



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOTECNOLOGÍA

## **ESTUDIOS DE CORROSIÓN Y DEGRADACIÓN DE MONOETANOLAMINA EN PLANTA PRODUCTORA DE DIÓXIDO DE CARBONO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL QUÍMICA

**CAROLINA ALEJANDRA SAN MARTÍN MONSALVE**

PROFESOR GUÍA:  
FRANCISCO GRACIA CAROCA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
ÁLVARO OLIVERA NAPPA  
ALBERTO PÉREZ MIRANDA

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por Empresa INDURA S.A.

SANTIAGO DE CHILE  
OCTUBRE 2013

## ESTUDIOS DE CORROSIÓN Y DEGRADACIÓN DE MONOETANOLAMINA EN PLANTA PRODUCTORA DE DIÓXIDO DE CARBONO

Actualmente, la empresa INDURA centra la producción de dióxido de carbono en su planta ubicada en la comuna de Hualpén, Concepción. Sin embargo, en algunas ocasiones es necesario poner en funcionamiento la planta productora de este gas ubicada en la comuna de Cerrillos, Santiago. El proceso utilizado en esta planta se realiza a partir de la combustión de gas licuado. El gas obtenido de la combustión es separado, licuado y purificado por diferentes procesos, hasta alcanzar una pureza mínima de 99,9%. Para realizar la separación del dióxido de carbono de otros gases de combustión, se emplea un proceso de absorción – desorción utilizando como solvente una amina: **Monoetanolamina**.

Se han observado graves problemas de degradación de la amina junto con corrosión en algunos equipos de la planta. Por esta razón, surge como objetivo de este trabajo realizar un estudio del proceso y poder determinar los factores que pueden estar provocando dichos problemas; una vez detectados estos puntos críticos, se proponen mejoras al proceso productivo de INDURA.

De la literatura se encontraron diversos factores que pueden ser responsables, tanto de los problemas de corrosión, como de la degradación de la amina. Luego de analizar cada uno de estos factores en relación al proceso de INDURA, es posible concluir que el principal foco de corrosión se debe a la metalurgia de la planta en las instalaciones donde circula la solución de amina cargada con dióxido de carbono, principalmente en la torre de desorción. Además, la pérdida en la concentración de amina se debe a una degradación oxidativa de ésta, en la que el hierro producto de la corrosión actúa como catalizador degradando la amina. Por otra parte, los productos de degradación también contribuyen a aumentar la corrosión en el sistema y a la degradación de la amina, generándose un ciclo entre ambos problemas.

Ante esta situación es necesario establecer mejoras en el material de fabricación de la torre de desorción, siendo la mejor opción su reconstrucción con un material de mejor resistencia a la corrosión como lo es el acero inoxidable. Por otro lado, es fundamental realizar un cambio en la actual forma de almacenamiento de la solución de amina. Para ello, se recomienda implementar medidas de cierre de la planta donde se filtre la totalidad de la solución, antes de ser almacenada en estanques plásticos.

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia, quienes siempre estuvieron para mí durante este largo camino. A mis padres, María Monsalve y Joel San Martín, por ser los pilares fundamentales en mi formación y porque con sus palabras de apoyo me animaron a seguir adelante pese a las dificultades, enseñándome que la perseverancia es nuestro mejor aliado. A mis hermanos, Claudia y Joel, por su apoyo incondicional y escucharme cuando lo he necesitado. A mi sobrina favorita, Renata, que simplemente la adoro con todo mi yo.

A Javi, mi amiga de la vida, prácticamente como mi hermana, por compartir momentos significativos, por su apoyo incondicional en los buenos y malos momentos, porque siento una gran admiración por ella y lo que ha logrado en su vida, porque me enseñó el valor de la amistad y porque siempre será mi mejor amiga.

A las extraordinarias personas que encontré en Beauchef, Pilly, Carlos, Willy y Rafa, quienes estuvieron presentes en este largo camino y me enseñaron valores como la solidaridad y el compañerismo, por los valiosos consejos entregados no solo en el ámbito académico, sino también de la vida. De forma muy especial a Carlos, mi compañero en esta última etapa, por el tiempo, la dedicación y los grandes momentos compartidos.

## **AGRADECIMIENTOS**

A los profesores Francisco Gracia y Álvaro Olivera por el asesoramiento entregado durante este proceso, por compartir sus conocimientos y orientarme en aquellos momentos más difíciles del periodo de trabajo.

A la empresa Indura S.A, por abrirme las puerta, dándome la posibilidad de trabajar con ellos y por mostrarme distintos procesos que ahí se realizan. De forma muy especial a Alberto Pérez, quién además de ser el encargado de este trabajo compartió conmigo algunas de sus experiencias que de seguro me ayudarán a desempeñarme mejor como ingeniera.

A los compañeros de ingeniería, quienes me permitieron ser parte de su área de trabajo sintiéndome como una más de ellos. También a los compañeros del CETI, especialmente a Roberto y Natalia, por las conversaciones tanto del ámbito laboral como social y, porque además de compartir sus conocimientos y ayudarme con los ensayos, me permitieron conocer parte del trabajo que ellos realizan.

A don Ricardo Astudillo, que siempre estuvo presente para responder a cualquier inquietud y solicitud, por compartir sus experiencias laborales y por todos los consejos entregados.

Finalmente a la mejor de todas, a Gina, por su gran disposición a ayudarnos y porque siempre tiene una solución a nuestros problemas.

## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	La Empresa: INDURA S.A .....	1
1.2	Dióxido de Carbono.....	3
1.2.1	Producción de Dióxido de Carbono.....	5
1.2.1.1	Sistemas de producción de dióxido de carbono .....	5
1.2.1.2	Sistemas de recuperación de dióxido de carbono como subproducto .....	5
1.2.1.3	Sistemas de recuperación de dióxido de carbono desde la fermentación.....	6
1.2.2	Aplicaciones del Dióxido de Carbono .....	6
1.2.3	Propiedades del Dióxido de Carbono .....	7
1.3	Proceso Productivo: Planta de Cerrillos.....	8
1.4	Solventes Químicos en la Captura de Dióxido de Carbono.....	10
1.4.1	Monoetanolamina en la captura de dióxido de carbono.....	12
1.4.2	Reacciones químicas entre soluciones de etanolaminas y dióxido de carbono. .	14
1.4.2.1	Mecanismo 1 .....	15
1.4.2.2	Mecanismo 2 .....	15
1.4.2.3	Mecanismo 3 .....	16
1.5	Problema a Abordar y Alcances del Proyecto .....	17
1.6	Objetivos .....	18
1.6.1	Objetivo General.....	18
1.6.2	Objetivos Específicos .....	18
2.	ANTECEDENTES.....	19
2.1	Problemas Generales en la Operación con Alcanolaminas. ....	19
2.1.1	Corrosión. ....	19
2.1.1.1	Concentración de Oxígeno.....	21
2.1.1.2	Concentración de dióxido de azufre .....	22
2.1.1.3	Carga de dióxido de carbono .....	23
2.1.1.4	Presencia de sales estables al calor .....	25
2.1.2	Contaminantes en el solvente.....	26

2.1.3	Formación de espuma .....	27
2.2	Degradación de la Monoetanolamina.....	27
2.2.1	Degradación por Polimerización .....	28
2.2.2	Degradación Térmica.....	28
2.2.3	Degradación Oxidativa .....	28
3.	METODOLOGÍA DE TRABAJO .....	30
3.1	Medición de Velocidades de Corrosión. ....	30
3.1.1	Materiales y Equipos.....	31
3.1.2	Procedimiento .....	31
3.2	Medición de la Concentración de Monoetanolamina. ....	33
3.2.1	Materiales y Equipos.....	34
3.2.2	Procedimiento .....	34
4.	RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	36
4.1	Balances de masa en la caldera.....	36
4.2	Carga de Dióxido de carbono en la Amina .....	38
4.3	Concentración de Amina .....	39
4.4	Compuestos Sulfurados .....	39
4.5	Metalurgia de la Planta .....	42
4.5.1	Ensayos de espectrometría de emisión óptica.....	42
4.5.2	Ensayos de Corrosión .....	43
4.5.2.1	Cupones en el estanque de Monoetanolamina .....	44
4.5.2.2	Cupones expuestos a solución de amina a elevada temperatura. ....	45
4.5.2.3	Cupones expuestos a solución de amina a elevada concentración y temperatura .....	46
4.5.2.4	Cupones expuestos a solución de amina a elevada concentración, elevada temperatura y con presencia de dióxido de carbono. ....	47
5.	CONCLUSIONES.....	51
6.	RECOMENDACIONES .....	52
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55

ANEXO A	Características de Alcanolaminas.....	59
A.1	Dietanolamina (DEA).....	59
A.2	Trietanolamina (TEA).....	59
A.3	Diglicolamina (DGA) .....	59
A.4	Diisopropilamina (DIPA) .....	60
A.5	Metildietanolamina (MDEA) .....	60
ANEXO B	Composición del Gas Licuado .....	61
ANEXO C	Características Del Lodo De La Planta de CO <sub>2</sub> .....	62

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Especificaciones del producto: dióxido de carbono grado alimenticio.....	7
Tabla 2: Nivel de impurezas máximas en el Gas.....	7
Tabla 3: Características de la Monoetanolamina. ....	14
Tabla 4: Carga de CO <sub>2</sub> y concentraciones máximas recomendadas para diferentes alcanolaminas .....	25
Tabla 5: Fuentes de los principales aniones productores de sales termoestables.....	26
Tabla 6: Flujos molares, [mol/h] de los principales compuestos en la reacción de combustión, a la entrada y salida de la caldera. ....	37
Tabla 7: Resultados de las espectrometrías.....	41
Tabla 8: Resultados de la espectrometría de emisión óptica. ....	43
Tabla 9: Cupones en estanque de MEA.....	44
Tabla 10: Cupones en MEA a 110 [°C] con corrección de la concentración. ....	46
Tabla 11: Cupones con doble de concentración de MEA.....	47
Tabla 12: Cupones expuestos solución de Amina cargada con dióxido de carbono. ....	48
Tabla 13: Cálculo de humedad en el "lodo" .....	62



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Estructura de la molécula de dióxido de carbono.....	3
Figura 2: Diagrama de fases del dióxido de carbono. ....	4
Figura 3: Tecnología Postcombustión. ....	8
Figura 4: Esquema del proceso de absorción - desorción de dióxido de carbono a partir de aminas.....	9
Figura 5: Estructura química de alcanolaminas empleadas en el proceso de captura de CO <sub>2</sub> .....	11
Figura 6: Clasificación de las aminas. ....	12
Figura 7: Estructura química de la monoetanolamina. ....	13
Figura 8: Mecanismo de reacción termolecular para la formación de carbamato según Crooks y Donnellan.....	16
Figura 9: Corrosión en la torre separadora luego de 15 años de operación. ....	17
Figura 10: Velocidad de corrosión en acero al carbono a partir de MEA al 20% cargada con CO <sub>2</sub> . ....	23
Figura 11: Mecanismo de abstracción de electrón en la degradación oxidativa de la monoetanolamina. ....	29
Figura 12: Sistema de Refrigeración.....	31
Figura 13: Cupones de acero ASTM A36. ....	32
Figura 14: Equipo e implementos utilizados en los ensayos de corrosión.....	32
Figura 15: Muestras extraídas del fondo del absorbedor en la planta de CO <sub>2</sub> . ....	40
Figura 16: Muestras en el laboratorio. ....	41
Figura 17: Cupones después del ensayo de corrosión. ....	45
Figura 18: Cupones de corrosión después de haber sido sometidos a la solución de monoetanolamina. ....	48
Figura 19: Muestras de monoetanolamina. ....	54

# 1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo ha sido realizado en conjunto con la empresa INDURA S.A., la que pertenece al rubro metalmecánico, gases y gases medicinales, satisfaciendo las necesidades de diversos sectores industriales en materia de gases, además de comercializar equipos y productos complementarios para soldaduras. La empresa cuenta con una serie de sucursales y plantas productivas a lo largo de Chile y América. El trabajo ha sido ejecutado en la planta productora de dióxido de carbono ubicada en la comuna de Cerrillos, Santiago, la que tiene una producción aproximada de 30 [ton/día] y, actualmente, opera de forma estacional. El proceso productivo inicia con la combustión de gas natural o gas licuado y, desde el gas obtenido, se realiza la separación del dióxido de carbono de los otros gases de combustión, mediante un proceso de absorción – desorción utilizando como solvente la **Monoetanolamina**. El dióxido de carbono es licuado y purificado por diferentes procesos hasta alcanzar una pureza mínima de 99,9%.

Se han observado diversos inconvenientes en el proceso productivo de INDURA. Este trabajo se centra en los problemas de corrosión de las instalaciones de la planta y en la pérdida en la capacidad del solvente químico para absorber y desorber el dióxido de carbono.

## 1.1 LA EMPRESA: INDURA S.A

INDURA es una empresa internacional dedicada a entregar soluciones tecnológicas integrales asociadas al uso de gases y soldaduras. Dentro de los principales productos que fabrica y comercializa (respondiendo al rubro al que pertenece) se pueden mencionar: electrodos y equipamiento para soldadura, diversos tipos de gases, como los que se obtienen por separación fraccionada del aire (Oxígeno, Nitrógeno y Argón), dióxido de carbono, entre otros <sup>[1]</sup>.

El mercado de INDURA abarca una amplia variedad de industrias entre los que se pueden mencionar <sup>[1]</sup>:

- **Metalmecánica:** Empresas y usuarios de diferentes tamaños y especialidades conforman este tipo de industrias, abarcando principalmente los sectores minero, comercio, astilleros, maestranzas, construcción y montaje, carpintería metálica y forestal entre otros. Para ellos, INDURA elabora todo lo necesario para sus procesos de soldadura y corte, ya sea para la fabricación de piezas, construcción y montaje de estructuras metálicas, recuperación y mantención de piezas desgastadas entre otros.
- **Salud:** La empresa ha desarrollado el área Indura Médica, la que aporta en el ámbito de la terapia respiratoria con una variedad de gases medicinales, equipos médicos, accesorios complementarios y servicios.

- **Procesos Industriales:** INDURA desarrolla soluciones integrales que apoyan los procesos de variadas industrias, tales como minería, metalurgia, química, petroquímica, celulosa, vidrio, caucho, plástico, cemento entre otras.
- **Gases Científicos:** INDURA ofrece una variedad de gases y mezclas especiales que cumplen las normas en términos de exactitud y pureza, para ser usados en laboratorios, centros de investigación, de desarrollo, universidades e instituciones.
- **Alimentos:** INDURA produce gases de alta pureza que permiten reemplazar elementos químicos, conservando los alimentos por más tiempo y manteniendo inalterables sus características de sabor, color, textura y aroma.
- **Seguridad Industrial:** INDURA provee de elementos de protección personal a sus clientes, orientados plenamente a los requerimientos de seguridad de los trabajadores dentro de las empresas.
- **Vitivinícola:** INDURA provee de gases inertes, como dióxido de carbono y nitrógeno, para la producción del vino, evitando de esta manera la sobre-oxidación.
- **Gestión Integral de Aguas:** INDURA crea e implementan innovadoras soluciones en gases para la descontaminación de efluentes líquidos y domésticos.
- **Acuícola:** INDURA fabrica diversos tipos de gases que benefician la producción de peces y mariscos.

INDURA posee sucursales y plantas productivas a lo largo de Chile y América; específicamente, la sucursal de Cerrillos cuenta, además de la planta de dióxido de carbono, con una planta de *hielo seco*, una planta de electrodos para soldaduras, una planta de llenado de estanques y su centro de investigación, CETI. Cabe señalar que la planta de dióxido de carbono cuenta con una capacidad de producción de aproximadamente 30 toneladas al día.

Es importante mencionar que, actualmente, INDURA realiza la producción de dióxido de carbono en su planta recuperadora de dióxido de carbono localizada en Hualpén, Concepción, con una producción aproximada de 120 toneladas al día. El dióxido de carbono se recupera desde una corriente de *tail gas* proveniente de la planta de Hidrógeno de ENAP Refinerías S.A.

La corriente que INDURA utiliza como materia prima (*tail gas*), años atrás se utilizaba en la refinería como combustible siendo el dióxido de carbono liberado a la atmósfera como uno de los productos de la combustión. El proceso de la planta recuperadora de dióxido de carbono consiste en redireccionar esa corriente hasta la Planta de INDURA para retirar de ella el

contenido de dióxido de carbono y comercializarlo, mientras que el excedente es retornado a la refinería como *off gas* para su posterior combustión en hornos.

Luego del terremoto del año 2010, el dióxido de carbono producido, en ocasiones ha tenido problemas, debido a que presenta un alza en la concentración de hidrocarburos. Esta alza se debe a que la concentración de hidrocarburos en el *tail gas* no es la habitual y el proceso de INDURA, como tal, no es capaz de eliminarlos por completo. Cuando la situación anterior se presenta, INDURA pone en funcionamiento su planta productora de dióxido de carbono de Cerrillos; si bien el proceso de producción a partir de combustión no resulta rentable, para INDURA tiene mayor importancia no perder un cliente al no poder suministrar el producto requerido.

## 1.2 DIÓXIDO DE CARBONO

Joseph Black, físico y químico escocés, descubrió el dióxido de carbono alrededor del año 1750. A temperatura ambiente (20 - 25 [°C]), el dióxido de carbono es un gas inodoro e incoloro, ligeramente ácido y no inflamable <sup>[2]</sup>.

El dióxido de carbono, también conocido como bióxido de carbono, óxido de carbono (IV) y anhídrido carbónico, es una molécula cuya fórmula química es CO<sub>2</sub>. Esta molécula presenta geometría lineal y está formada por un átomo de carbono que está unido a dos átomos de oxígeno; el átomo de carbono se localiza en el centro de la molécula y participa con dos enlaces covalentes dobles, uno con cada átomo de oxígeno. Cada enlace doble está formado por dos pares de electrones compartidos por los dos átomos que participan en el enlace <sup>[2]</sup>. En la Figura 1 se muestra la estructura de esta molécula.

El dióxido de carbono se encuentra principalmente en el aire, pero también está presente en el agua formando parte del ciclo del carbono, por otro lado, se encuentra en la atmósfera en baja concentración, entre 0,03 y 0,06% en volumen <sup>[2,4]</sup>.

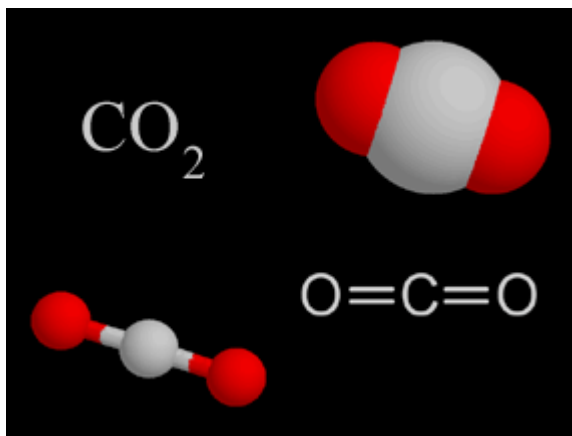


Figura 1: Estructura de la molécula de dióxido de carbono <sup>[3]</sup>.

A pesar de que el dióxido de carbono existe principalmente en su forma gaseosa, bajo determinadas condiciones se puede encontrar también en estado líquido y sólido, tal como se muestra en la Figura 2:

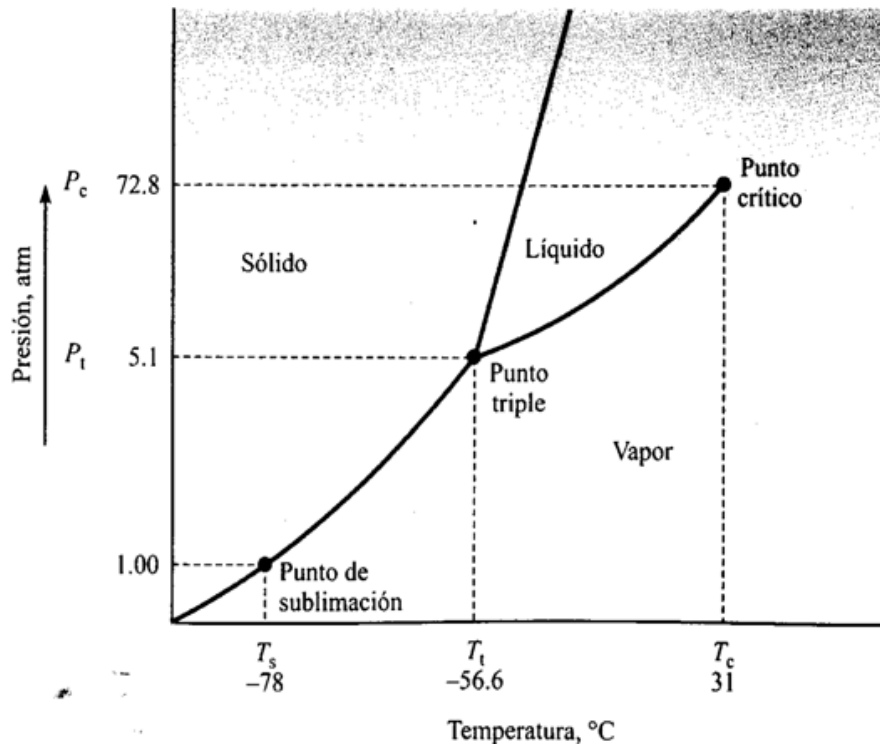


Figura 2: Diagrama de fases del dióxido de carbono <sup>[5]</sup>.

### Estado gaseoso

A presiones y temperaturas normales el dióxido de carbono se encuentra en estado gaseoso. Pesa un 53% más que el aire, es incoloro, no tóxico, soluble en agua y normalmente inodoro <sup>[6]</sup>.

### Estado líquido

A bajas temperaturas y altas presiones el gas se licúa y tiene una densidad similar a la del agua. Por encima de 31 [°C] no se puede licuar a ninguna presión (temperatura crítica). El CO<sub>2</sub> líquido sólo puede existir entre su temperatura crítica (31 [°C]) y la del punto triple (-56,6 [°C]) correspondiéndole las presiones de 72,8 [atm] y 5,1 [atm], respectivamente.

El punto triple es la temperatura y presión en la que el dióxido de carbono existe en los tres estados simultáneamente <sup>[5,6]</sup>.

## **Estado sólido**

Al expandirse a la atmósfera, el dióxido de carbono líquido se solidifica en forma de nieve carbónica. Esta nieve se sublima (pasa a estado gaseoso directamente) a  $-78,5$  [°C]. La nieve carbónica comprimida con pistones hidráulicos a alta presión se convierte en hielo seco, compacto, translúcido y de gran capacidad frigorífica (152 [Kcal/kg])<sup>[5,6]</sup>.

Este hielo seco se produce y se distribuye en diversos formatos:

- Pellets de 3 [mm] de diámetro
- Nuggets cilíndricos de 25 mm de longitud
- Pastillas
- Bloques

### **1.2.1 Producción de Dióxido de Carbono**

Existen diversos procesos para la obtención de dióxido de carbono, en algunos de ellos este gas es producido directamente, mientras que en otros es recuperado como un sub-producto<sup>[7]</sup>.

#### **1.2.1.1 Sistemas de producción de dióxido de carbono**

El dióxido de carbono se genera cuando se quema cualquier sustancia que contiene carbono. El proceso utiliza combustión directa, donde el aire y el combustible se introducen en un quemador para producir un gas de combustión que consta, principalmente, de dióxido de carbono y nitrógeno. Este gas de combustión es enfriado y depurado (*scrubber*), pasando luego a una torre de absorción. Allí el dióxido de carbono se absorbe en una solución de alcanolamina, mientras que el nitrógeno se purga a la atmósfera. La solución rica en dióxido de carbono se envía a una torre separadora (*stripper*) donde se utiliza el calor de la misma combustión para remover el dióxido de carbono. Finalmente, este gas pasa por un proceso de purificación que puede variar según el sistema que se use, para luego ser condensado y almacenado. Éste corresponde al proceso utilizado por INDURA en su planta de Cerrillos.

#### **1.2.1.2 Sistemas de recuperación de dióxido de carbono como subproducto**

En estos procesos la materia prima es una corriente que puede provenir de plantas de fabricación de hidrógeno, metanol, amoníaco, entre otros. Consiste esencialmente en enfriadores, secadores, separadores, condensadores y una columna de *stripping* que ayudan a sacar impurezas de la corriente y separar el dióxido de carbono de los otros gases. Éste es el tipo de proceso que utiliza INDURA en su planta de Hualpén.

### **1.2.1.3 Sistemas de recuperación de dióxido de carbono desde la fermentación**

Este proceso se utiliza comúnmente en cervecerías y consta, principalmente, de una trampa de espuma donde se atrapa este material que puede venir desde la fermentación, un depurador (*scrubber*) que elimina la mayor parte de las impurezas solubles en agua (como el alcohol), un enfriador que condensa el gas y remueve el agua contenida en él, torres desodorizantes que eliminan impurezas como compuestos orgánicos y sulfurados, un secador/desodorizante que remueve trazas de impurezas y agua y, por último, una etapa de licuefacción (*stripping*) donde el dióxido de carbono gaseoso pasa a estado líquido por el uso de refrigeración. Esto permite un almacenamiento conveniente del dióxido de carbono y, además, proporciona una purificación adicional de este gas por la eliminación parcial de los gases no condensables (oxígeno y nitrógeno), llegando incluso a un gas con 99,998% de pureza.

### **1.2.2 Aplicaciones del Dióxido de Carbono**

El dióxido de carbono puede ser empleado de diversas formas. Dentro de sus principales usos se pueden mencionar <sup>[4]</sup>:

- **Uso Industrial:** El dióxido de carbono es ampliamente usado en la creación de atmósferas protectoras para soldaduras. En las fundiciones se utiliza como agente endurecedor de moldes de arena. En la industria de alimentos tiene importantes aplicaciones: Carbonatación de bebidas, aguas minerales, entre otros, además de protección de vinos, cervezas y jugos de frutas contra la oxidación por contacto con aire. También se usa como anestésico antes de la matanza de animales y en congelación.  
Además se utiliza en extintores de incendio, debido a que el dióxido de carbono, al ser más denso que el aire, impide que el oxígeno tenga acceso al fuego y, como resultado, el material en combustión es privado del oxígeno que necesita para continuar ardiendo.
- **Uso medicinal:** Es utilizado para crear una atmósfera artificial con características fisiológicas para la implantación de órganos o también en la máquina corazón pulmón, usada en cirugía cardíaca, donde permite mantener los niveles de dióxido de carbono sanguíneo en rangos normales.
- **Grado alimento:** Producto fabricado de acuerdo a las necesidades y a las exigencias, cada vez mayores, del mercado alimenticio. Dentro de sus ventajas, se pueden mencionar: gas libre de contaminación física, química y microbiológica, de alta pureza y con estándares de calidad internacional.

### 1.2.3 *Propiedades del Dióxido de Carbono*

INDURA produce dióxido de carbono grado alimenticio, con una pureza mínima del 99,9%. Este gas posee las especificaciones mostradas en las Tabla 1 y Tabla 2 . Sus mercados potenciales son la industria alimenticia, medicinal, metalúrgica y ambiental. La industria alimenticia es el consumidor más importante de este gas y por lo general lo usa en <sup>[1,4]</sup>:

- Enfriamiento de productos (Carnes, pastas, uvas).
- Coberturas de estanques de almacenamiento de productos oxidables (vinos, jugos).
- Carbonatación (vinos, bebidas, agua mineral).
- Conservación de alimentos.
- Protección de alimentos en atmosfera modificada (Envasado de alimentos tipo *snacks*).

**Tabla 1: Especificaciones del producto: dióxido de carbono grado alimenticio <sup>[4]</sup>.**

<b>Propiedades Físicas del Gas</b>			
Peso Molecular	44,01 [g/mol]	Punto. de sublimación, 1 [atm]	-78,5 [°C]
Densidad sólido, 1 [atm]	1.562 [kg/m <sup>3</sup> ]	Presión Critica	73,83 [bar]
Densidad gas, 15[°C],1 [atm]	1,87 [kg/m <sup>3</sup> ]	Temperatura Critica	31,06 [°C]
Densidad gas, 0[°C], 1 [atm]	1,977 [kg/m <sup>3</sup> ]	Gravedad específica, 0[°C], 1[atm]	1,529 [ ]

**Tabla 2: Nivel de impurezas máximas en el Gas <sup>[4]</sup>.**

<b>Pureza e Impurezas del Gas</b>			
<b>CO</b>	< 10 ppm	<b>H<sub>2</sub>O</b>	< 30 ppm
<b>O<sub>2</sub></b>	< 30 ppm	<b>NO<sub>2</sub></b>	< 2.5 ppm
<b>H<sub>2</sub>S</b>	< 0.1 ppm	<b>COS</b>	< 0.1 ppm
<b>NO</b>	< 2.5 ppm	<b>Físicas</b>	No detectado
<b>SO<sub>2</sub></b>	< 0.1 ppm	<b>Microbiológicas</b>	No detectado
<b>Benceno</b>	< 0.5 ppm		



### 1.3 PROCESO PRODUCTIVO: PLANTA DE CERRILLOS

INDURA basa su proceso de producción de dióxido de carbono en la planta ubicada en Cerrillos, en los sistemas de captura establecidos en la tecnología de postcombustión. Esta técnica se fundamenta en la separación del dióxido de carbono desde los gases generados en el proceso de combustión a partir de combustibles fósiles. La Figura 3 muestra un esquema de la tecnología antes mencionada. Los sistemas de postcombustión son los más desarrollados hasta el momento y acumulan cierta experiencia comercial a una escala suficientemente alta, en contraste a las tecnologías de pre-combustión, oxi-combustión, entre otras <sup>[8]</sup>.

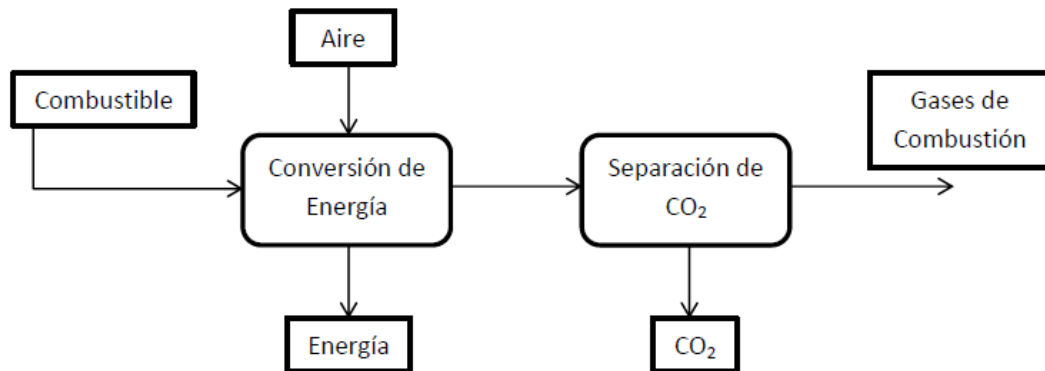


Figura 3: Tecnología Postcombustión <sup>[8]</sup>.

Existen diversos procesos que pueden ser empleados en la captura del dióxido de carbono desde los gases de combustión: absorciones químicas y físicas, adsorciones, uso de membranas, entre otras. Numerosos estudios comparativos han demostrado que la mejor opción son los procesos de absorción basados en solventes químicos, dado que estos procesos ofrecen una alta eficiencia de captura y selectividad al utilizar el carácter reversible de la reacción química entre el solvente acuoso alcalino con el gas ácido <sup>[8]</sup>. Ésta última constituye la tecnología de captura empleada por INDURA en su proceso, utilizando como solvente químico la monoetanolamina.

El proceso productivo en la planta de dióxido de carbono de Cerrillos comienza con la quema de gas licuado en la caldera. Los gases de combustión que contienen nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, pequeñas cantidades de óxidos de azufre, además de otros componentes, son depurados en el lavador de gases, lugar donde se remueven estos óxidos.

La composición de óxidos de azufre en los gases de combustión depende del contenido de azufre en el combustible y el exceso de aire utilizado en la reacción. Los compuestos sulfurados deben ser eliminados del proceso debido a que reaccionan con la monoetanolamina de una manera similar que el dióxido de carbono, lo que es indeseable en el producto final. La reacción

entre estos óxidos y la monoetanolamina es irreversible, provocando la desactivación del absorbente <sup>[9]</sup>.

La eliminación de los compuestos sulfurados se realiza mediante absorción en soluciones líquidas (lavado en húmedo), proceso que se lleva a cabo en torres empacadas a partir del contacto directo en contracorriente entre los gases de combustión (flujo ascendente) y la solución líquida (flujo descendente). Este proceso tiene una eficiencia superior al 95% debido a que existe un excelente contacto entre los gases y el líquido en el lavador de gases, siendo adecuado para el tratamiento de los gases con alto contenido de azufre <sup>[9]</sup>.

Del lavador de gases (equipo que además cumple la función de disminuir la temperatura de la corriente proveniente de la reacción de combustión), los gases entran al absorbedor (flujo ascendente) donde a una temperatura aproximada de 50 [°C] el dióxido de carbono es absorbido por una solución de monoetanolamina alimentada en contraflujo con los gases de combustión; la amina reacciona químicamente con el dióxido de carbono para recuperar aproximadamente el 98% del dióxido de carbono desde el gas de combustión <sup>[8]</sup>. El resto de los gases salen por la parte superior del absorbedor siendo liberados a la atmósfera.

El solvente que ha absorbido el dióxido de carbono (*lejía rica*), abandona por la parte inferior el absorbedor y se bombea hacia la parte superior de la torre de desorción a través de un intercambiador de calor (llamado enfriador de lejía); en este intercambiador la *lejía rica* es calentada y la *lejía pobre* es enfriada. En la torre de desorción se produce la regeneración del solvente a una temperatura más alta, aproximadamente 110 [°C], y a una presión de 1,4 [bar]. Para mantener las condiciones de regeneración es necesario suministrar energía térmica al sistema, provocando que gran cantidad de energía se consuma principalmente en el calentamiento del solvente para la desorción del dióxido de carbono. La Figura 4 muestra de forma esquemática los procesos y equipos empleados en la absorción y desorción del dióxido de carbono.

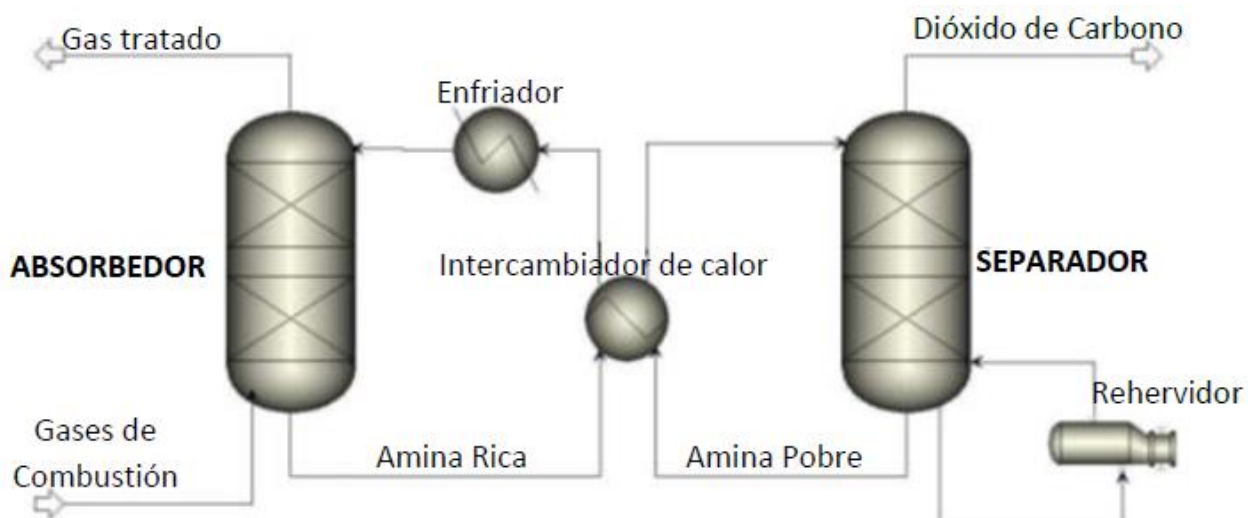


Figura 4: Esquema del proceso de absorción - desorción de dióxido de carbono a partir de aminas. <sup>[3]</sup>

La torre de desorción se encuentra conectada a la caldera por lo que la monoetanolamina, que ahora se encuentra libre de dióxido de carbono, se bombea desde la caldera a través del enfriador de lejía donde se disminuye su temperatura y se devuelve al absorbedor.

El dióxido de carbono, junto con una elevada cantidad de vapor (aproximadamente 5.500 kg/h), sale por la parte superior de la torre de desorción y se dirigen al enfriador de gases, donde el vapor se condensa y el dióxido de carbono se enfría. Del enfriador de gases, el dióxido de carbono pasa a través del lavador de permanganato de potasio, lugar donde se remueve todo vapor de monoetanolamina. Luego, este gas pasa al compresor de dióxido de carbono, donde se comprime a alrededor de 15 [bar], en dos etapas. Del compresor, el dióxido de carbono pasa al deshidratador donde se seca a punto de rocío con la finalidad de eliminar toda el agua que pueda llevar la corriente (el agua y vapor de monoetanolamina se recirculan al estanque de amina). Posteriormente, el dióxido de carbono pasa a través de un filtro de carbono activado que remueve cualquier olor y, luego, al condensador donde se enfría a aproximadamente -30 [°C] y es licuado por la planta de refrigeración. De aquí, el dióxido de carbono líquido va a los tanques de almacenamiento por gravedad.

Dentro del proceso productivo, aproximadamente un 10% del total de la solución de amina que abandona la torre de desorción, pasa por un sistema de filtro de carbón activado, con la finalidad de eliminar contaminantes, purificando la solución. Este filtro puede remover hidrocarburos y algunos productos de degradación mejorando así la calidad de la solución de amina <sup>[11]</sup>. En condiciones de funcionamiento normales, el consumo de carbono debe ser de menos de 0,08 [kg / TM de CO<sub>2</sub>] <sup>[9]</sup>.

## 1.4 SOLVENTES QUÍMICOS EN LA CAPTURA DE DIÓXIDO DE CARBONO

La mayoría de los solventes químicos utilizados en el proceso de captura de dióxido de carbono desde los gases de combustión, son orgánicos y basados en aminas; los procesos de absorción empleados aprovechan el carácter reversible de la reacción química entre un solvente acuoso alcalino y un gas ácido <sup>[12, 13]</sup>. Las alcanolaminas son generalmente los solventes más adecuados, debido a que estos compuestos químicos presentan una alta reactividad con los gases ácidos y a que su disponibilidad en el mercado tiene un bajo costo <sup>[13]</sup>.

Todas las alcanolaminas presentan en su estructura un grupo hidroxilo y un grupo amino; el primero de ellos confiere a estos compuestos la propiedad de incrementar su solubilidad en agua, mientras que el segundo, proporciona la alcalinidad necesaria para promover la reacción de éstas con los gases ácidos <sup>[13, 14]</sup>.

Las alcanolaminas que han despertado un mayor interés en la captura de dióxido de carbono (y de otros gases ácidos), son: monoetanolamina (MEA), dietanolamina (DEA), trietanolamina

(TEA), diglicolamina (DGA), diisopropanolamina (DIPA) y metildietanolamina (MDEA) <sup>[13]</sup>. La Figura 5 muestra la estructura de estas aminas.

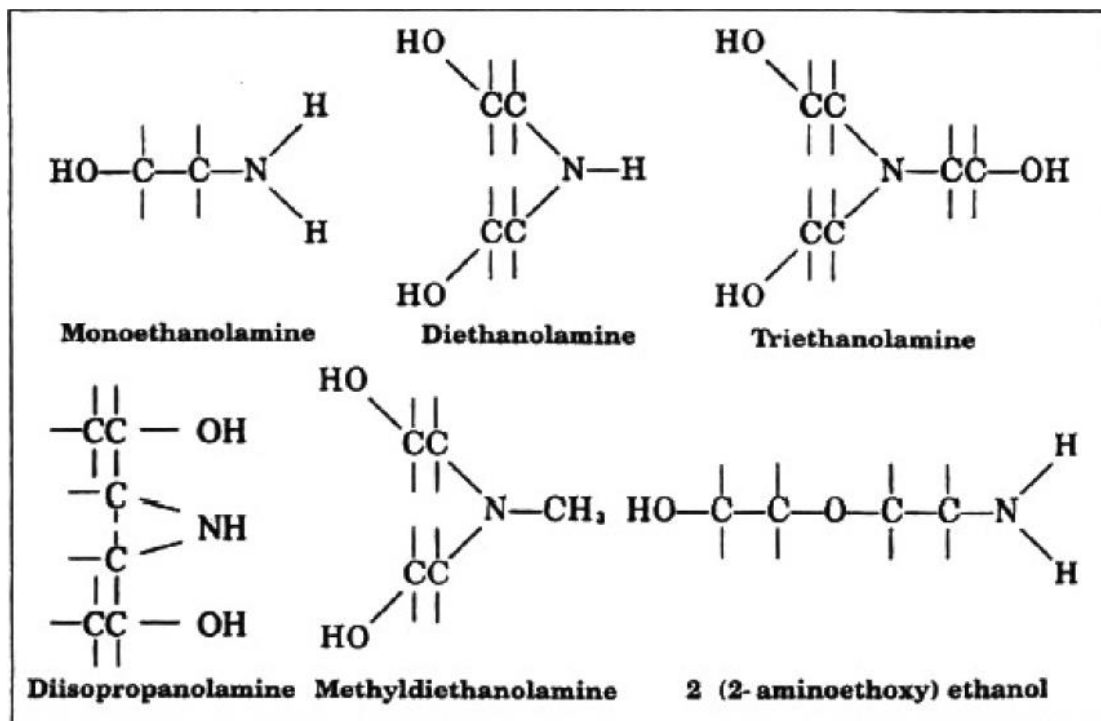


Figura 5: Estructura química de alcanolaminas empleadas en el proceso de captura de CO<sub>2</sub> <sup>[14]</sup>.

Las alcanolaminas antes mencionadas, pueden ser clasificadas según el número de átomos de hidrógeno que se encuentran enlazados al nitrógeno. Así se tiene que <sup>[14]</sup>:

- Las aminas que tienen dos átomos de hidrógeno unidos directamente a un átomo de nitrógeno, como es el caso de la monoetanolamina, se denominan aminas primarias y son generalmente las más alcalinas.
- Dietanolamina y diisopropanolamina presentan solo un átomo de hidrógeno directamente enlazado al nitrógeno y son denominadas aminas secundarias.
- Trietanolamina y metildietanolamina tienen completamente sustituido el átomo de nitrógeno, sin ningún átomo de hidrógeno unido a él. Son denominadas aminas terciarias.

La Figura 6 resume la clasificación antes descrita.

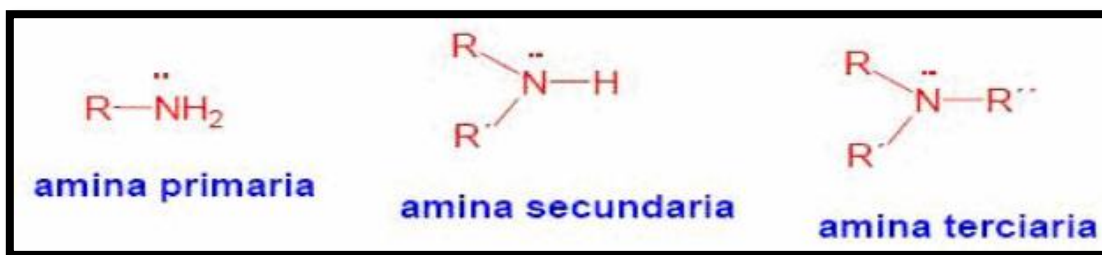


Figura 6: Clasificación de las aminas <sup>[13]</sup>.

Como característica final, las alcanolaminas son consideradas solventes químicamente estables, debido a que pueden ser calentadas hasta su punto de ebullición sin descomponerse (la trietanolamina es una excepción a este hecho, debido a que se descompone a una temperatura de 360 [°C], menor a su punto de ebullición) <sup>[11]</sup>.

#### 1.4.1 ***Monoetanolamina en la captura de dióxido de carbono.***

En esta sección del informe, se presentaran las principales características de la alcanolamina empleada por INDURA en sus procesos: Monoetanolamina. En el anexo A se presentan características de otras aminas empleadas en la captura de dióxido de carbono.

Las soluciones acuosas de monoetanolamina presentan una mayor madurez en comparación a otras alcanolaminas; han sido empleadas como absorbentes dentro del proceso, utilizándose comúnmente en concentraciones que oscilan entre el 10% y el 20% en peso en la solución. Frecuentemente, se utiliza una concentración de 15% en peso, pero este valor puede ser aumentado hasta un 30% si se utilizan inhibidores que contrarresten los problemas de corrosión debido a este aumento de la concentración. Su probada fiabilidad, respalda su uso para la captura de este gas, logrando una recuperación del dióxido de carbono de aproximadamente 98% <sup>[8,11,13]</sup>.

La monoetanolamina se produce a partir de la reacción de amoníaco con óxido de etileno, ambos productos químicos económicos. Como resultado, la monoetanolamina es relativamente más económica que otras etanolaminas <sup>[10]</sup>. La Figura 7 muestra la estructura química de este compuesto.

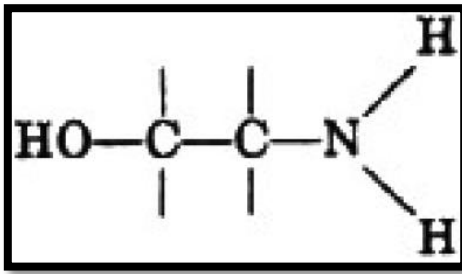


Figura 7: Estructura química de la monoetanolamina <sup>[14]</sup>.

La monoetanolamina presenta un carácter alcalino mayor, en comparación a las otras aminas antes mencionadas, razón por la que reacciona rápidamente con gases ácidos. Sin embargo, este hecho puede generar un problema dentro del proceso, debido a que la amina no es selectiva entre el sulfuro de hidrógeno y el dióxido de carbono, pudiendo capturar cualquiera de estos dos gases ácidos.

La monoetanolamina es la molécula más pequeña dentro de las alcanolaminas (con el peso molecular más bajo) y, además, posee la mayor capacidad de absorción de gases ácidos, lo que se traduce en menor cantidad de solvente circulando por el sistema para remover una determinada cantidad de gas ácido. Por otro lado, la regeneración de la monoetanolamina puede realizarse fácilmente por ser un solvente químicamente estable, minimizando la degradación de la solución <sup>[11, 13]</sup>.

La monoetanolamina posee una elevada solubilidad en agua, eliminando problemas asociados a esta característica, observados en otros solventes de amina. La solubilidad de la monoetanolamina asegura que la solución puede tener una alta capacidad para transportar el dióxido de carbono. La monoetanolamina también tiene velocidades de reacción que garantizan tamaños de equipos razonables <sup>[11]</sup>.

La monoetanolamina posee una presión de vapor mayor en relación a otras alcanolaminas. Esto puede provocar significantes pérdidas de solución a través de vaporización. Este problema puede ser resuelto mediante un lavado con agua en la parte superior del absorbedor en la corriente de gases libres de dióxido de carbono <sup>[10]</sup>.

El hecho de que la monoetanolamina posea la mejor capacidad de absorción, también provoca que se necesite una mayor cantidad de energía térmica para regenerar la solución de amina, debido a su mayor afinidad por los gases ácidos. Por otro lado, la amina puede dar lugar a reacciones químicas no deseadas, formándose productos que degradan la solución e incrementan la corrosión en estos sistemas <sup>[14]</sup>.

La monoetanolamina puede degradarse por reacciones con el dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, ácido clorhídrico, ácido fluorhídrico y oxígeno presentes en los gases de combustión, lo que induce a una elevada tasa de renovación del absorbente <sup>[8]</sup>.

De la literatura se encontraron datos que indican que la velocidad de consumo de este solvente es tan baja como 0,5 [kg/MT de CO<sub>2</sub>] y que, para efectos de costos, una pérdida de 1,5 [kg/MT de CO<sub>2</sub>] es el máximo recomendado. La totalidad del solvente debe ser remplazado cuando existe una alta acumulación de impurezas, las que no pueden ser removidas mediante un filtro de carbono o mecánico. La velocidad de acumulación de contaminantes es una función de la composición de los gases de combustión y de las condiciones de operación. La presencia de óxidos de azufre en los gases de combustión puede incrementar el consumo del solvente, por cuanto estos reaccionan de forma irreversible con la monoetanolamina<sup>[9]</sup>.

Finalmente, se presentan en la Tabla 3 algunas propiedades de la monoetanolamina.

Tabla 3: Características de la Monoetanolamina<sup>[22]</sup>.

<b>Propiedades de la Monoetanolamina</b>	
<b>Fórmula molecular</b>	C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> NO
<b>Peso molecular</b>	61,08 [g/mol]
<b>Apariencia</b>	Líquido viscoso incoloro
<b>Densidad a 20 [°C]</b>	1,016 [g/cm <sup>3</sup> ]
<b>Punto ebullición a 1 [atm]</b>	170 [°C]
<b>Solubilidad en agua</b>	Miscible

Como se mencionó anteriormente, otros solventes, tales como dietanolamina y metildietanolamina, se utilizan a menudo como absorbentes en la industria para la captura de dióxido de carbono. Estos solventes tienen ventajas y desventajas sobre la monoetanolamina, pero esta última sigue siendo el estándar actual de la industria en la captura de dióxido de carbono por absorción/extracción.

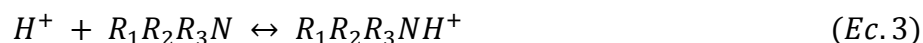
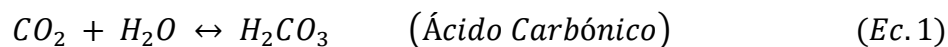
#### 1.4.2 *Reacciones químicas entre soluciones de etanolaminas y dióxido de carbono.*

En una solución acuosa, el dióxido de carbono se disocia para formar una solución ligeramente ácida. Cuando una corriente de gas que contiene dióxido de carbono se pone en contacto con una solución acuosa de amina, los gases ácidos reaccionan para formar un complejo ácido-base (una sal). La reacción entre el dióxido de carbono y la amina es exotérmica, por lo que se libera calor durante la reacción.

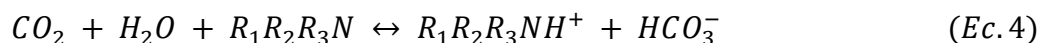
La absorción de dióxido de carbono a partir de alcanolaminas puede ocurrir por medio de diversos mecanismos.

### 1.4.2.1 Mecanismo 1

El dióxido de carbono se hidroliza para formar ácido carbónico, el que lentamente se transforma en bicarbonato. A partir de la formación de bicarbonato, se lleva a cabo una reacción donde participa la amina de acuerdo a <sup>[13]</sup>:



De forma General:



Esta reacción ácido-base puede ocurrir con cualquier alcanolamina, pero es cinéticamente lenta debido a que la etapa de disociación del ácido carbónico a bicarbonato es relativamente lenta.

### 1.4.2.2 Mecanismo 2

Un segundo mecanismo de reacción requiere la presencia de al menos un hidrógeno libre en la estructura molecular de la amina <sup>[13]</sup>:

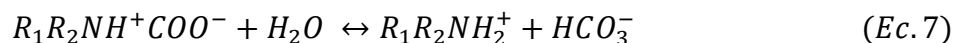


Este mecanismo de reacción se conoce como “Mecanismo del complejo híbrido” y solo puede ocurrir con aminas primarias y secundarias. El dióxido de carbono reacciona con la molécula de amina para formar el compuesto híbrido, que, posteriormente reacciona con una segunda molécula de amina para formar un carbamato ( $R_1R_2NCOO^-$ ). La velocidad de absorción del dióxido de carbono a través de este mecanismo es más rápida que a través de la hidrólisis de este gas.

La estequiometría de la reacción del carbamato, indica que la capacidad de la solución de amina de reaccionar con el dióxido de carbono está limitada a 0,5 moles de dióxido de carbono por mol de amina si el producto de la reacción fuera solamente el carbamato. Sin embargo, el



compuesto híbrido se puede hidrolizar para formar bicarbonato y amina protonada, según la siguiente reacción <sup>[10]</sup>:



El hecho de que la absorción de dióxido de carbono se pueda llevar a cabo por estos dos mecanismos de reacción, con diferentes características cinéticas, determina el poder de absorción de las diferentes aminas. Como el paso determinante en el segundo mecanismo es la formación del carbamato, será éste el que diferenciará la rapidez de absorción entre las aminas primarias y secundarias. Debido a que las aminas terciarias no pueden formar el carbamato, se encuentran obligadas a reaccionar con el dióxido de carbono de acuerdo al primer mecanismo (más lento).

### 1.4.2.3 Mecanismo 3

En la literatura se presenta un tercer mecanismo de reacción, llamado “Mecanismo termolecular” <sup>[15]</sup>, en el que se propone que la reacción entre el dióxido de carbono y la monoetanolamina ocurre en un solo paso, donde el producto inicial no es un ion híbrido, sino un complejo débilmente unido, con un mecanismo como el mostrado en la Figura 8.

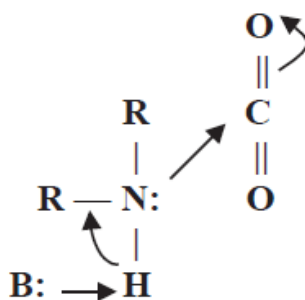


Figura 8: Mecanismo de reacción termolecular para la formación de carbamato según Crooks y Donnellan <sup>[15]</sup>.

La mayoría de estos complejos son productos intermedios, que se descomponen para formar nuevamente moléculas del reactivo, unos pocos reaccionan con una segunda molécula de amina o una molécula de agua, para dar productos iónicos. La formación de enlaces y la separación de cargas se producen solo en la segunda etapa.

## 1.5 PROBLEMA A ABORDAR Y ALCANCES DEL PROYECTO

Como fue mencionado en secciones previas, actualmente toda la producción de dióxido de carbono se realiza en la planta recuperadora de Hualpén. Sin embargo, cuando se detecta la presencia de hidrocarburos en el producto final, debido a la composición de la corriente de *tail gas* proveniente de la ENAP S.A, el dióxido de carbono obtenido no alcanza la pureza requerida, razón por la que no puede ser comercializado. En estas condiciones resulta necesario poner en funcionamiento la planta productora de Cerrillos para satisfacer los requerimientos de dióxido de carbono por parte de los clientes.

INDURA ha detectado que cada vez que se pone en funcionamiento el proceso en Cerrillos, la monoetanolamina presenta una pérdida en la capacidad para absorber y desorber dióxido de carbono; este hecho se ve reflejado por una disminución en la producción de este gas. Por esta razón, cada vez que se pone en marcha el proceso productivo, es necesario utilizar amina nueva, lo que se traduce en gastos extras para la empresa.

Sumado a lo anterior, se han encontrado graves problemas de corrosión en algunos equipos de la planta. Una de las características de la amina es su carácter corrosivo, sin embargo, es necesario realizar algunos estudios del proceso para poder determinar las razones que pueden estar provocando corrosión en el sistema y que además, podrían estar ocasionando la no regeneración de la amina.

A partir de los antecedentes de la planta, ésta fue diseñada con acero al carbono ASTM A516 grado 60 (registro en planos de la planta). La torre de desorción fue el primer equipo en ceder ante los problemas de corrosión, luego de aproximadamente 15 años de operación. La Figura 9 muestra una foto que da cuenta de estos daños.



Figura 9: Corrosión en la torre separadora luego de 15 años de operación.

La torre fue sustituida y se construyó un nuevo equipo separador, pero esta vez el material empleado fue acero al carbono ASTM A36. Es importante mencionar que a la fecha, a pesar de

que la torre fue construida hace aproximadamente un año y medio, ya presenta problemas asociados a la corrosión.

El presente trabajo ha sido realizado para detectar los posibles factores en el proceso productivo de INDURA, que pueden estar provocando los problemas de corrosión en las instalaciones de la planta y la degradación de la monoetanolamina. Para esto, se ha realizado un estudio de aquellas condiciones que favorecen estos problemas y se han comparado con las actuales condiciones de operación de la empresa.

En base a los resultados obtenidos de los estudios de corrosión y degradación de la amina, se propondrán una serie de posibles soluciones a la empresa que permitirán mejorar su proceso productivo en Cerrillos.

## 1.6 OBJETIVOS

### 1.6.1 *Objetivo General*

El objetivo general de este trabajo consiste en establecer posibles causas de la pérdida de capacidad de absorción y desorción de la monoetanolamina, además de proponer soluciones a este problema y a la corrosión asociada que se ha observado en las instalaciones de la planta productora de dióxido de carbono de Cerrillos.

### 1.6.2 *Objetivos Específicos*

Para el desarrollo del objetivo principal planteado, se proponen los siguientes objetivos:

- Estudiar y entender el proceso de producción de dióxido de carbono a partir del uso de la monoetanolamina como solvente químico en la captura de este gas.
- Estudiar los factores operacionales que provocan problemas de corrosión y degradación de la amina en este tipo de procesos productivos.
- Identificar debilidades y puntos críticos de operación en el proceso de INDURA en relación a los factores que provocan corrosión y degradación de la amina en estos procesos.
- Realizar ensayos de laboratorio con la finalidad de medir velocidades de corrosión en las instalaciones de la planta y disminuciones en la concentración de la solución de monoetanolamina.
- Proponer posibles alternativas de mejora en términos de corrosión y degradación de la amina, en el proceso productivo de la empresa.

## 2. ANTECEDENTES

En el capítulo anterior se han presentado los principales inconvenientes en el proceso de producción de dióxido de carbono de INDURA. En esta sección del informe se presenta información recopilada de la literatura, que da cuenta de los principales factores que pueden generar problemas de corrosión en estas plantas productivas y aquellos que generan degradación de la monoetanolamina y, por consiguiente, la pérdida en su capacidad de absorción y desorción de dióxido de carbono.

En base a los datos aquí presentados, es posible realizar comparaciones con el proceso de producción de la empresa y determinar los puntos críticos en su operación.

### 2.1 PROBLEMAS GENERALES EN LA OPERACIÓN CON ALCANOLAMINAS.

Los procesos de captura de dióxido de carbono que emplean soluciones de aminas para este fin, tienden a tener las mismas dificultades en la operación, independiente del tipo de amina utilizada. Estos problemas operacionales pueden ser clasificados de forma general como: corrosión, contaminantes presentes en el solvente y formación de espuma<sup>[11, 13]</sup>.

Los problemas anteriores no son independientes unos de otros, por lo que una misma condición puede causar dificultades en estas tres áreas.

#### 2.1.1 *Corrosión.*

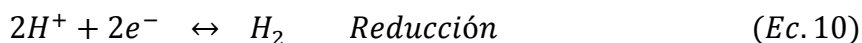
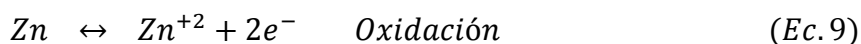
La corrosión se puede definir como el deterioro que sufre un material (habitualmente un metal) en sus propiedades, debido a reacciones que se producen con el medio en el que se encuentra. Existen distintos tipos de corrosión, algunos de ellos son<sup>[13]</sup>:

- **Corrosión general:** Es cuando se produce en toda la superficie del metal. Es posible proteger al metal con facilidad en este tipo de corrosión.
- **Corrosión intercrystalina:** Se debe a las impurezas y no se detecta a simple vista.
- **Corrosión localizada:** Se localiza en sitios poco visibles y no se revela hasta que la pieza se rompe.
- **Corrosión por erosión:** Se produce por el movimiento relativo entre un fluido corrosivo y una superficie de metal.

Cuando un metal es inmerso en una solución, en la superficie de éste ocurren reacciones electroquímicas que pueden originar la corrosión:

- **Oxidación del metal:** reacción parcial anódica.
- **Reducción de un agente oxidante:** reacción parcial catódica.

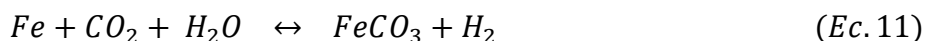
Un ejemplo de esto se observa a continuación <sup>[16]</sup>:



Se han realizado diversos estudios que hablan acerca de la corrosión en los sistemas de captura de dióxido de carbono a partir de aminas. La literatura indica que la velocidad de corrosión en estos sistemas se ve incrementada cuando aumenta la concentración de la amina, la carga de dióxido de carbono, la temperatura del proceso, la concentración de oxígeno y compuestos sulfurados. Además, la presencia de sales estables al calor aumenta la corrosión del acero al carbón en soluciones de monoetanolamina – dióxido de carbono. Por otro lado, la metalurgia de las instalaciones de la planta también es un factor importante a considerar <sup>[16]</sup>.

Existen diversas reacciones que involucran la disolución del hierro. Algunas de ellas se muestran a continuación <sup>[16]</sup>:

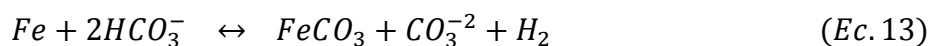
1. Reacciones que involucran directamente al dióxido de carbono con el acero al carbón para formar carbonato de hierro,  $FeCO_3$ :



2. Corrosión que envuelve la reducción del ion hidrógeno:



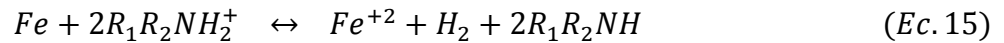
3. El ion bicarbonato,  $HCO_3^-$ , actúa como un agente oxidante en la solución:



4. Corrosión debido a la reducción de ácido carbónico no disociado,  $H_2CO_3$ :



5. Mecanismo de corrosión que envuelve a la amina como tal:



$RR'NH_2^+$ : Amina Protonada

$RR'NH$ : Amina

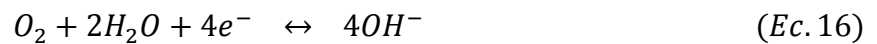
A continuación se presenta en mayor detalle el modo en que contribuyen a la corrosión los siguientes factores: concentración de oxígeno y compuestos sulfurados, concentración de amina, carga de dióxido de carbono y la presencia de sales estables al calor.

Los principales productos de corrosión formados a partir de estos factores son: hidróxidos de hierro II y III ( $Fe(OH)_2$  y  $Fe(OH)_3$ ), óxido de hierro III ( $FeO_3 \cdot H_2O$ ), carbonato de hierro II ( $FeCO_3$ ) y sulfato de hierro II ( $FeSO_4$ ).

#### **2.1.1.1 Concentración de Oxígeno.**

La velocidad de corrosión aumenta con el aumento de la concentración de oxígeno. El mecanismo de corrosión se muestra a continuación <sup>[16]</sup>:

1. Reducción de oxígeno disuelto.



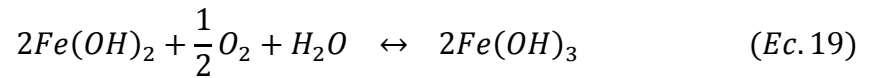
2. Disolución del hierro u oxidación del hierro al ion ferroso.



3. Reacción Global.



El componente hidróxido ferroso,  $Fe(OH)_2$ , es inestable en sistemas que contienen oxígeno, por lo que es oxidado a sal férrica o herrumbre.

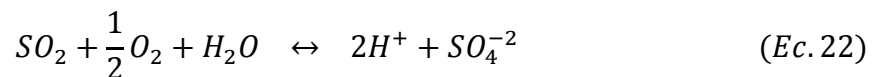


La corrosión del sistema se debe a la cantidad de oxígeno disuelto en la solución, provocando la oxidación del hierro.

El manual de operación de la planta de dióxido de carbono, especifica que la composición de oxígeno en los gases de combustión debe estar presente en un rango de 2 – 5%.

### **2.1.1.2 Concentración de dióxido de azufre**

La velocidad de corrosión aumenta lentamente con la concentración de dióxido de azufre, debido a la producción de cationes de hidrógeno. El mecanismo de corrosión es <sup>[16]</sup>:



El ion hidrógeno ( $H^+$ ) y el ion hidronio ( $H_3O^+$ ) corresponden a los iones reducidos de la reacción de reducción básica:

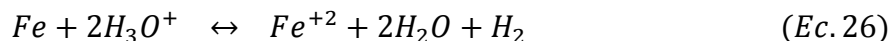
*Reducción del ion hidrógeno:*



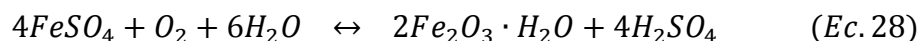
*Reducción del ion hidronio:*



Por lo tanto, las reacciones de óxido – reducción son:



El dióxido de azufre puede reaccionar con agua y oxígeno y, entonces, causar la corrosión del acero al carbón directamente <sup>[16]</sup>:



### 2.1.1.3 Carga de dióxido de carbono

La velocidad de corrosión aumenta con el aumento de la carga de dióxido de carbono. La Figura 10 muestra cómo afecta esta condición en la velocidad de corrosión de acero al carbón

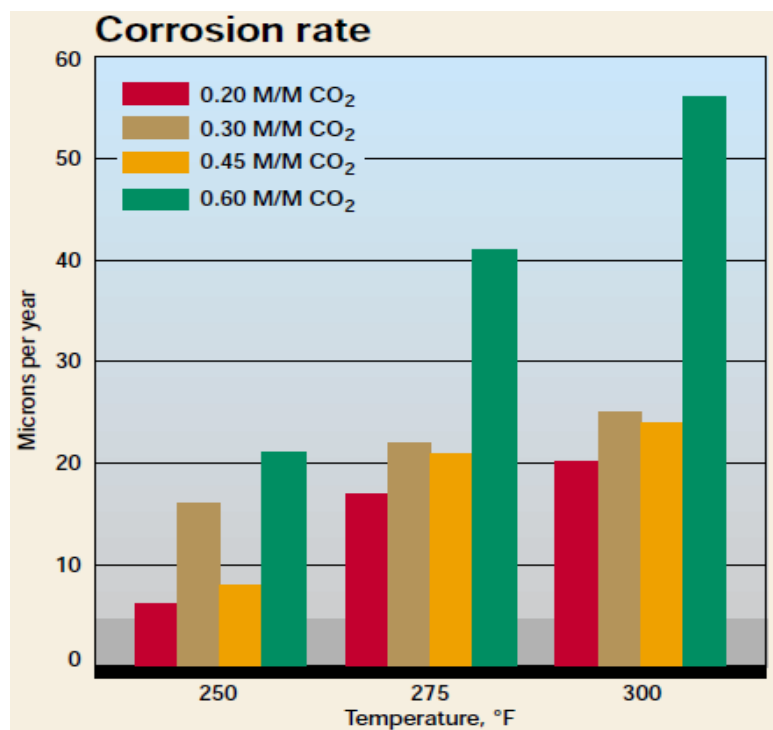
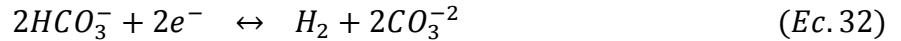
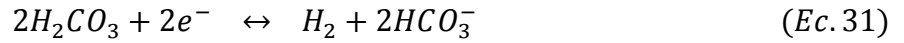


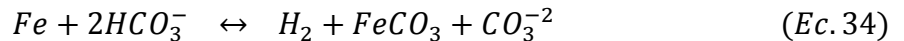
Figura 10: Velocidad de corrosión en acero al carbono a partir de MEA al 20% cargada con CO<sub>2</sub> <sup>[17]</sup>.



El aumento de la carga de dióxido de carbono provoca un incremento en la concentración de ácido carbónico ( $H_2CO_3$ ) y del ion bicarbonato ( $HCO_3^-$ ), lo que puede inducir corrosión del hierro, según el siguiente mecanismo <sup>[16]</sup>:



Las reacciones de óxido – reducción del hierro con ácido carbónico y con el ion bicarbonato son:

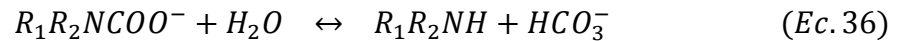


Una mayor concentración de bicarbonato y del ion hidronio implica una mayor velocidad de reducción y, en consecuencia, una mayor tasa de corrosión en el sistema. La formación de estos iones se puede llevar a cabo también, por medio de las siguientes reacciones:

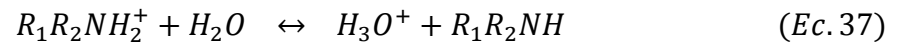
#### 1. Formación de carbamato



#### 2. Hidrólisis de carbamato



#### 3. Disociación de la amina protonada.



En la Tabla 4 se muestran los rangos máximos recomendados para la concentración de amina y la carga de gas ácido que éstas pueden soportar, de acuerdo a antecedentes históricos relacionados a problemas de corrosión.

Tabla 4: Carga de CO<sub>2</sub> y concentraciones máximas recomendadas para diferentes alcanolaminas <sup>[17]</sup>.

Amina	[%p/p]	Lejía rica [mol /mol]	Lejía pobre [mol /mol]
MEA	15 – 20	0,30 – 0,35	0,10 – 0,15
DEA	25 – 30	0,35 – 0,40	0,05 – 0,07
MDEA	50 – 55	0,45 – 0,50	0,004 – 0,010

La presencia de gas ácido en el sistema provoca corrosión directa, debido a que produce una disminución del pH de la solución. Este tipo de corrosión es imposible de eliminar, sin embargo, se puede minimizar o controlar a través de un diseño adecuado y una buena operación del sistema. La corrosión es más severa en lugares donde las altas concentraciones de gases ácidos alcancen mayores temperaturas. Estos puntos incluyen el intercambiador de calor (enfriador de lejía), la columna regeneradora y las cañerías donde circula el solvente cargado de dióxido de carbono <sup>[13]</sup>.

#### 2.1.1.4 Presencia de sales estables al calor

Las sales estables al calor, o sales termoestables, son moléculas que se forman de la unión entre una amina protonada y un anión más fuerte que el dióxido de carbono o el ácido sulfhídrico. Estas uniones son irreversibles, por lo que su formación conlleva pérdidas de solvente. Existen diversos tipos de aniones que pueden ser encontrados en estos sistemas, entre los cuales se pueden mencionar: orgánicos, como acetato, formiato, glicolato, lactato, oxalato y propionato; e inorgánicos, como cloruro, oxácidos inorgánicos de azufre, sulfito, sulfato, tiosulfato y tiocianato <sup>[13]</sup>.

Las sales termoestables favorecen la corrosión en soluciones de alcanolaminas. Por esta razón y debido a que también reducen la capacidad de carga de gas ácido de la amina, deben ser reducidas al mínimo recomendándose que las sales no excedan el 10% de la concentración total de la amina. En Tabla 5 se presentan las fuentes más comunes de los aniones antes mencionados <sup>[17]</sup>.

Tabla 5: Fuentes de los principales aniones productores de sales termoestables <sup>[17]</sup>.

Anión	Fuente
<b>Cloruro</b>	Agua de reposición Sales presentes en el gas de entrada
<b>Nitrato / Nitrito</b>	Agua de reposición Inhibidores de corrosión
<b>Sulfato / Sulfito / Tiosulfato</b>	Productos de la oxidación de especies de azufre Componentes en el gas
<b>Formiato / Oxalato / Acetato</b>	Ácido en el gas de alimentación Degradación por oxígeno Degradación térmica
<b>Tiocianato</b>	Productos de la reacción de H <sub>2</sub> S y CN
<b>Fosfato</b>	Inhibidores de corrosión Ácido fosfórico en carbón activado

Finalmente, es importante destacar que la corrosión en plantas de tratamiento de gases que emplean alcanolamina puede resultar en periodos de inactividad, pérdidas de producción y la reducción en la vida útil de los equipos <sup>[17]</sup>.

### 2.1.2 *Contaminantes en el solvente.*

Los contaminantes en sistemas de captura de dióxido de carbono a partir de alcanolaminas, se forman después de largos períodos de operación. Estos contaminantes contribuyen a generar pérdidas de solventes, generando costos elevados para su reposición.

Para reducir los contaminantes en el sistema, es indispensable que éstos se monitoreen con análisis de laboratorio y se eliminen periódicamente del sistema para alcanzar la calidad necesaria de la amina. También es necesario reducir las pérdidas de amina localizando y corrigiendo fugas que afecten al sistema.

Los contaminantes en sistemas de aminas son: sales termoestables, productos de degradación, químicos introducidos en el proceso, hidrocarburos y otras partículas. Algunos contaminantes provienen del agua para realizar la solución de amina, reaccionando directamente con ésta; entre estos se tienen: sodio, potasio, calcio, magnesio, cloro, sulfatos, bicarbonatos, entre otros. Otra fuente de contaminantes en el sistema es el gas de proceso, ya que éste puede contener trazas de compuestos de azufre e hidrocarburos pesados.

Las soluciones de amina se oxidan lentamente cuando son expuestas al aire, específicamente al oxígeno. Los productos de esta oxidación causan pérdidas en la capacidad de la amina, aumentando los problemas operacionales en el sistema como la corrosión y la espuma. En caso de una degradación severa, el solvente necesita ser reemplazado y su producto de degradación removido del sistema. La oxidación puede ser minimizada usando una capa de gas inerte (como nitrógeno) en los tanques de almacenamiento de aminas.

Algunos de los productos de degradación remueven el dióxido de carbono del sistema, pero generalmente no son tan efectivos como la amina original. Por esta razón, representan una pérdida en la actividad de la solución <sup>[6,8]</sup>.

### 2.1.3 **Formación de espuma**

La generación de espuma en estos sistemas puede ser reconocida cuando se incrementan las pérdidas de amina y se reduce la eficiencia en la remoción de los gases ácidos. Algunos de los materiales que pueden causar problemas de formación de espuma son <sup>[11]</sup>:

- Sólidos suspendidos.
- Hidrocarburos condensados.
- Productos de la degradación de la amina.
- Todo material extraño como inhibidores de corrosión, lubricantes de las válvulas o cualquier impureza en el agua.

Los problemas operacionales descritos anteriormente, siempre existirán en el sistema, por lo que deberán ser controlados para evitar la severidad de los mismos. Este control se lleva a cabo a través de la adición de inhibidores de corrosión al sistema, filtros que remuevan los contaminantes y antiespumantes.

## 2.2 **DEGRADACIÓN DE LA MONOETANOLAMINA**

Soluciones acuosas de monoetanolamina son ampliamente usadas en la industria para remover el dióxido de carbono desde los gases de combustión, dada su alta selectividad por este gas y la alta capacidad de reacción en comparación a otras alcanolaminas. Sin embargo, la degradación de la monoetanolamina en presencia de oxígeno y dióxido de carbono puede resultar en grandes pérdidas de amina y corrosión en los equipos de las plantas productoras.

Existen tres vías de degradación de la monoetanolamina: degradación por polimerización, degradación térmica y degradación oxidativa <sup>[10]</sup>.

### 2.2.1 *Degradación por Polimerización*

Este tipo de degradación requiere la presencia de altas temperaturas y la presencia de dióxido de carbono, produciendo productos de degradación de un elevado peso molecular. Esta degradación ocurre principalmente a temperaturas mayores que las empleadas en la torre de desorción.

### 2.2.2 *Degradación Térmica*

Este tipo de degradación se ve favorecida a temperaturas por sobre los 205 [°C]. Debido a que en operación la solución de amina no alcanza temperaturas tan elevadas, esta constituye la forma de degradación menos común entre las tres.

### 2.2.3 *Degradación Oxidativa*

Este tipo de degradación requiere de oxígeno y es catalizada por hierro, produciendo fragmentos oxidados del solvente, tales como ácidos orgánicos y amoníaco. Se espera que ocurra en presencia de oxígeno disuelto en el líquido estancado en la parte inferior de la torre de absorción.

El mecanismo de fragmentación oxidativo de la amina aún no es del todo claro. En la literatura se propone un mecanismo que involucra la abstracción de uno de los electrones del par solitario del átomo de nitrógeno presente en la estructura de la monoetanolamina. En este mecanismo, mostrado en la Figura 11, un radical libre como el  $\text{Fe}^{+3}$ , remueve un electrón desde el nitrógeno del grupo amino formando un radical, el que entonces deprotona para formar un radical imina<sup>1</sup>. Los estudios muestran que en este punto, el radical imina reacciona con un segundo radical libre para formar una imina, la que reacciona con agua para formar un aldehído y amoníaco. El radical imina puede seguir otra ruta de reacción, en la que reacciona con oxígeno para así formar un radical amino-peróxido. Este radical puede entonces, reaccionar con otra molécula de monoetanolamina produciendo peróxido de hidrógeno y una imina, los que a su vez reaccionan

---

<sup>1</sup> Una **imina** es un grupo funcional o compuesto orgánico con estructura general  $\text{RR}'\text{C}=\text{NR}''$ , donde  $\text{R}''$  puede ser un Hidrógeno o un grupo orgánico.

con agua para formar un aldehído y amoniaco. El ion férrico puede ser regenerado por la reacción del ion ferroso con oxígeno u otro radical libre <sup>[11]</sup>.

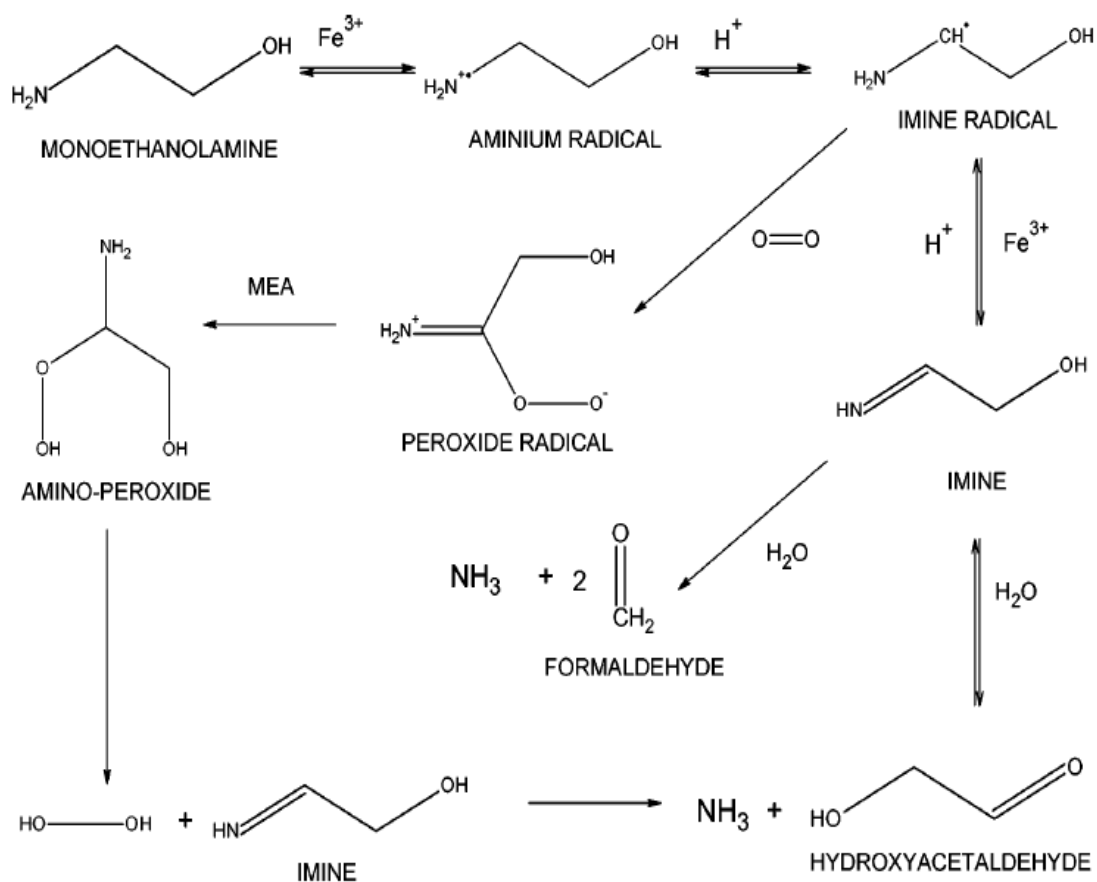


Figura 11: Mecanismo de abstracción de electrón en la degradación oxidativa de la monoetanolamina <sup>[11]</sup>.

Los aldehídos formados en la oxidación de la monoetanolamina pueden someterse a otras reacciones, incluso con la propia amina, formando nuevos productos de degradación.

### 3. METODOLOGÍA DE TRABAJO

En una primera etapa del trabajo, se realizó una amplia búsqueda en la literatura con la finalidad de determinar factores que pueden provocar degradación de la amina en estos sistemas. De forma simultánea, se realizó una búsqueda de plantas productoras de dióxido de carbono que pudiesen presentar problemas similares a los de INDURA, para así tener una base de los posibles factores de operación que pudiesen estar provocando corrosión en las instalaciones. Los principales antecedentes en esta materia, fueron presentados en el capítulo anterior.

En una etapa posterior, se procedió a identificar debilidades y puntos críticos de operación en INDURA. Dado que la planta no se encontraba en funcionamiento durante el período de trabajo, no fue posible realizar mediciones en terreno de algunas variables de operación de interés para este estudio. Por esta razón, se realizó una búsqueda de información en diversas fuentes y registros de la planta, como por ejemplo, las mediciones isocinéticas a la caldera, las que permitieron desarrollar los balances de masa en este equipo, utilizando como materia prima gas licuado (los balances de masa solo estaban desarrollados para gas natural).

En paralelo, se realizaron ensayos en el laboratorio, con la finalidad de determinar algunos parámetros, como las velocidades de corrosión en cupones de acero y mediciones de la disminución de la concentración de amina en determinados escenarios.

Finalmente, desarrollados los ensayos experimentales y encontrados los puntos críticos que ocasionan problemas de corrosión y degradación de la monoetanolamina en el proceso productivo de INDURA, se procedió, en base a los resultados, a definir y desarrollar posibles alternativas de mejoras que permitan un correcto funcionamiento de la planta.

En las siguientes secciones se describen en mayor detalle los ensayos realizados en el laboratorio.

#### 3.1 MEDICIÓN DE VELOCIDADES DE CORROSIÓN.

Con la finalidad de estudiar la calidad de la metalurgia de la planta de dióxido de carbono, se realizaron ensayos para medir la tasa de corrosión en los equipos, a partir de la pérdida de peso en cupones de acero al carbono. Para ello, se fabricaron piezas de forma rectangular de los dos tipos de aceros utilizados en la planta: Acero A-36 y acero A-516 grado 60<sup>2</sup>. Para el primer acero mencionado, se utilizó una plancha de 10 [mm] de espesor facilitada por el centro técnico de

---

<sup>2</sup> Nomenclatura de la norma ASTM.

INDURA (CETI), mientras que para el segundo, se consiguió una plancha de 15 [mm] de espesor, proporcionada por una maestranza.

### 3.1.1 *Materiales y Equipos*

Los materiales y equipos utilizados fueron los siguientes:

- Planchas de Acero: A516 grado 60 y A36
- Disco de corte refrigerado
- Lija número 60
- Pie de metro
- Balanza digital (precisión de 5 cifras decimales)
- Baño térmico (superior a 110[°C])
- Matraz de Erlenmeyer
- Sistemas de Refrigeración (Figura 12)

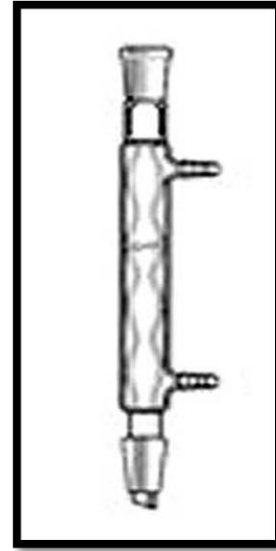


Figura 12: Sistema de Refrigeración <sup>[20]</sup>.

### 3.1.2 *Procedimiento*

Se realizó el siguiente procedimiento de fabricación de los cupones:

- Primero, se midieron y se dibujaron las líneas de corte en las planchas de acero con la finalidad de establecer medidas estándar en los cupones. Para el acero A-36 se establecieron cupones de aproximadamente 35 x 16 x 10 [mm<sup>3</sup>] y para el A-516 grado 60 de 30 x 15 x 15 [mm<sup>3</sup>].
- Luego, se cortaron las planchas de aceros con el equipo de disco de corte refrigerado.
- Una vez cortadas las piezas, se utilizó una lija número 60 con la finalidad de quitar los restos de óxidos que pudiesen presentar las piezas. Cabe señalar que a partir de este procedimiento, las piezas modificaron sus medidas, dado que algunas fue necesario lijarlas más que otras.
- Finalmente, se registraron las características de estos cupones: área y masa inicial. Para medir la masa de los cupones se empleó una balanza digital certificada, perteneciente al CETI, con una precisión de cinco cifras decimales; se realizaron 5 mediciones de cada pieza y luego se calculó un promedio con los valores obtenidos. La Figura 13 muestra algunos cupones de corrosión de acero A-36 una vez finalizada su elaboración.





Figura 13: Cupones de acero ASTM A36.

Luego de haber fabricado los cupones, se definieron los distintos escenarios corrosivos a los que estos fueron sometidos. Para ello, se establecieron sistemas en los que se variaron parámetros como la concentración de amina, temperatura de trabajo y la presencia de dióxido de carbono. En secciones posteriores se explicará en detalle las soluciones corrosivas analizadas.

Para la realización de estos ensayos, se emplearon matraces Erlenmeyer en los que se agregó una determinada cantidad de la solución corrosiva (aproximadamente 700 [ml]), para luego introducir los cupones de corrosión. Por su parte, estos matraces se colocaron dentro de un baño térmico de glicerina, el que permitió mantener la temperatura constante durante el periodo de ensayo; el baño térmico permite trabajar hasta una temperatura de 110 [°C].

La temperatura a la que se llevaron a cabo los ensayos provoca pérdidas de solvente por vaporización. Por esta razón, se acoplaron sistemas de refrigeración en los matraces con la finalidad de evitar pérdidas de este tipo: los vapores de solvente, producto de la temperatura, ascienden por el cuello del matraz hasta el sistema refrigerante, donde se condensa (por acción del agua fría que circula por la camisa exterior) volviendo de nuevo al matraz. Esto establece un reflujo continuo de disolvente que mantiene la cantidad de solución constante.

La Figura 14 muestra una foto de la configuración del equipo instalado para la realización de los ensayos.



Figura 14: Equipo e implementos utilizados en los ensayos de corrosión.

Una vez transcurrido el tiempo de exposición de los cupones en las soluciones corrosivas, se volvió a medir la masa de éstos y se calculó la velocidad de corrosión a partir de la siguiente fórmula <sup>[21]</sup>:

$$\text{Velocidad de corrosión} = \frac{f \cdot w}{A \cdot t \cdot d} \left[ \frac{\text{mm}}{\text{mes}} \right] \quad (\text{Ec. 38})$$

Donde:

*t*: tiempo de exposición del cupón en la solución [hr]

*A*: área del cupón en [cm<sup>2</sup>]

*w*: pérdida de peso del cupón [gr]

*d*: densidad del cupón [gr/cm<sup>3</sup>]

*f*: constante obtenida mediante un ajuste de unidades a partir de la siguiente ecuación:

$$f = \frac{10[\text{mm}]}{1[\text{cm}]} \cdot \frac{24[\text{hr}]}{1[\text{día}]} \cdot \frac{30[\text{días}]}{1[\text{mes}]} = 7.200 \left[ \frac{\text{mm} \cdot \text{hr}}{\text{cm} \cdot \text{mes}} \right]$$

### 3.2 MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE MONOETANOLAMINA.

Con la finalidad de medir posibles disminuciones en la concentración de amina, se realizaron *titulaciones*, que esencialmente, son reacciones ácido-base. A grandes rasgos, esta técnica consiste en medir el volumen de una solución de concentración exactamente conocida, en este caso ácido clorhídrico 0,1 [N], que reacciona con un volumen determinado de la solución a la que se le desea determinar la concentración, en este caso, la solución de monoetanolamina. La reacción ácido-base termina cuando ocurre una completa neutralización; en este punto, los moles de la base (monoetanolamina) reaccionan completamente con los moles del ácido (ácido clorhídrico).

Un método para visualizar el término de la reacción es mediante el uso de indicadores ácido-base, los que presentan un color diferente en medios ácido y básico. Por ello, es posible observar el desarrollo de una titulación a través del cambio de color de un indicador; para la titulación de la solución de monoetanolamina se utilizó naranja de metilo.

### 3.2.1 **Materiales y Equipos**

Los materiales y equipos utilizados fueron los siguientes:

- Matraz Erlenmeyer
- Pipeta
- Gotario
- Bureta de titulación.

#### **Reactivos**

- Ácido clorhídrico 0,1 [N]
- Agua destilada
- Naranja de Metilo

### 3.2.2 **Procedimiento**

Para la medición de la concentración se realizó el siguiente procedimiento:

- En un matraz se colocó 1 [ml] de la solución de amina a analizar. Se utilizó una pipeta para medir el volumen requerido.
- Luego, con ayuda de la pipeta, se añadieron 0,7 [ml] de agua destilada.
- Posteriormente, con un gotario se agregaron 3 gotas del reactivo naranja de metilo.
- Finalmente, se añadió 0,1 [N] de ácido clorhídrico, de forma paulatina, desde la bureta de titulación, agitando manualmente el matraz hasta alcanzar una mezcla homogénea de los reactivos. Se agregó ácido hasta que el color de la solución cambió de naranja a rosado. Entonces, se registró el volumen de ácido utilizado en la reacción.
- La concentración de la solución de monoetanolamina se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$Volumen_{\text{ácido}} \cdot Concentración_{\text{ácido}} = Volumen_{\text{amina}} \cdot Concentración_{\text{amina}} \quad (Ec. 39)$$

Reordenando los términos, se obtiene lo siguiente:

$$\mathbf{Concentración}_{amina} = \frac{\mathbf{Volumen}_{ácido} \cdot \mathbf{Concentración}_{ácido}}{\mathbf{Volumen}_{amina}} \quad (\text{Ec. 40})$$

$$\mathbf{Concentración}_{amina} = \frac{\mathbf{Volumen}_{ácido} \cdot \mathbf{0,1 [N]}}{\mathbf{1[ml]}}$$

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En el capítulo 2 de este trabajo, se presentaron los principales factores de operación que pueden inducir problemas de corrosión en las plantas productivas que emplean soluciones de alcanolamina en sus procesos.

En esta sección se analizará cómo afectan algunos de los factores antes mencionados en la producción de dióxido de carbono de INDURA. Los puntos estudiados constituyen: concentración de la amina, de oxígeno y compuestos sulfurados, la carga de dióxido de carbono, temperatura del proceso y la metalurgia de las instalaciones. Al final de este capítulo, será posible determinar qué condiciones en la operación de INDURA son responsables de la corrosión y degradación de la monoetanolamina.

A continuación se describen las principales actividades realizadas con sus respectivos resultados.

### 4.1 BALANCES DE MASA EN LA CALDERA

En un principio, INDURA empleaba gas natural como materia prima en el proceso; actualmente utiliza gas licuado como alimentación en el proceso de combustión. Para obtener datos del proceso y así poder determinar los balances de masa relacionados al uso de gas licuado como materia prima<sup>3</sup>, se recolectó información de los registros de la planta. Específicamente, los ensayos isocinéticos fueron de gran utilidad. Estos ensayos se realizan una vez al año en la planta de dióxido de carbono para determinar los índices de compuestos contaminantes que se liberan a la atmósfera. La información recabada de estos informes fue:

*Flujo de gas licuado: 311 [kg/h]*

*Flujo de aire: 5.469 [kg/h]*

En el anexo B1 se presenta un certificado que da cuenta de la composición del gas licuado usado en el proceso. En éste se observa que el principal componente corresponde al propano con una presencia del 96,48%. Por esta razón, la reacción de combustión será simplificada considerando solo este compuesto.

---

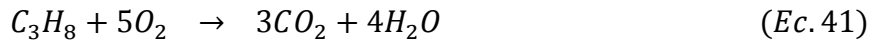
<sup>3</sup> INDURA no tiene un diagrama de flujo actualizado del proceso de producción donde se presenten los balances de masa con gas licuado como materia prima.

Como el peso molecular del propano corresponde a 44 [g/mol], el flujo de entrada de combustible es 7.068 [mol/h]. Por otro lado, el peso molecular del aire corresponde a 28,96 [g/mol], con lo que es posible determinar que la entrada de aire corresponde a 188.847 [mol/h]. Además, aproximando la composición del aire a un 79% de nitrógeno y un 21% de oxígeno (dado que estos dos elementos son los principales componentes), es posible determinar el flujo de moles a la entrada:

$$N_{2_{entrada}} = 149.189 \text{ [mol/hr]}$$

$$O_{2_{entrada}} = 39.658 \text{ [mol/hr]}$$

Entonces, suponiendo la reacción de combustión y un 100% de conversión, es posible obtener los moles de cada componente en la reacción:



En la Tabla 6 se presentan los flujos molares obtenidos a partir de la Ec. 41 en un tiempo inicial (entrada a la caldera) y final (salida de la caldera).

**Tabla 6: Flujos molares, [mol/h] de los principales compuestos en la reacción de combustión, a la entrada y salida de la caldera.**

	$C_3H_8$	$O_2$	$CO_2$	$H_2O$	$N_2$	Total
<b>Entrada</b>	7.068	39.658	-	-	149.189	195.915
<b>Salida</b>	-	4.318	21.204	28.272	149.189	202.983

Con los moles de oxígeno en un tiempo inicial y final, es posible determinar el exceso de aire en la reacción:

$$Exceso = \frac{moles_{t_{final}}}{moles_{t_{inicial}}} \cdot 100\% \quad (\text{Ec. 42})$$

$$Exceso = \frac{4.318}{39.658} \cdot 100\% = 11\%$$

Por otro lado, se tiene que los moles totales a la salida de la caldera corresponden a 203.000 [mol/h], valor que permite determinar en qué porcentaje se encuentra cada componente en la salida:

$$CO_2 = \frac{21.204}{202.983} \cdot 100\% = 10,45\%$$

$$O_2 = \frac{4318}{202.983} \cdot 100\% = 2,13\%$$

$$H_2O = \frac{28.272}{202.983} \cdot 100\% = 13,93\%$$

$$N_2 = \frac{149.189}{202.983} \cdot 100\% = 73,50\%$$

De estos resultados, se aprecia que la cantidad de oxígeno a la salida de la caldera es baja en relación a los otros gases de combustión y que, además, se encuentra dentro del rango de operación normal establecido por lo proveedores de la planta.

Se mencionó en la introducción de este trabajo que la planta de Cerrillos opera de forma ocasional. Cuando la producción se encuentra detenida, la solución de amina queda almacenada en los equipos (estanque de MEA, caldera y torres de absorción y desorción). En esta condición, el solvente puede tener contacto directo con el aire atmosférico permitiendo el ingreso de oxígeno a la solución. Este antecedente resulta importante debido a que los elevados tiempos de residencia (tiempo en que la planta no opera) serían uno de los responsables de la degradación de la amina.

## 4.2 CARGA DE DIÓXIDO DE CARBONO EN LA AMINA

La literatura indica que la carga de dióxido de carbono que debe soportar la amina también puede ser un factor de corrosión en el sistema. La Tabla 4 muestra que para la monoetanolamina la carga de dióxido de carbono en las corrientes de lejía rica y pobre deben encontrarse bajo los 0,35 y 0,15 [mol CO<sub>2</sub>/mol amina], respectivamente.

Se procedió a realizar el cálculo del factor de carga de dióxido de carbono en la lejía rica (por falta de información del proceso, no fue posible repetir el cálculo para la corriente de lejía pobre). Se utilizaron los siguientes datos:

- Flujo de amina que entra al absorbedor<sup>4</sup> = 70,1 [m<sup>3</sup>/h] ó 70.100 [l/h]
- Peso molecular monoetanolamina = 61,08 [g/mol] (ver Tabla 3)
- Flujo de CO<sub>2</sub> producto de la combustión = 21.204 [mol/h] (ver Tabla 6)

En el manual de operación de la planta se especifica que la solución de monoetanolamina se prepara a partir de 90 [g] de amina por litro de solución. A través de proporcionalidad directa es posible determinar la cantidad de amina en la corriente que ingresa al absorbedor:

$$\begin{aligned} 1 \text{ litro} &\rightarrow 0,09 \text{ kilogramos} \\ 70.100 \text{ litro} &\rightarrow X \text{ kilogramos} \end{aligned}$$

---

<sup>4</sup> Cabe señalar que este valor puede no reflejar la condición de operación real, debido a que se obtuvo desde el diagrama de flujo del proceso (no actualizado). No fue posible realizar mediciones en terreno dado que la planta no se encontró en operación.

Por lo tanto, el flujo de amina es de 6.309 [kg/h] en la corriente de estudio. Usando el dato de la masa molecular, es posible determinar el flujo molar de amina, el que corresponde a 103.291 [mol/h].

Finalmente, es posible obtener el factor de carga, a partir del siguiente cálculo:

$$Carga = \frac{21.204 \text{ [moles } CO_2/h]}{103.291 \text{ [moles Amina/h]}} = 0,21 \frac{\text{[moles } CO_2]}{\text{[moles amina]}}$$

Este valor se encuentra por debajo de los 0,35 [moles CO<sub>2</sub>/mol amina] recomendados en la literatura. Este hecho demuestra que la carga de dióxido de carbono en el sistema no debiera ser responsable de los problemas de corrosión. Sin embargo, es importante considerar que este valor puede encontrarse subestimado, dado que los valores utilizados en la cantidad de moles de amina se obtuvieron desde un diagrama de flujo que no se encuentra actualizado y que, además, en el cálculo no se consideran los problemas de degradación (menor cantidad de moles de amina).

### 4.3 CONCENTRACIÓN DE AMINA

Nuevamente, utilizando los valores del manual de operación, en donde se especifica que por cada litro de agua desmineralizada se deben agregar 90 [g] de amina, se realizó el cálculo de porcentaje peso/peso presente en la solución. Suponiendo la densidad del agua de 1.000 [kg/m<sup>3</sup>], la masa corresponde a un kilo por litro de solución.

Entonces la concentración de amina en la solución es:

$$\% \frac{p}{p} = \frac{90 \text{ [g]solvente}}{1.000 \text{ [g]solución}} \cdot 100\% = 9\%$$

En la Tabla 4 se recomienda que para la monoetanolamina este porcentaje debe ser inferior al 20 %p/p. El valor calculado permite concluir que la concentración peso-peso de la amina no es un factor determinante en los actuales problemas de corrosión.

### 4.4 COMPUESTOS SULFURADOS

Otra variable que debe ser estudiada es la presencia de compuestos sulfurados que podrían estar ingresando a la torre de absorción. En la descripción del proceso productivo se mencionó



la presencia de un lavador de gases justo después de la reacción de combustión, cuya finalidad es eliminar este tipo de compuestos. Sin embargo, cuando se realizó el cambio de materia prima (de gas natural a gas licuado), los operadores de la planta solo se preocuparon de ajustar la caldera y sus respectivos flujos de entrada para tener una producción de dióxido de carbono similar a la obtenida con gas natural. En esta condición existe la posibilidad de que con esta nueva materia prima se produzca una mayor cantidad de compuestos sulfurados en la reacción de combustión y, dado que el lavador de gases no sufrió ninguna modificación, puede que este equipo no atrape en su totalidad estos compuestos, provocando que ingresen al absorbedor junto con los otros gases de combustión.

Debido a que la planta no se encontró en operación durante el periodo de trabajo, no fue posible realizar mediciones en terreno que pudiesen determinar la presencia de compuestos sulfurados en algunas corrientes. Sin embargo, para poder descartar o concluir la existencia de estos compuestos, es posible obtener una muestra de los productos de corrosión presentes en la parte inferior de la torre de absorción y haciendo un análisis de espectrometría en el laboratorio de INDURA (CETI), se puede determinar o descartar la presencia de este tipo de compuestos.

Las técnicas empleadas en el laboratorio corresponden a espectrometrías de fluorescencia de rayos X y carbometría por horno de inducción. Estas técnicas son análisis elementales, es decir, permiten determinar los contenidos totales de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre, entre otros elementos, presentes en un amplio rango de muestras de naturaleza orgánica e inorgánica, tanto sólidas como líquidas. En particular, los espectrómetros de INDURA trabajan con muestras sólidas y líquidas pero de naturaleza inorgánica. Además, la técnica de carbometría se utiliza como complemento para obtener un valor más acertado de los elementos carbono y azufre. Estas técnicas se utilizan para obtener una fórmula molecular de los compuestos provenientes de la muestra.

En las Figura 15 y Figura 16, se presentan fotos de las muestras obtenidas desde la planta. En ellas se observa la presencia de una especie de “lodo” que se encuentra en el fondo de la torre de absorción. En el anexo C se presentan algunas características medidas de este “lodo”.



Figura 15: Muestras extraídas del fondo del absorbedor en la planta de CO<sub>2</sub>.



Figura 16: Muestras en el laboratorio.

Las muestras obtenidas se enviaron al CETI, para ser sometidas a ensayos de espectrometría. La Tabla 7 muestra los resultados obtenidos de los análisis, donde se aprecia el contenido másico de cada elemento en los productos de corrosión.

Tabla 7: Resultados de las espectrometrías.

Suma [%]	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	C [%]	Na <sub>2</sub> O [%]	SiO <sub>2</sub> [%]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	MnO [%]
100,00	82,91	9,62	3,39	2,56	0,91	0,26
CaO [%]	K <sub>2</sub> O [%]	MgO [%]	TiO <sub>2</sub> [%]	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	S [%]	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> [%]
0,145	0,077	0,046	0,037	0,017	0,013	0,006

Como se indicó antes, la técnica empleada corresponde a un análisis elemental, por lo que solo entrega los elementos presentes y no sus estados de oxidación. La técnica propone los compuestos que podrían existir en la muestra, a partir de la cantidad detectada de cada elemento, pero no necesariamente corresponde a los compuestos existentes. Por lo tanto, la importancia de estos resultados es la proporción en la que se encuentra cada elemento.

Se observa en la Tabla 7 que, tal como era de esperar, los componentes que se encuentran en mayor proporción son el hierro, seguido por el carbono. Dadas las cantidades de estos dos elementos y el color que presentan las muestras, es probable la existencia de carbonato de hierro (FeCO<sub>3</sub>) en la muestra analizada.

Para corroborar la hipótesis de la presencia de carbonato de hierro, se realizó una prueba en la que se agregaron unas gotas de ácido nítrico al “lodo” extraído de la planta; la presencia de carbonatos provoca efervescencia en el sistema (lo que se puede traducir en un burbujeo constante en la muestra, correspondiente a liberación de dióxido de carbono); si no existen carbonatos, no se observa ningún cambio. Luego de colocar algunas gotas del ácido, se observa una gran efervescencia en el sistema, esto se observó por varios minutos.

De los resultados de las espectrometrías, se observa además, que la cantidad de azufre en la muestra es pequeña, con una presencia del 0,013%. Este valor permite concluir que la cantidad de compuestos sulfurados es despreciable, lo que descartaría el hecho de que estos estén provocando problemas de corrosión en la planta.

En secciones previas, se hizo referencia a la degradación de la amina debido a reacciones irreversibles con compuestos sulfurados. Con los resultados de las espectrometrías, también es posible descartar a estos compuestos como responsables de la pérdida de amina en la solución.

Cabe señalar, que durante el periodo de trabajo no fue posible observar las condiciones en que se encuentran otros equipos y el relleno de las torres, pero es probable que en esos lugares también exista la presencia de "lodo". Esto resulta perjudicial en el proceso, debido a que la función de los rellenos es aumentar el área de transferencia entre la amina y el dióxido de carbono, logrando una elevada captura de este gas. Sin embargo, la presencia del "lodo" reduce esta área, disminuyendo a su vez, la cantidad de dióxido de carbono que puede ser absorbido por la amina. Todo esto, finalmente se traduce en una disminución en la capacidad productiva de la planta.

## **4.5 METALURGIA DE LA PLANTA**

Otro aspecto importante a evaluar, fue la metalurgia de la planta de dióxido de carbono, especialmente en el equipo donde se ha observado un mayor grado de corrosión: torre de desorción. Como fue mencionado en capítulos previos, la torre fue diseñada con acero A516 grado 60; posteriormente se reemplazó por otro tipo de acero siendo su nuevo diseño con acero A36.

Para evaluar la calidad de estos materiales, se diseñaron cupones de corrosión, los que se sometieron a soluciones de amina con la finalidad de medir la velocidad de corrosión de estos aceros en este medio. En el capítulo *Metodología de trabajo* se presenta mayor detalle sobre cómo se desarrollaron estos ensayos; en esta sección, solo se presentarán los principales resultados obtenidos.

### **4.5.1 Ensayos de espectrometría de emisión óptica**

De forma previa a los ensayos de corrosión fue necesario obtener planchas de Acero A516 grado 60 y A36. El primero de ellos es difícil de conseguir en empresas que comercializan piezas de acero, sin embargo, la maestranza donde se fabricó la nueva torre de desorción facilitó una plancha que podría corresponder al material requerido (muestra 1 en la Tabla 8). Para corroborar que el acero correspondía a A516 grado 60 se sometió a un ensayo de

espectrometría de emisión óptica<sup>5</sup> con la finalidad de determinar su composición. De forma paralela, se analizó un trozo del material de la antigua torre de desorción (muestra 2 en la Tabla 8). Los resultados se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 8: Resultados de la espectrometría de emisión óptica. Los valores corresponden al porcentaje en que se presenta cada componente.**

Muestra	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Nb	Fe
<b>Muestra 1</b>	0,157	0,276	0,685	0,012	0,004	0,022	0,023	0,021	0,026	-	Resto
<b>Muestra 2</b>	0,149	0,054	0,874	0,001	0,002	0,013	0,012	0,043	0,017	0,005	Resto
<b>A516 Gr 60</b>	0,200	0,400	0,5-1,4	0,030	0,025	0,300	0,080	0,300	0,300	0,010	Resto

La última fila en la Tabla 8 corresponde a los valores máximos de cada elemento que debe presentar un determinado acero para pertenecer al tipo A516 grado 60 <sup>[23]</sup>. Los resultados de la espectrometría revelan que los valores de cada componente en la muestra 1 se encuentran dentro de rango, pudiendo utilizar el acero obtenido en la maestranza en los ensayos de corrosión.

Cabe mencionar que los rangos permitidos de los distintos elementos en la composición de un determinado tipo de acero son amplios, por lo que la proporción de estos componentes en el material analizado podría coincidir también con otro tipo de acero.

Por otro lado, del análisis realizado a la antigua torre de desorción (muestra 2), se aprecia que ésta posee un contenido de silicio menor que la muestra del acero traído de la maestranza. El silicio constituye una impureza en el material, disminuyendo su resistencia y haciéndolo susceptible a la corrosión. Por esta razón, el acero utilizado en los posteriores ensayos de corrosión (y que será clasificado como A516 grado 60) es de menor calidad que el acero empelado en la antigua torre de desorción.

#### 4.5.2 *Ensayos de Corrosión*

Para medir la velocidad de corrosión en los aceros A516 grado 60 y A36, se evaluaron diferentes escenarios variando parámetros como la temperatura del sistema, concentración de monoetanolamina en la solución y la presencia de dióxido de carbono.

Cabe mencionar que como una forma de acelerar el proceso de corrosión, se pueden controlar dos variables: Aumentar la concentración de amina en la solución y aumentar la temperatura en los ensayos. Se utilizaron estas variaciones en los sistemas a estudiar, con la finalidad de

---

<sup>5</sup> Estos ensayos de espectrometría de emisión óptica también son realizados en el CETI.

umentar la velocidad de reacción de corrosión y así obtener resultados de una forma más rápida.

A continuación se describen las diferentes configuraciones a las que se sometieron los aceros con sus respectivos resultados.

#### 4.5.2.1 Cupones en el estanque de Monoetanolamina

Para evaluar la posibilidad de que la monoetanolamina esté provocando corrosión en los equipos de la planta, al quedar almacenada en éstos durante el periodo en que no se encuentra en operación el proceso, se introdujeron cupones de acero directamente al estanque de almacenamiento de solución de amina.

Las características de este sistema son:

- Concentración amina <sup>6</sup> = 1,4 [N]
- Temperatura sistema = Cercana a temperatura ambiente (entre 15 [°C] y 20 [°C])

Los cupones permanecieron en la solución de amina del estanque durante 36 días, tras los cuales se realizaron mediciones de la pérdida de peso de éstos. La Tabla 9 muestra un resumen de las principales características de los cupones de corrosión antes y después de ser sometidos a la amina.

Tabla 9: Cupones en estanque de MEA.

Cupón	Área [cm <sup>2</sup> ]	Masa Inicial [g] <sup>7</sup>	Masa Final [g]	Pérdida Masa [g]	Pérdida Masa [%]
A516 gr 60	19,8738	42,03128	42,03030	$9,8 \cdot 10^{-4}$	$2,33 \cdot 10^{-3}$
A36	20,0700	39,93967	39,93904	$6,3 \cdot 10^{-4}$	$1,58 \cdot 10^{-3}$

En las dos últimas columnas se presenta la pérdida de masa de los cupones. Se observa que, para ambos tipos de aceros, estos valores son pequeños, por lo que los valores de pérdida calculados pueden deberse simplemente a errores asociados a las mediciones en la balanza.

Los bajos valores obtenidos, dan cuenta de que en este escenario, no se produce corrosión en los equipos de la planta. Este resultado era de esperarse, pues, al depositar los cupones en el

---

<sup>6</sup> Los valores de concentración presentados en esta sección, corresponden al promedio calculado desde tres repeticiones.

<sup>7</sup> Los valores de masa inicial y final corresponden al promedio de cinco mediciones realizadas en la balanza. Este hecho aplica a las mediciones de todos los cupones.

estanque de la amina, no se observaron daños en las paredes de éste que pudiesen ser asociados a corrosión. La Figura 17 muestra los cupones de acero después de haber sido sometidos a la solución de monoetanolamina. En ella se observa que no hay ningún tipo de ataque corrosivo por parte de la amina.

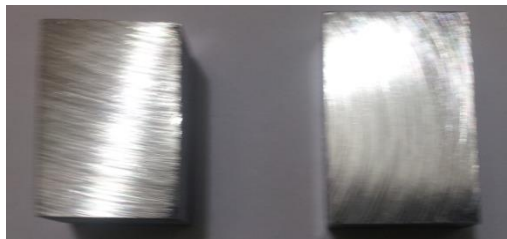


Figura 17: Cupones después del ensayo de corrosión.

#### **4.5.2.2 Cupones expuestos a solución de amina a elevada temperatura.**

En este ensayo se buscó simular la condición óptima de concentración de la amina en el proceso productivo de INDURA. Para ello, se utilizó solución de amina extraída desde la planta<sup>8</sup> y se mezcló con amina fresca, con la finalidad de llevar la concentración de la solución desde 1,4 [N] (concentración de la amina en los estanques) hasta 2,0 [N] que es lo recomendado por el fabricante de la planta. Éste constituye el procedimiento que realizan los operadores cuando ponen en marcha la planta y quieren “reactivar” la monoetanolamina.

Además, la solución fue sometida durante todo el periodo de ensayo a una elevada temperatura con la finalidad de acelerar los procesos corrosivos y poder obtener resultados en un tiempo menor.

Las características de este sistema son:

- Concentración amina = 2,0 [N]
- Temperatura sistema = 110 [°C]
- pH solución = 11

Los cupones permanecieron en estas condiciones durante 15 días, tras los cuales se realizaron mediciones de la pérdida de peso. La Tabla 10 muestra un resumen de las principales características de los cupones de corrosión antes y después de ser sometidos a la solución de amina.

---

<sup>8</sup> Antes de extraer amina desde la planta, se pusieron en funcionamiento las bombas con la finalidad de tener una muestra homogénea de la solución.

Tabla 10: Cupones en MEA a 110 [°C] con corrección de la concentración.

Cupón	Área [cm <sup>2</sup> ]	Masa Inicial [g]	Masa Final [g]	Pérdida Masa [g]	Pérdida Masa [%]
<b>A516 gr 60</b>	19,8022	41,55592	41,55433	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$3,83 \cdot 10^{-3}$
<b>A36</b>	19,6702	38,13577	38,13498	$7,9 \cdot 10^{-4}$	$2,07 \cdot 10^{-3}$

Nuevamente, se puede observar en las dos últimas columnas, que la pérdida de masa de los cupones corresponde a valores pequeños por lo que pueden deberse simplemente a errores asociados a las mediciones en la balanza. Además, una vez retirados los cupones, no se observó ningún tipo de ataque corrosivo sobre la superficie del acero.

Los bajos valores obtenidos, dan cuenta de que en este escenario, tampoco se deberían producir problemas de corrosión en los equipos de la planta.

Por otro lado, una vez terminado el ensayo se volvió a medir la concentración de amina en la solución, observándose que tanto para el sistema donde se encontraba el acero A36 como en el que se encontraba el A516 grado 60 se produjo una disminución en la concentración desde 2 [N] hasta 1,33 [N]. Esta degradación puede ser asociada a contaminantes que se encontraban presentes en la solución de amina extraída desde el estanque.

#### **4.5.2.3 Cupones expuestos a solución de amina a elevada concentración y temperatura**

Dado que en los ensayos anteriores no se encontraron pruebas de que las condiciones establecidas generen corrosión en el sistema, se decidió, además de trabajar a una elevada temperatura, preparar una solución de monoetanolamina que presentara el doble de la concentración que actualmente se utiliza en las condiciones de operación y comprobar si esta situación genera corrosión.

En el manual de la planta se presentan las condiciones de preparación de la lejía de amina y fue en base a ello que se preparó la nueva solución: por cada litro de agua desmineralizada se agregaron 180 [g] de monoetanolamina (en operación se utilizan 90 [g]). Con esto es posible obtener la solución con el doble de la concentración normal.

Las características de este sistema son:

- Concentración amina = 3,7 [N]
- Temperatura sistema = 110 [°C]
- pH solución = 11

Los cupones permanecieron en estas condiciones durante 15 días, tras los cuales se realizaron mediciones de la pérdida de peso. La Tabla 11 muestra un resumen de las principales

características de los cupones de corrosión antes y después de ser sometidos a la solución de amina.

Tabla 11: Cupones con doble de concentración de MEA.

Cupón	Área [cm <sup>2</sup> ]	Masa Inicial [g]	Masa Final [g]	Pérdida Masa [g]	Pérdida Masa [%]
<b>A516 gr 60</b>	20,2148	42,53597	42,53574	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$5,41 \cdot 10^{-4}$
<b>A36</b>	19,8948	39,03697	39,03690	$7,0 \cdot 10^{-5}$	$1,79 \cdot 10^{-4}$

Se observa nuevamente en las dos últimas columnas, que la pérdida de masa de los cupones es pequeña por lo que los valores calculados pueden deberse simplemente a errores asociados a las mediciones en la balanza. Además, una vez retirados los cupones, en su superficie no se observaron rasgos que pudiesen indicar la presencia de corrosión.

Los bajos valores obtenidos dan cuenta de que en este escenario no se produce corrosión en los equipos de la planta.

Además, una vez terminado el ensayo, se volvió a medir la concentración de amina en la solución, observándose que ésta disminuyó a 3,65 [N]. Se aprecia que esta disminución es pequeña, casi despreciable (en comparación al sistema anterior, donde la pérdida era considerable). Esto puede ser explicado por el hecho de que en esta condición, se preparó una nueva solución a partir de amina fresca, por lo que no existen contaminantes que puedan degradarla (como ocurre en el caso anterior).

#### ***4.5.2.4 Cupones expuestos a solución de amina a elevada concentración, elevada temperatura y con presencia de dióxido de carbono.***

Los tres ensayos presentados anteriormente, en los que se varió tanto la concentración de la solución de amina como la temperatura a la que fueron expuestos los sistemas, permiten concluir que la amina por sí sola no sería la responsable de los problemas de corrosión existentes. Por lo tanto, se decidió realizar un ensayo en el que se repitieron las condiciones de concentración y temperatura del ensayo anterior pero además, antes de comenzar el ensayo e introducir los cupones en la solución, se cargó la amina con dióxido de carbono. Para ello, se calentó la solución de amina hasta una temperatura aproximada de 60 [°C] (dado que a esta temperatura se produce la absorción del gas ácido) y, alcanzada esta temperatura, se procedió a burbujear dióxido de carbono a la solución durante aproximadamente 10 minutos; transcurrido este tiempo, se introdujeron los cupones de corrosión y todo el sistema se introdujo en el baño térmico.



Cabe destacar que para asegurar realmente la existencia de absorción del dióxido de carbono en la solución, se midió el pH de ésta antes y después del burbujeo del gas, obteniéndose un pH de 11 sin la presencia de dióxido de carbono y de 9 con la presencia de este gas.

Las características de este sistema son:

- Concentración amina = 3,7 [N]
- Temperatura sistema = 110 [°C].
- pH solución = 9

Los cupones permanecieron en estas condiciones durante 15 días tras los cuales se realizaron mediciones de la pérdida de peso de éstos. La Tabla 12 muestra un resumen de las principales características de los cupones de corrosión antes y después de ser sometidos a la solución de amina.

Tabla 12: Cupones expuestos solución de Amina cargada con dióxido de carbono.

Cupón	Área [cm <sup>2</sup> ]	Masa Inicial [g]	Masa Final [g]	Pérdida Masa [g]	Pérdida Masa [%]
<b>A516 gr 60</b>	21,9426	47,29460	46,97243	0,3222	0,68
<b>A36</b>	18,4400	35,57687	35,27389	0,3030	0,85

De las dos últimas columnas se observa que, para ambos cupones, esta vez sí existió una pérdida de peso que puede ser asociada a la corrosión. Para avalar este hecho, la Figura 18 muestra los cupones luego de ser sometidos al ensayo; en ésta se aprecia un claro efecto corrosivo en la superficie de los cupones tratados.

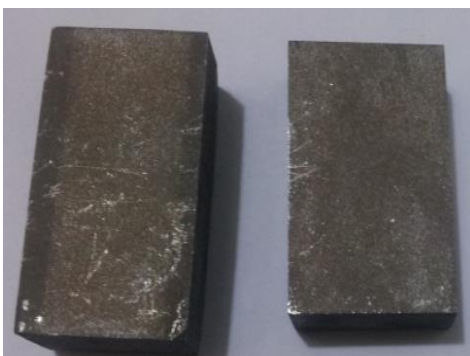


Figura 18: Cupones de corrosión después de haber sido sometidos a la solución de monoetanolamina.

Se procedió entonces a realizar el cálculo de la velocidad de corrosión en cada caso, de acuerdo a la Ec. 38, obteniéndose los siguientes resultados:

**Acero ASTM A516 grado 60:**

$$Velocidad\ Corrosión = \frac{7.200 \cdot 0,3222}{21,9426 \cdot 336 \cdot 7,86} = 0,040[mm/mes]$$

**Acero ASTM A36:**

$$Velocidad\ Corrosión = \frac{7.200 \cdot 0,3030}{18,44 \cdot 336 \cdot 7,861} = 0,045[mm/mes]$$

Las densidades de estos aceros se obtuvieron desde las referencias [24] y [25].

Con respecto a este ensayo, es importante mencionar que en alguna medida, se trató de simular las condiciones de operación en la torre de desorción. Sin embargo, los valores obtenidos de la velocidades de corrosión pueden encontrarse subestimados, debido a que en condiciones de operación la amina cargada de dióxido de carbono circula de forma continua en el equipo, mientras que en el ensayo realizado en el laboratorio, la amina se cargó con el gas ácido solo en un principio y luego el sistema se sometió a una temperatura en la que se produce la desorción del gas, provocando que el dióxido de carbono ya no se encuentre disuelto en la solución, quedando los cupones solamente expuestos a la solución con la amina sin este gas.

Por otro lado, la forma en que se burbujeó el dióxido de carbono en la solución no permite determinar si la carga de gas que absorbe la amina coincide con la condición en operación, donde el sistema de relleno de las torres permite mejorar el área de transferencia entre el gas y la amina.

Sería apropiado, una vez que la planta se encuentre en operación, realizar este ensayo colocando cupones de corrosión directamente en la torre de desorción, para así obtener un valor más real de la velocidad de corrosión que ahí se provoca.

En relación a los cupones de corrosión, cabe mencionar que el acero utilizado en los ensayos como A516 grado 60, en realidad presentan una resistencia menor que el acero de origen de la torre de desorción, debido a una mayor cantidad de impurezas en su composición. Por esta razón, el valor calculado de la velocidad de corrosión del acero A516 grado 60 presenta un error asociado a la elección del material usado en el ensayo.

Finalizado el ensayo, se procedió a medir la concentración de amina en la solución, observándose que ésta disminuyó desde 3,7 [N] a 3,5 [N]. Se observa una pequeña caída en la concentración que puede ser atribuida a la corrosión que se produjo en los cupones de acero, dado que en este caso tampoco existieron otros contaminantes en la solución.

De los ensayos realizados a los cupones de acero se observa que la mayor disminución en la concentración de la monoetanolamina se produce cuando se utiliza la solución de amina almacenada en los estanques. Esto se debe a que esta solución se encuentra altamente contaminada, ya sea con hierro disuelto producto de la corrosión existente o con los mismos productos de degradación de la amina. Por otro lado, las soluciones que fueron preparadas solo desde amina fresca permiten deducir que la presencia de corrosión en el metal provoca, en un determinado grado, la degradación de la amina. Debido a que esta disminución en la concentración es pequeña, sería apropiado repetir el experimento y usar un tiempo mayor de exposición de los cupones de corrosión en estas soluciones.

## 5. CONCLUSIONES

De acuerdo al trabajo realizado y a partir de los resultados obtenidos, se puede concluir que:

- Los principales factores que pueden provocar corrosión en este tipo de plantas corresponden a la temperatura del proceso, la carga de dióxido de carbono en la amina, la metalurgia de las instalaciones y la concentración de amina, de oxígeno y de compuestos sulfurados. En relación al proceso productivo de INDURA, se concluye que este problema se produce porque el tipo de material utilizado en los equipos por donde circula la amina cargada con dióxido de carbono (acero al carbono) no es el más apropiado para estos fines. Dado que las elevadas temperaturas favorecen en un mayor grado la corrosión, la torre de desorción constituye el equipo con mayores problemas.
- Este tipo de corrosión es imposible de eliminar, debido a que es inherente a las condiciones de operación del proceso. Por lo tanto, la única forma de controlar este problema es realizar algunas modificaciones en la metalurgia de las secciones de la planta por donde circula la solución de monoetanolamina cargada con dióxido de carbono.
- Los ensayos de corrosión dan cuenta de que este problema contribuye a la degradación de la monoetanolamina. En el proceso de corrosión, el hierro presente en el acero se disuelve en la solución, catalizando así el proceso de degradación de la monoetanolamina, tal como se describe en el mecanismo de degradación oxidativa de ésta.
- Los elevados tiempos de residencia de la monoetanolamina almacenada en los equipos de la planta favorecen la degradación de la solución al permitir el contacto directo con el oxígeno presente en el aire. En este sentido, es importante establecer nuevas formas de almacenamiento de la solución de la monoetanolamina.

## 6. RECOMENDACIONES

De acuerdo al trabajo realizado y a partir de los resultados obtenidos, es posible proponer mejoras al proceso productivo de INDURA.

Los estudios de corrosión permitieron identificar como principal punto crítico en la operación, la metalurgia de la planta en aquellos lugares por donde circula la solución de monoetanolamina cargada de dióxido de carbono: torre de desorción, tubos en el intercambiador de calor de lejía (sección donde atraviesa la lejía rica) y, en general, cañerías donde circula el solvente cargado de dióxido de carbono. La torre de desorción es la que presenta un mayor grado de corrosión, debido a que este problema se ve intensificado por la alta temperatura a la que opera este equipo.

Este tipo de corrosión es imposible de eliminar, pues está relacionada con las condiciones de operación necesarias para un adecuado proceso de captura de dióxido de carbono (temperatura y concentraciones de gas ácido). Por lo tanto, la única forma de controlar este problema es realizar algunas modificaciones en la metalurgia de las secciones de la planta por donde circula la solución de monoetanolamina cargada con dióxido de carbono.

La mejor solución al problema constituye la construcción de una nueva torre de desorción, pero esta vez, utilizar acero inoxidable en el diseño. Este material presenta en su composición una mayor cantidad del elemento cromo, razón que lo hace más resistente a la corrosión que el acero al carbono. Esta característica del acero inoxidable hace que presente un mayor valor comercial. Sin embargo, la realidad es que, en cuanto a la vida útil de un producto, el acero inoxidable puede ser la mejor opción en término de costos.

Se recomienda repetir el ensayo de corrosión en que se emplea solución de amina cargada con dióxido de carbono utilizando cupones de corrosión de acero inoxidable, para así comparar la velocidad de corrosión en ambos casos.

Cabe señalar que la mayoría de las tuberías que se encuentran en contacto con solución cargada de dióxido de carbono ya han sido reemplazadas por otras de acero inoxidable.

Otra alternativa a este problema es la utilización de un recubrimiento en las paredes internas de la torre de desorción que lo proteja de la corrosión y, que a su vez, no reaccione con la solución que circula dentro de este equipo, evitando una posible contaminación al dióxido de carbono que se está produciendo.

Los revestimientos hacen de barrera entre el metal y el agente corrosivo. Éstos pueden ser de diferentes tipos: orgánicos, inorgánicos o metálicos. La composición del revestimiento debe ser tal que al aplicarse una capa delgada sobre una superficie metálica, sea capaz de formar una película seca y uniforme que actúe como una barrera adherente y que sea eficiente en la

protección contra la corrosión. Esta película debe constituir una capa ininterrumpida, pues si se rompe, el metal base entrará en contacto con el medio corrosivo <sup>[26]</sup>.

La utilización de un revestimiento requiere de la preparación de la superficie del material base para lograr una correcta adhesión, teniendo un especial cuidado en la limpieza del metal. Actualmente, la torre de desorción presenta daños severos producto de la corrosión, por lo que no sería posible aplicar algún revestimiento a su superficie ya que su uso no permite obtener los resultados deseados en materia de prevención de la corrosión. En este sentido, la implementación de un revestimiento debe ser acompañada de la construcción de una nueva torre de acero al carbono.

Además se recomienda realizar una evaluación económica para verificar cuál opción resulta más rentable para la empresa: torre de acero inoxidable (que aumenta la vida útil del equipo) o torre de acero al carbono con un recubrimiento anticorrosivo.

Por otro lado, en relación a la degradación de la monoetanolamina es importante implementar otro sistema de almacenamiento de la solución, de modo tal que ésta no quede retenida en los equipos de la planta. Por esta razón, se recomienda establecer procedimientos de cierre de la planta que involucren un adecuado almacenamiento de la solución de monoetanolamina. Los siguientes pasos serían adecuados para este fin:

- Una vez que se detiene el proceso productivo, se debe retirar toda la solución de amina y almacenarla en sus estanques plásticos (los mismos en que se encuentra la amina al momento de comprarla).
- Antes de depositar la amina en dichos estanques, se debe realizar un proceso de filtración mecánica a toda la solución de monoetanolamina, con la finalidad de retirar algunos productos de corrosión que puedan estar presentes.
- A modo de minimizar la oxidación, y por consiguiente, la degradación de la amina, se puede usar una capa de gas inerte, por ejemplo nitrógeno, en los tanques de almacenamiento. Otra alternativa consistiría en llenar los estanques, de modo tal que se minimice la cantidad de aire que quede en contacto con la solución.
- Un vez que la solución de monoetanolamina ha sido retirada de la planta, se debe efectuar una limpieza de todos los equipos, con el objetivo de eliminar cualquier tipo de contaminación que pudiese quedar adherido a las paredes. Esta limpieza se puede realizar con agua.
- Finalmente, debido al prolongado periodo de tiempo de detención de la planta, se recomienda además, realizar una limpieza de los equipos antes de volver a ponerla en operación.

La Figura 19 presenta una fotografía de muestras de solución de amina obtenidas de diferentes lugares de la planta:

- Recipiente 1: Monoetanolamina fresca
- Recipiente 2: Solución de monoetanolamina extraída directamente del estanque de amina, sin agitación de sistema.
- Recipientes 3 y 4: Solvente extraído luego de poner el funcionamiento las bombas y homogeneizar la solución de monoetanolamina.



Figura 19: Muestras de monoetanolamina.

En la Figura 19 se observa que en el recipiente 2 la solución de amina está transparente. Esta muestra se obtuvo después de un prolongado periodo de detención de la planta. Este hecho permite concluir que después de un determinado tiempo los contaminantes presentes en la solución decantan, formándose dos capas: contaminantes en el fondo del equipo y solución de amina en la parte superior, encontrándose más limpia.

Una vez que la planta se pone en funcionamiento, las bombas agitan el sistema mezclando los contaminantes con la solución de amina. Este hecho se aprecia en la Figura 19 en los recipientes 3 y 4 donde se aprecian las soluciones con un color atípico al de la solución de amina. El color amarillo de éstas indica la presencia de hierro en la solución.

De las figuras 15 y 16, se observa que los contaminantes decantan formando una especie de “lodo”; como primer paso, es fundamental eliminarlo. En el tiempo de trabajo solo fue posible revisar la torre de absorción, pero resulta importante además, revisar los otros equipos donde ha quedado almacenada la amina y también los rellenos de las torres.

Es importante considerar el hecho de que estos contaminantes decantan para eliminarlos de los equipos antes de realizar una agitación en el sistema mezclando solvente y contaminantes. Una vez descartado este “lodo”, es posible trasladar la solución de amina a sus estanques de plástico, haciéndola pasar por un filtro de paños para eliminar partículas residuales.

Ya se ha mencionado antes en este informe que la degradación de la amina se debe a la corrosión presente en la planta y a que su tiempo de residencia es muy elevado (los productos de corrosión y de degradación quedan en contacto con la solución de amina durante todo el tiempo que la planta se encuentra detenida), por lo que las recomendaciones antes propuestas deberían ayudar a mejorar las condiciones de operación y resolver los problemas presentes en INDURA.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] INDURA S.A. "Indura, tecnología a su servicio". [en línea] <<http://www.indura.cl/chile.asp>> [consulta: 24 de abril del 2013]
- [2] LENNTECH. Dióxido de Carbono. 2013. [en línea] <<http://www.lenntech.es/dioxido-de-carbono.htm>> [consulta: 30 de septiembre del 2013]
- [3] DEFINICIÓN ABC. Definición de Dióxido. 2013. [en línea] <<http://www.definicionabc.com/ciencia/dioxido.php>> [consulta: 01 de octubre del 2013]
- [4] INDURA S.A. Manual de Gases. 2006. [en línea] <[http://www.indura.cl/\\_file/file\\_1582\\_m\\_gases\\_2007.pdf](http://www.indura.cl/_file/file_1582_m_gases_2007.pdf)> [consulta: 24 de abril del 2013]
- [5] RODAS. Diagrama de fases. [en línea] <[http://rodas.us.es/file/7a35eedc-8588-e23b-14be-b77099d004e8/1/tema10\\_ims\\_SCORM.zip/page\\_08.htm](http://rodas.us.es/file/7a35eedc-8588-e23b-14be-b77099d004e8/1/tema10_ims_SCORM.zip/page_08.htm)> [consulta: 01 de octubre del 2013]
- [6] PRAXAIR. Dióxido de Carbono. [en línea] <<http://www.praxair.es/eu/es/esp.nsf/1928438066cae92d85256a63004b880d/5f34378f83a4f32e85256c09005ce8bd?OpenDocument>> [consulta: 30 de septiembre del 2013]
- [7] WITTEMAN. CO<sub>2</sub> Recovery Systems. [en línea] <[http://www.pureco2nfidence.com/launch/images/downloads/wittemann\\_capabilities.pdf](http://www.pureco2nfidence.com/launch/images/downloads/wittemann_capabilities.pdf)> [consulta: 30 de septiembre del 2013]
- [8] YANG H., XU Z., FAN M., GUPTA R., SLIMANE R., BLAND A., WRIGHT I. 2008, "Progress in carbon dioxide separation and capture: A review". *Journal of Environmental Sciences*, 20: 14-27.
- [9] THOMSEN H., GELEFF S., "Recovery of CO<sub>2</sub> from exhaust gasses – another way to improve the economical and environmental aspects of CHP-Plants", *Union Engineering a/s*.
- [10] DUGAS R. 2006. "*Pilot Plant Study of Carbon Dioxide Capture by Aqueous Monoethanolamine*". Tesis. Texas, Universidad de Texas. Pp 9- 11.



- [11] MADDIX, R. 1985. Amine Processes. En: Gas Conditioning and Processing. 3° ed. Estados Unidos, Campbell Petroleum Series. Pp. 59 – 86.
- [12] FERNÁNDEZ I. “Captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> procedente de instalaciones de combustión para la generación de energía eléctrica”, Grupo de investigación de energía térmica.
- [13] PÉREZ L. 2005. “Evaluación de la Sección de Lavado de CO<sub>2</sub> de la Planta de Amoníaco de Pequiven-Morón”. Memoria de Ingeniero Químico. Valencia, Universidad de Carabobo, Escuela de Ingeniería Química. Pp 14 - 33.
- [14] HERNÁNDEZ R. 2007. “Análisis de las Tecnologías De Reducción Efectiva De Las Emisiones De CO<sub>2</sub> En Plantas De Producción De Potencia”. Memoria de Ingeniería Energética. Sevilla, Escuela Superior de Ingenieros. Pp 35 - 94.
- [15] ABOUDHEIR A., TONTIWACHWUTHIKUL P., CHAKMA A., IDEM R. 2003. “Kinetics of the reactive absorption of carbon dioxide in high CO<sub>2</sub>-loaded, concentrated aqueous monoethanolamine solutions”. Chemical Engineering Science, 58: 5195 – 5210.
- [16] KLADKAEW N., IDEM R., TONTIWACHWUTHIKUL P., SAIWAN C. 2009. “Corrosion Behavior of Carbon Steel in the Monoethanolamine-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-SO<sub>2</sub> System: Products, Reaction Pathways, and Kinetics”. Journal of Industrial & Engineering Chemistry Research (ACS Publications). 48: 10169–10179.
- [17] DUPART M., BACON T., EDWARDS D. 1993. “Understanding corrosion in alkanolamine gas treating plants”. Hydrocarbon Processing. April 1993 issue, pages 75 – 80.
- [18] CHI S., ROCHELLE G. 2002. “Oxidative Degradation of Monoethanolamine”. Ind. Eng. Chem. Res. 41: 4178-4186
- [19] GOFF G., ROCHELLE G. 2004. “Monoethanolamine Degradation: O<sub>2</sub> Mass Transfer Effects under CO<sub>2</sub> Capture Conditions”. Ind. Eng. Chem. Res. 43: 6400-6408
- [20] SEV-PRENDO. “Condensador Allin ò rosario con dos juntas”. 2011. [en línea] <<http://www.sevmexico.com/categorias/productos/?pr=99>> [consulta: 06 de octubre del 2013]

- [21] ASTM Designation: A 262 – 98. 1998. *“Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels”*.
- [22] COSMOS ONLINE. “Etanolamina (monoetanolamina)”. 2013. [en línea]  
<<http://www.cosmos.com.mx/h/tec/cz4p.htm>> [Consulta: 08 de mayo del 2013]
- [23] MASTEEL. “DIN 17155 H11”. 2009. [en línea] <<http://www.masteel.co.uk/h11.htm>> [consulta: 24 de mayo del 2013]
- [24] CROXON J. “Características del Acero SAE A-36”. 2013. [en línea]  
<[http://www.ehowenespanol.com/caracteristicas-del-acero-sae-a36-info\\_153282/](http://www.ehowenespanol.com/caracteristicas-del-acero-sae-a36-info_153282/)>  
[Consulta: 15 de Junio del 2013]
- [25] METAL SUPPLIERS ONLINE. “Carbon Steels A516 Grade 60”, 2013, [en línea]  
<<http://www.suppliersonline.com/propertypages/A51660.asp>> [Consulta: 15 de Junio del 2013]
- [26] OROZCO R. “Recubrimientos Anticorrosivos” [en línea]  
<<http://www.uv.mx/personal/rorozco/files/2011/05/6-UNIDAD-4-RECUBRIMIENTOS-ANTICORROSIVOS-INICIO.pdf>> [consulta: 20 de agosto del 2013]

# **ANEXOS**

## ANEXO A CARACTERÍSTICAS DE ALCANOLAMINAS

### A.1 DIETANOLAMINA (DEA)

La DEA es una amina secundaria que posee una presión de vapor menor que la MEA, característica que la hace menos volátil, obteniéndose pérdidas menores por vaporización. Luego de la regeneración, la solución de DEA generalmente tiene menor composición de gas ácido residual que la que resulta con soluciones de MEA. Es menos corrosiva que la MEA y posee un bajo costo. Es utilizada cuando se requiere remover grandes cantidades de gases ácidos.

Las desventajas son su baja reactividad comparado con la MEA, requiere mayor circulación por el sistema y no se puede eliminar sus productos de degradación por los métodos tradicionales [13].

### A.2 TRIETANOLAMINA (TEA)

Aunque la TEA fue la primera amina utilizada comercialmente para endulzar el gas natural, en la actualidad, ha sido desplazada por la MEA, DEA y DGA. Las aminas terciarias son menos reactivas con el dióxido de carbono; el enlace formado de esta reacción es extremadamente débil, por lo que con una disminución en la presión se rompe el enlace, regenerándose la amina. La baja reactiva se traduce en altos flujos de la solución de amina circulación en el sistema [13].

### A.3 DIGLICOLAMINA (DGA)

“The Fluor Corporation” patentó el proceso de la diglicolamina y el solvente DGA fue comercializado en los años 60 por “Fluor and Jefferson Chemical Company”, un predecesor de la “Texaco Chemical and Hunstman Corporation”.

La DGA corresponde a una amina primaria y, como tal, tiene ventajas como: alta reactividad, baja presión de vapor, lo que permite su uso en concentraciones mayores, típicamente entre el 40% y 60%; además, se necesita una menor circulación de solvente en el sistema y un menor consumo de vapor al compararlo con la MEA. Por otro lado, posee excelente estabilidad térmica. Entre las desventajas se tiene que se incrementan los costos por solvente comparado con la MEA [13, 14].

#### A.4 **DIISOPROPILAMINA (DIPA)**

Este solvente ha sido ampliamente aceptado en Europa para el tratamiento de gases y líquidos de refinerías, limpiándolos de ácido sulfhídrico y dióxido de carbono. Se caracteriza por tener bajos requerimientos de vapor para la regeneración de la solución y no ser corrosivo.

Gradualmente se ha ido reemplazando el uso de DIPA por MDEA <sup>[14]</sup>.

#### A.5 **METILDIETANOLAMINA (MDEA)**

Este solvente se caracteriza por ser utilizado para la absorción selectiva de ácido sulfhídrico en presencia de dióxido de carbono, especialmente en el caso de que la relación de dióxido de carbono sobre ácido sulfhídrico sea elevada. Las aminas terciarias pueden absorber el ácido sulfhídrico con una gran selectividad bajo condiciones de operación adecuadas y suponiendo tiempos de contacto bajos. Además, esta amina ha adquirido un interés importante en la purificación de gases que no provienen de hidrocarburos, como son los resultantes de la gasificación del carbón <sup>[14]</sup>.

## ANEXO B COMPOSICIÓN DEL GAS LICUADO

Laboratorio Gasco Planta Maipu

23 Abril 2010

### INFORME LABORATORIO ESPECIAL

<b>DATOS</b>	
Fecha	23/04/2010
Procedencia	Planta Maipo
Distribuidor	Gasco GLP
Destinatario	Indura
Hora Muestreo	11:20 AM
Num. Camión	816
Placa Patente	SW - 4256

### **ESPECIFICACIONES**

Cromatografía	NCh 1941	% Vol.
Metano		0,00
Etano		1,33
Etileno		0,00
Propano		96,48
Ciclopropano		0,00
Propileno		0,04
I - Butano		1,64
N - Butano		0,38
Acetileno		0,00
Trans - 2 Buteno		0,00
1 - Buteno		0,00
Neo - Pentano		0,00
Iso - Buteno		0,00
Cis 2 - Buteno		0,12
Iso - Pentano		0,01
N - Pentano		0,00
1,3 - Butadieno		0,00
3-metil-1-Buteno		0,00
Desconocidos		0,00
<b>Total / %</b>		<b>100,00</b>
<i>Butanos totales* / % vol.</i>		<i>2,14</i>
<i>Olefinas totales** / % vol.</i>		<i>0,16</i>
<i>Diolfinas + Acetileno / ppm</i>		<i>0</i>

\*Incluye C4 Saturados e Insaturados

\*\*Incluye todos los compuestos insaturados presentes

Jean Carlos Martinez Fuentes  
R.U.T.: 10.740.571 - 2  
Quimico / Quimico Farmaceutico  
Lab. Gasco Planta Maipu

## ANEXO C CARACTERÍSTICAS DEL LODO DE LA PLANTA DE CO<sub>2</sub>

Se realizaron algunas mediciones al “lodo” extraído desde la torre de absorción para obtener algunas características. Específicamente se midió humedad y pH.

Se utilizó un papel filtro para eliminar el exceso de agua que presenta la muestra y luego se realizaron mediciones de masa. Posteriormente, se colocaron las muestras en un horno a 110 [°C] durante 24 horas para eliminar el agua presente por vaporización; transcurrido este tiempo, se repitieron las mediciones de masa.

Este procedimiento se repitió tres veces para así obtener un promedio y hacer más representativo el valor obtenido. Los valores medidos se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13: Cálculo de humedad en el "lodo"

	Masa inicial [g]	Masa final [g]	Pérdida de masa [g]	Humedad [%]
<b>Muestra 1</b>	5,32	1,93	3,39	64
<b>Muestra 2</b>	8,51	3,13	5,38	63
<b>Muestra 3</b>	7,44	2,77	4,67	63
<b>Promedio</b>				<b>63</b>

Por otro lado, se realizaron mediciones del pH de la solución a partir de papel pH, obteniéndose un valor promedio de 9.