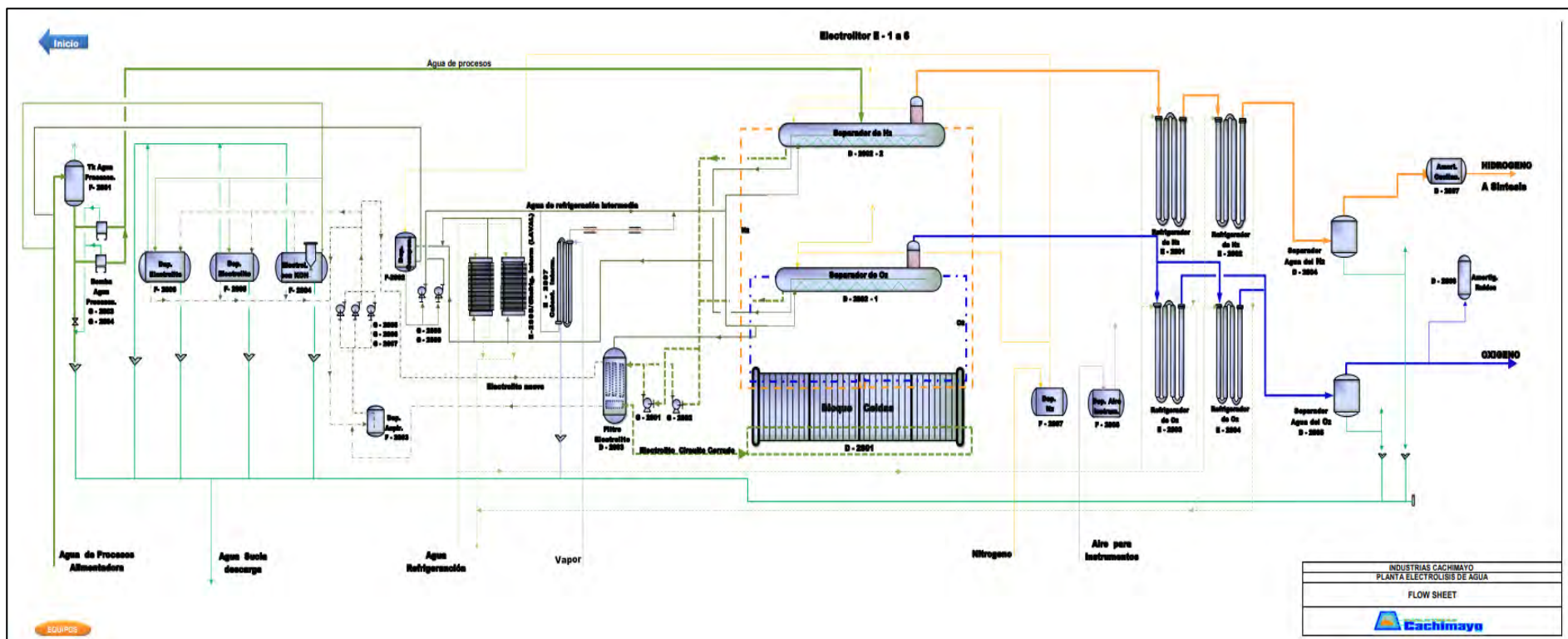
## DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PLANTA DE FRACCIONAMIENTO DE AIRE



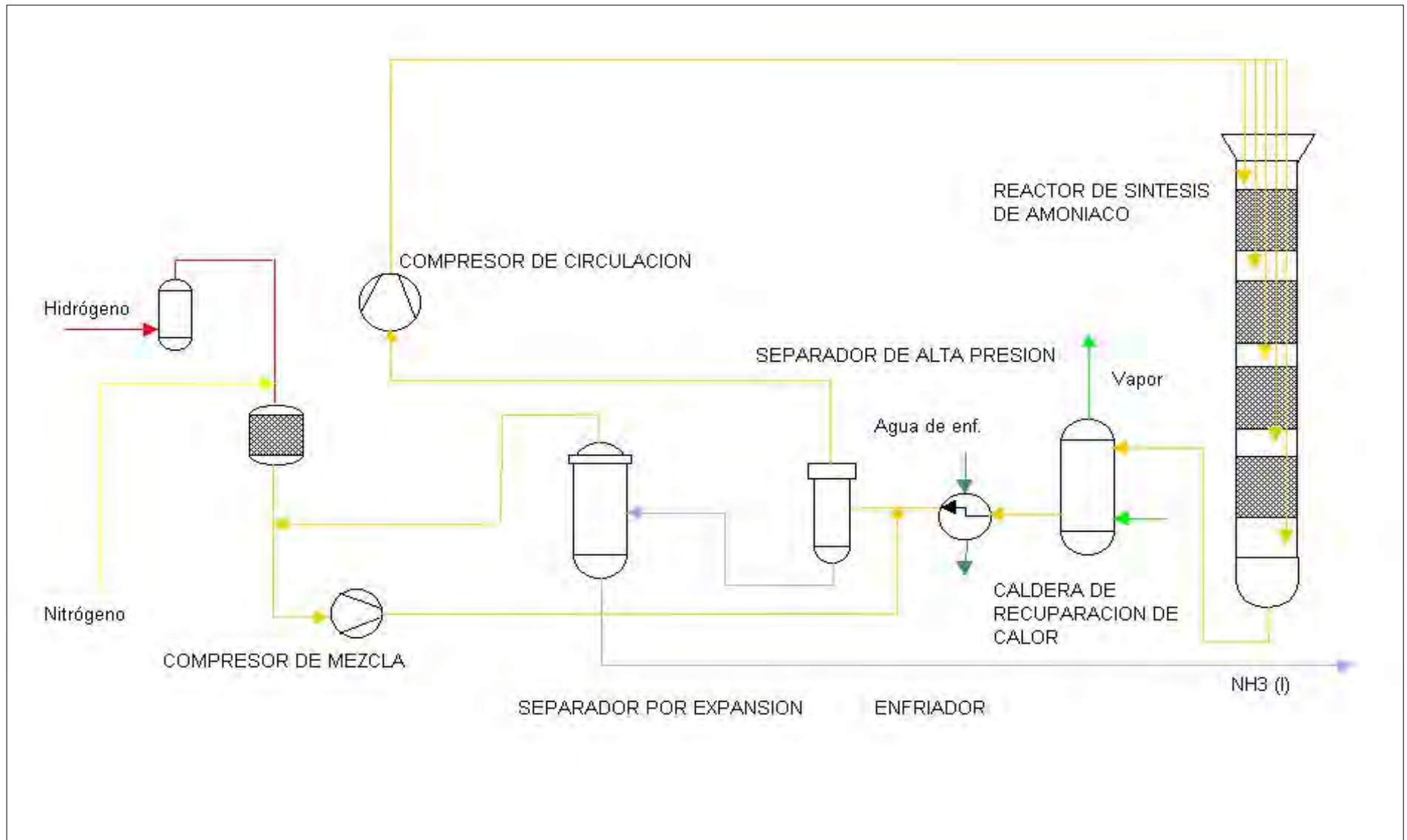
## DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE ELECTROLISIS



# DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE ELECTROLISIS

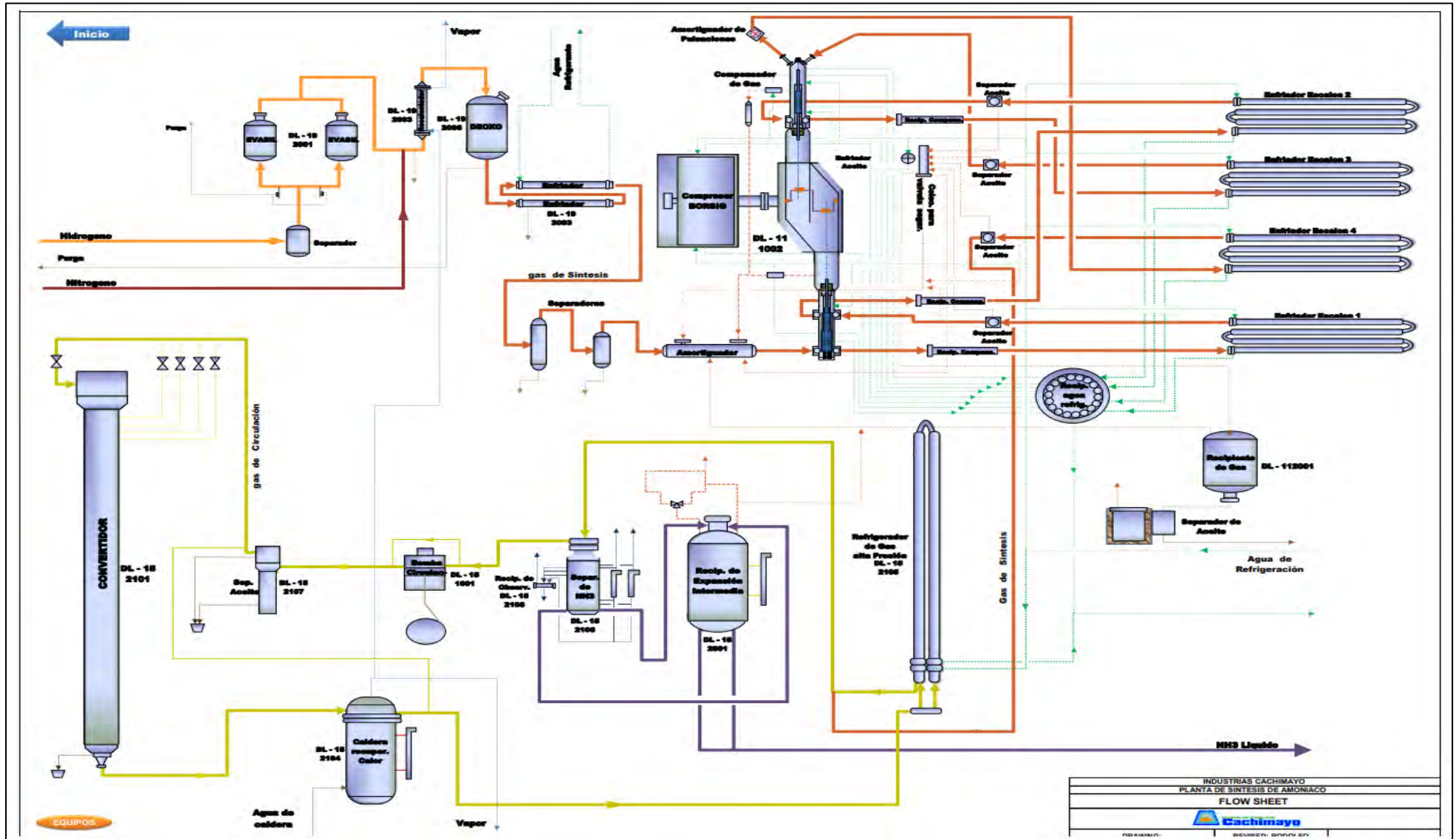


## DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PLANTA DE SINTESIS DE AMONIACO

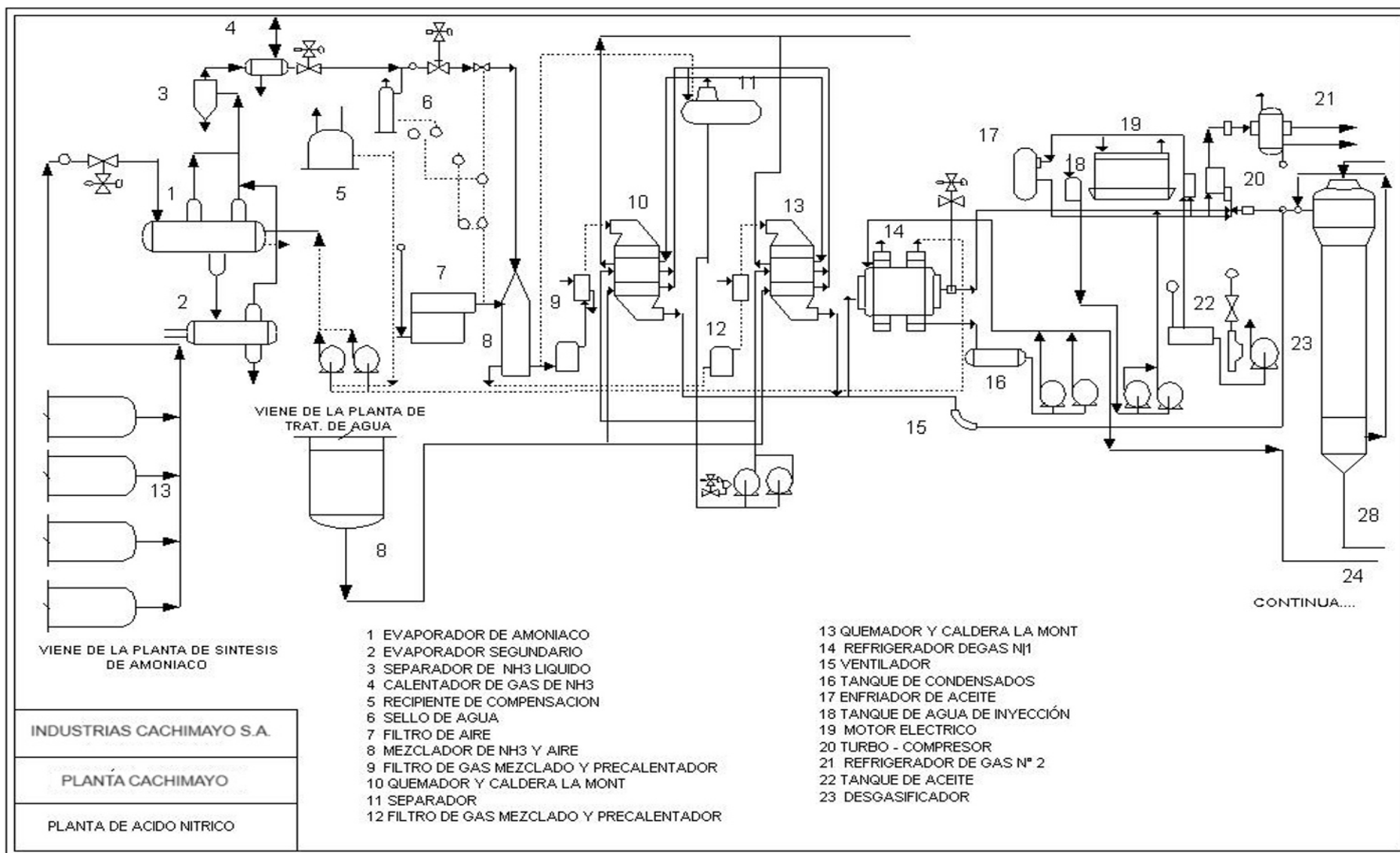




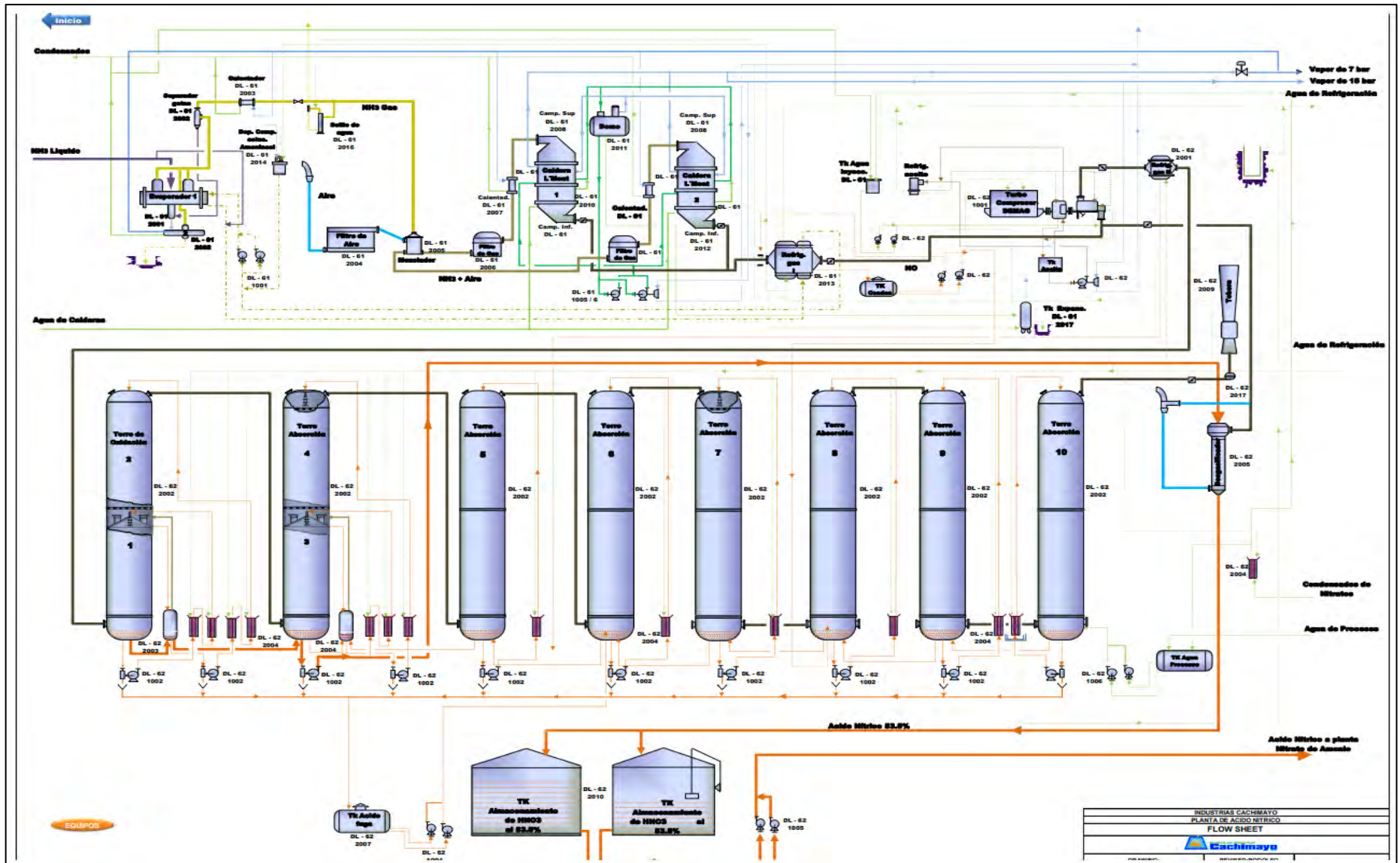
# DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PLANTA DE SINTESIS DE AMONIACO



# DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PLANTA DE ACIDO NITRICO



# DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PLANTA DE ACIDO NITRICO







# DIAGRAMA DE FLUJO PLANTA DE EMULSIÓN – DIAGRAMA GENERAL

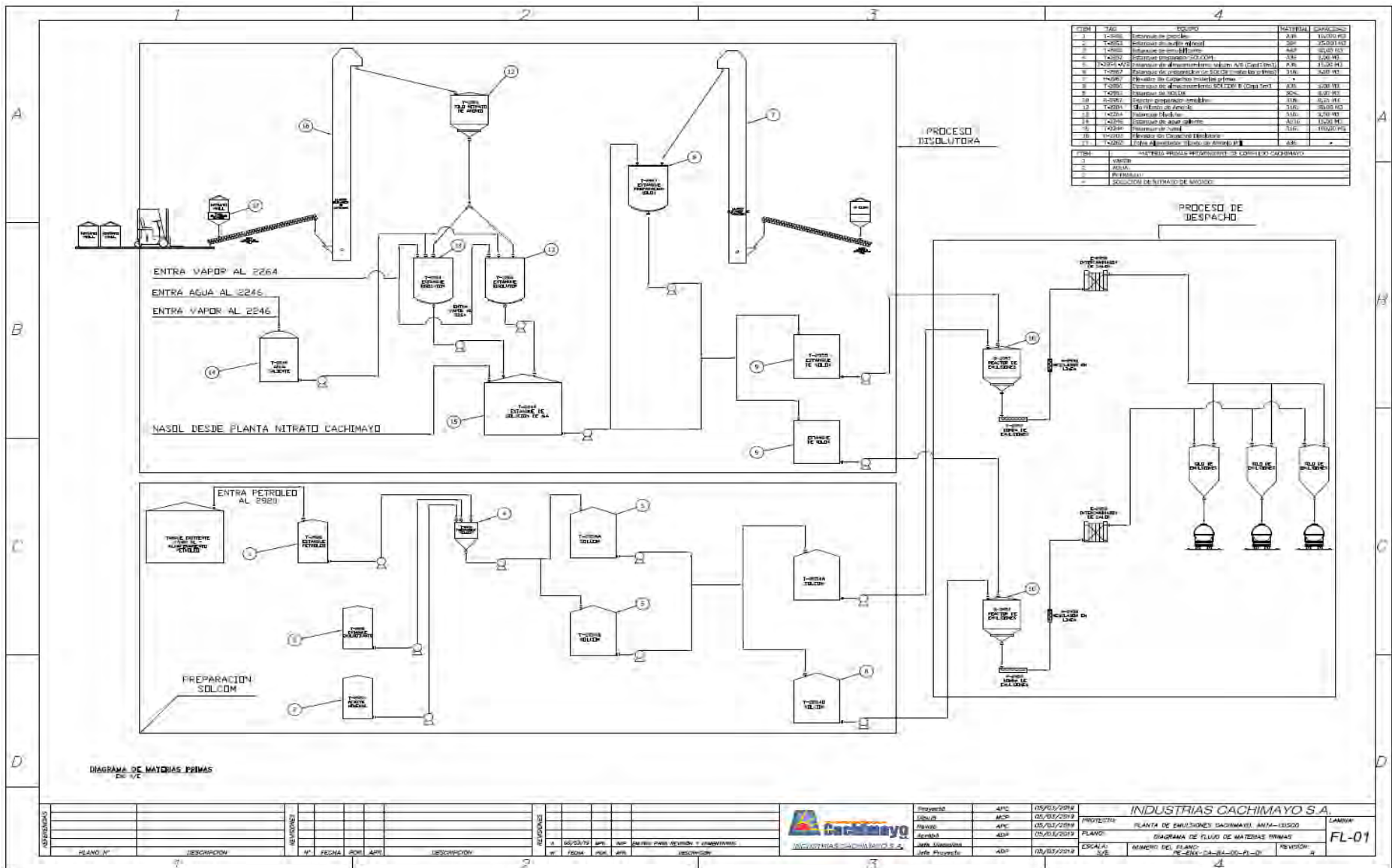
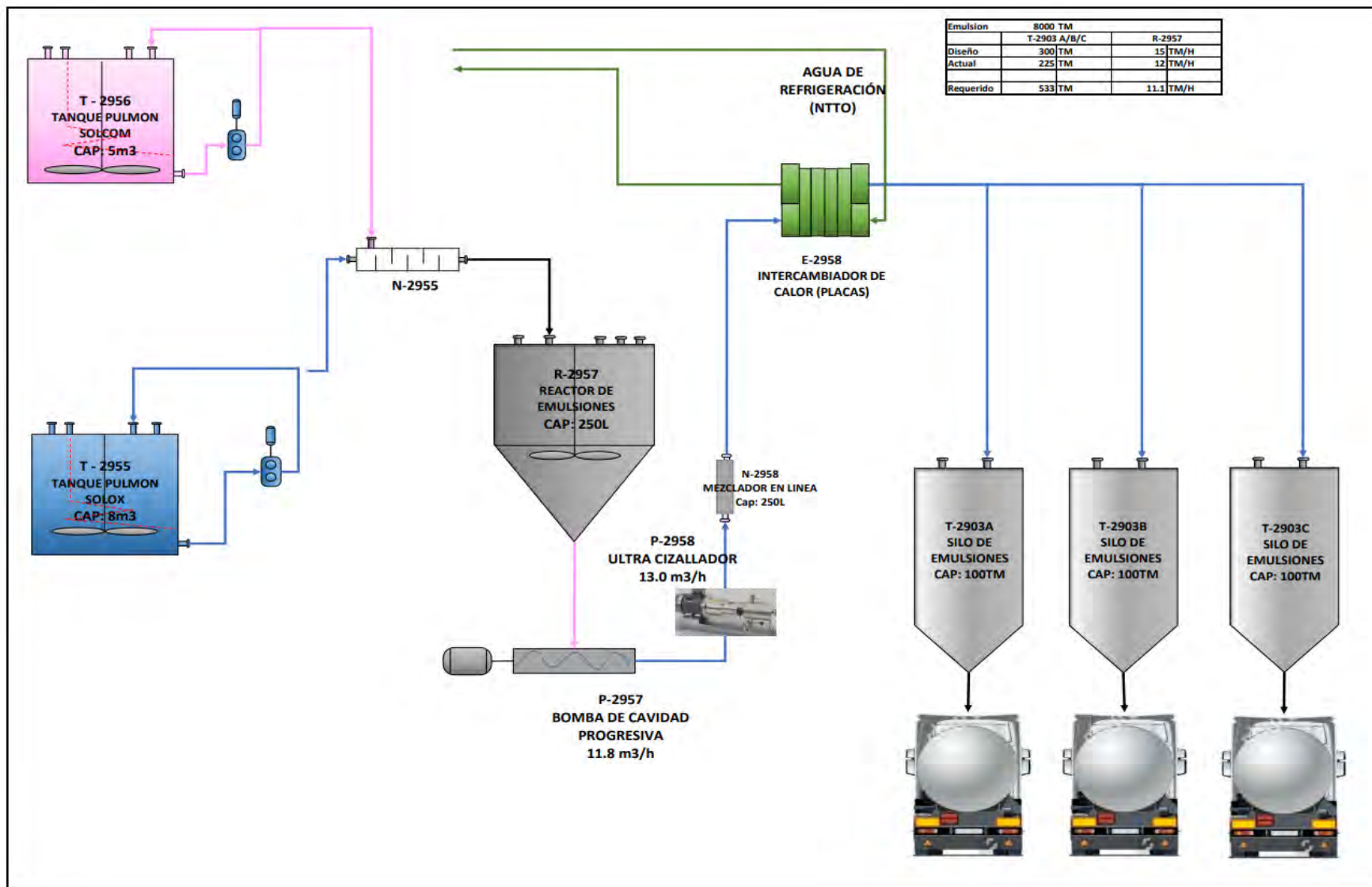
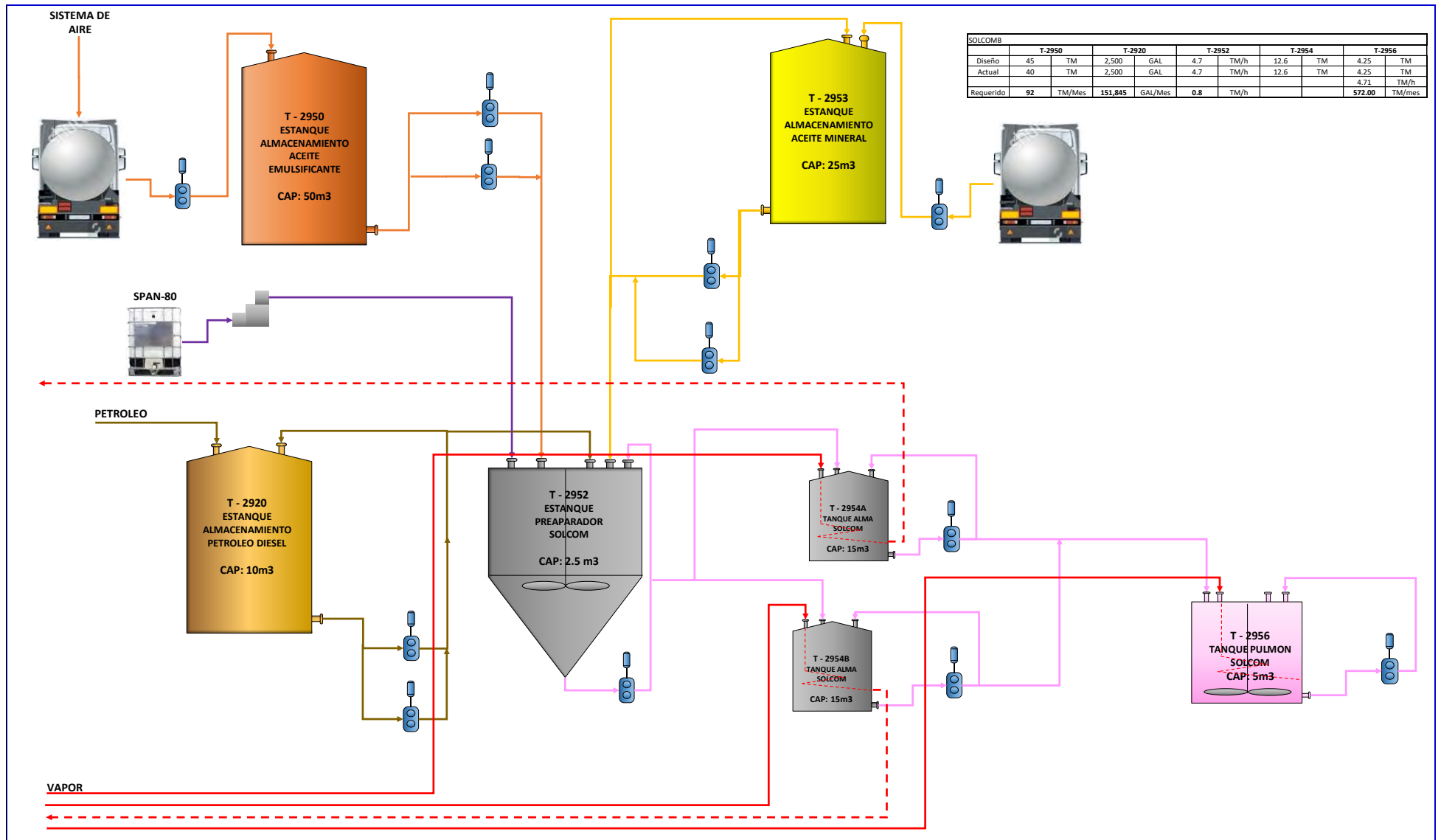


DIAGRAMA DE FLUJO PLANTA DE EMULSIÓN – AREA DE REACTOR



# DIAGRAMA DE FLUJO PLANTA DE EMULSIÓN – AREA DE SOLUCION DE COMBUSTIBLE (SOLCOMB)



# DIAGRAMA DE FLUJO PLANTA DE EMULSIÓN – AREA DE SOLUCION DE OXIDANTES (SOLOX)

