



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**PURIFICACIÓN DE REGENERADO DE METILMETACRILATO  
CRUDO EN MÉXICO: “ELABORACIÓN DE LA INGENIERÍA  
BÁSICA DE PROCESO, DE ACUERDO A FEL II”.**

**TRABAJO ESCRITO VÍA CURSOS DE EDUCACIÓN CONTINUA**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERA QUÍMICA**

**PRESENTA**

**ARACELI GUTIÉRREZ MEJÍA**



**CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. 2021**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE: PROFESOR: ALFONSO DURÁN MORENO**

**VOCAL: PROFESOR: JOSÉ ARTURO MORENO XOCHICALE**

**SECRETARIO: PROFESOR: DANIEL BOBADILLA OCAMPO**

**1er. SUPLENTE: PROFESOR: ÓSCAR HUMBERTO LÓPEZ TESILLOS**

**2do. SUPLENTE: PROFESOR: JORGE RAFAEL MARTÍNEZ PENICHE**

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**EDIFICIO H, MARIO MOLINA, CIRCUITO MARIO DE LA CUEVA S/N,  
COYOACÁN, C.U., 04510 CIUDAD DE MÉXICO, CDMX.**

**ASESOR DEL TEMA:**

**I.Q. JOSÉ ARTURO MORENO XOCHICALE**



---

**SUSTENTANTE (S):**

**ARACELI GUTIÉRREZ MEJÍA**



---

# CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	6
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	7
LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE TABLAS.....	9
1 OBJETIVOS.....	11
1.1 Objetivos generales .....	11
1.2 Objetivos particulares .....	11
2 ALCANCES .....	12
3 ANTECEDENTES.....	14
3.1 Usos del polimetilmetacrilato .....	14
3.2 Proceso actual de purificación de metilmetacrilato.....	14
3.3 Proceso de recolección de acrílico y pirólisis de PMMA.....	16
4 PROBLEMÁTICA.....	18
4.1 Proceso batch y proceso continuo de purificación de MMA: comparación de datos .....	18
4.2 Indicadores de rentabilidad del proyecto de purificación de RMMA crudo (primer estimado de costo nivel V) .....	19
5 FRONT END LOADING E INGENIERÍA BÁSICA DE UN PROYECTO.....	21
5.1 Origen del FEL.....	21
5.2 Definición de Front End Loading (FEL) .....	22
5.3 Ciclo de vida un proyecto de ingeniería .....	23
5.4 Ingeniería básica.....	25
5.5 Ingeniería básica de proceso .....	26
5.5.1 Bases de diseño .....	27

5.5.2	Balance de materia y energía .....	28
5.5.3	Diagrama de flujo de proceso .....	29
5.5.4	Diagrama de tubería e instrumentación .....	30
5.5.5	Plano de localización general .....	31
5.5.6	Hoja de especificaciones .....	31
6	PLANTA DE PURIFICACIÓN DE REGENERADO DE MMA: DOCUMENTOS ENTREGABLES DE LA INGENIERÍA BÁSICA DE PROCESO .....	32
6.1	Bases de diseño .....	33
6.1.1	Objetivo general .....	34
6.1.2	Objetivo específico .....	34
6.1.3	Alcances .....	34
6.1.4	Normativa .....	35
6.1.4.1	Leyes .....	35
6.1.4.2	Reglamentos .....	35
6.1.4.3	Normativa .....	35
6.1.4.4	Normativa estatal .....	37
6.1.4.5	Reglamentación municipal .....	38
6.1.4.6	Códigos de ingeniería .....	38
6.1.5	Desarrollo .....	38
6.1.5.1	Datos generales del sitio .....	38
6.1.5.2	Instalaciones .....	42
6.1.5.2.1	Equipos principales .....	42
6.1.5.2.2	Equipos Auxiliares .....	43
6.1.5.2.3	Sistemas .....	43
6.1.5.2.4	Fuera de límite de batería (FLB) .....	44

6.1.5.3	Capacidad de planta .....	44
6.1.5.4	Filosofía de operación .....	44
6.1.5.4.1	Características de operación.....	45
6.1.5.4.2	Capacidad de operación y flexibilidad .....	45
6.1.5.4.3	Flexibilidad.....	46
6.1.5.5	Filosofía de control.....	46
6.1.5.5.1	Grado de automatización .....	46
6.1.5.5.2	Filosofía de operación de motores e interlocks .....	50
6.1.5.6	Filosofía de arranque y paro.....	50
6.1.5.6.1	Arranque de planta .....	50
6.1.5.6.2	Paro de planta.....	51
6.1.5.6.3	Fuente de la tecnología del proceso de la planta .....	52
6.1.5.7	Calidad de reactivos y productos .....	52
6.1.5.7.1	Corriente de RMMA crudo (reactivo).....	52
6.1.5.7.2	Corriente de NaOH (reactivo).....	53
6.1.5.7.3	Corriente de RMMA crudo ajustado .....	53
6.1.5.7.4	Corriente mezclada y estabilizada para envío a tanque separador de metilmetacrilato S-01 .....	54
6.1.5.7.5	Corriente de RMMA purificado (producto).....	54
6.1.5.7.6	Corriente de fondos de la torre S-02 (subproducto). .....	55
6.1.5.7.7	Corriente de lodos (subproducto).....	56
6.1.5.8	Calidad del proceso de purificación de monómero de metilmetacrilato .....	57
6.1.5.8.1	Calidad requerida del destilado.....	57
6.1.5.8.2	Especificación de los valores de los fondos de la torre S-02 .	58
6.1.6	Documentos .....	58

6.2	Descripción del proceso.....	59
6.2.1	Objetivo .....	60
6.2.2	Alcance.....	60
6.2.3	Descripción del proceso .....	60
6.3	Diagrama de flujo de proceso .....	65
6.4	Lista de equipos.....	67
6.4.1	Objetivo general .....	68
6.4.2	Alcances.....	68
6.4.3	Lista de equipos .....	68
6.5	Diagrama de tubería e instrumentación .....	73
6.6	Plano de localización general .....	75
6.7	Hoja de datos.....	77
7	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	79
8	CONCLUSIONES .....	82
	ANEXO A.....	84

# INTRODUCCIÓN

El acrílico es un producto que tiene un sinnúmero de aplicaciones, tales como: partes de automóviles y aviones, utensilios de cocina, muebles, letreros, herramientas de corte y grabado, caretas y protección personal, etcétera.

La materia prima para la fabricación de lámina acrílica es el monómero de metilmetacrilato (MMA), este debe tener una pureza mayor de 90 % masa para obtener un producto de excelente calidad.

Actualmente, el polimetilmetacrilato (PMMA) es de los pocos polímeros que, en la industria del plástico, se pueden reciclar regresándolos a su materia prima original, es decir, de PMMA a MMA. A este proceso de reciclado se le conoce como regeneración de MMA. La regeneración se lleva a cabo en tres etapas:

- Recolección de desperdicio de PMMA (recolección de scrap).
- Pirólisis del polímero de metilmetacrilato.
- Purificación del MMA obtenido en el proceso de pirólisis.

Actualmente, en el estado de México se ubica una planta dedicada a la fabricación de lámina acrílica. Uno de los procesos existentes en la planta es el regenerado de MMA. En la etapa de purificación del proceso de regenerado de MMA se lleva a cabo con una destilación batch en la cual existen varias deficiencias, la principal deficiencia, y por la cual se está desarrollando este trabajo, es que en los subproductos de la etapa de purificación hay un desperdicio considerable de MMA, aproximadamente 182 toneladas anuales.

Se pretende mejorar el proceso de destilación batch existente, por lo cual, se planea construir una nueva planta de purificación de MMA a partir de una destilación continua. Con esta nueva planta se podrá recuperar más del 87 % del monómero con una pureza mayor a 90 % masa.

El objetivo de este trabajo de titulación es el desarrollo de la ingeniería básica de proceso, de acuerdo a FEL II, de la nueva planta para la etapa de purificación de MMA.

Actualmente, para la fabricación de la lámina acrílica se hace una mezcla de MMA virgen con MMA purificado (80:20, respectivamente), entre más puro sea el MMA purificado, menor cantidad de MMA virgen se necesitará para la mezcla. Con el nuevo proceso de purificación de RMMA tendremos un producto con mayor pureza, lo cual repercute favorablemente en los costos de fabricación de la lámina acrílica. Además, es un proyecto en pro del medio ambiente, ya que los subproductos del proceso de purificación se utilizan para otra parte del proceso principal (fabricación de la lámina acrílica), o son vendidos a otras empresas que los requieren.

Previo a este trabajo, durante el diplomado de “Desarrollo de Proyectos de Ingeniería” impartido por la Facultad de Química de la UNAM (marzo-agosto 2018), se desarrolló el caso de negocios e ingeniería conceptual del proceso de purificación de MMA crudo. Este trabajo deja las bases suficientes para que se desarrolle una actualización del caso de negocio.

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

CICE	Construction Industry Cost Effectiveness
CII	Construction Industry Institute (CII, 2019)
DFP	Diagrama de Flujo de Proceso
DTI	Diagrama de Tubería e Instrumentación
ESD	Emergency Shutdown System
HAZOP	Hazardous Operation Analysis
HMI	Human Machine Interface
NaOH	Hidróxido de sodio
PDRI	Project Definition Rating Index
PLC	Programmable Logic Controller
PLG	Plano de Localización General
RMMA	Regenerado de monómero de metilmetacrilato
Scrap	Desperdicio de polimetilmetacrilato
SCD	Sistema de Control Distribuido
UPS	Uninterruptible Power Supply

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 3.1</b> Torre de destilación batch de RMMA. (Planta actual en el Estado de México). .....	15
<b>Figura 3.2</b> Tanques de recolección de RMMA purificado. (Planta actual en el Estado de México). .....	15
<b>Figura 3.3</b> Recolección de acrílico. (Planta actual en el Estado de México). .....	16
<b>Figura 3.4</b> Molienda de acrílico. (Planta actual en el Estado de México). .....	16
<b>Figura 3.5</b> Proceso de pirolisis para depolimerizar el PMMA. (Planta actual en el Estado de México). .....	17
<b>Figura 3.6</b> Tanque de almacenamiento de RMMA (Planta actual en el Estado de México). .....	17
<b>Figura 5.1</b> Ciclo de vida de un proyecto. (Castillo, 1995).....	24
<b>Figura 5.2</b> Actividades propias de un proyecto en cada etapa. (Castillo, 1995)...	26
<b>Figura 6.1</b> Ubicación geográfica. (Google Maps, 2020).....	39
<b>Figura 6.2</b> Vista satelital de la planta de plásticos dentro de Ocoyoacac. (Google Maps, 2020).....	39
<b>Figura 6.3</b> Rosa de los vientos municipio de Ocoyoacac.....	42
<b>Figura 9.0.1</b> DFP de la planta de purificación de MMA. (Simulación CHEMCAD 7.1.2).....	84
<b>Figura 9.0.2</b> Balance de materia y energía en cada corriente. (Simulación CHEMCAD 7.1.2).....	85
<b>Figura 9.0.3</b> Condiciones de salida del destilado de MMA. (Simulación CHEMCAD 7.1.2).....	86
<b>Figura 9.0.4</b> Datos de la bomba P-04 del proceso. (Simulación CHEMCAD 7.1.2). .....	87

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 4.1</b> Comparación de datos por proceso batch y proceso continuo. ....	18
<b>Tabla 4.2</b> Indicadores de rentabilidad del proyecto. ....	19
<b>Tabla 4.3</b> Datos importantes, resultado de la evaluación del caso de negocios...	20
<b>Tabla 6.1</b> Lista de códigos de ingeniería.....	38
<b>Tabla 6.2</b> Datos generales del sitio. ....	40
<b>Tabla 6.3</b> Capacidades de la planta.....	44
<b>Tabla 6.4</b> Parámetros de operación.....	45
<b>Tabla 6.5</b> Características de operación.....	46
<b>Tabla 6.6</b> Corriente de RMMA crudo. ....	52
<b>Tabla 6.7</b> Corriente de NaOH. ....	53
<b>Tabla 6.8</b> Corriente de RMMA crudo ajustado. ....	53
<b>Tabla 6.9</b> Propiedades de corrientes para envío a tanque de separación. ....	54
<b>Tabla 6.10</b> Corriente de RMMA purificado. ....	54
<b>Tabla 6.11</b> Corriente de fondos de la torre S-02. ....	55
<b>Tabla 6.12</b> Corriente de lodos.....	56
<b>Tabla 6.13</b> Calidad esperada del proceso.....	57
<b>Tabla 6.14</b> Composición del destilado. ....	57
<b>Tabla 6.15</b> Valores esperados por el proceso de Rectificación.....	58
<b>Tabla 6.16</b> Requerimientos de diseño. ....	60
<b>Tabla 6.17</b> Características de la alimentación de RMMA crudo. ....	61
<b>Tabla 6.18</b> Lista de tanques.....	68
<b>Tabla 6.19</b> Lista de bombas.....	70
<b>Tabla 6.20</b> Lista de equipos de calentamiento o enfriamiento.....	71
<b>Tabla 6.21</b> Lista de torres. ....	72
<b>Tabla 7.1</b> Porcentaje de rendimiento en un proceso batch y uno continuo. ....	79
<b>Tabla 7.2</b> Porcentajes de composiciones de destilado y lodos por destilación batch y continua. ....	80
<b>Tabla 7.3</b> Costos clase IV.....	80
<b>Tabla 8.1</b> Modificación de costos.....	82

# 1 OBJETIVOS

## 1.1 Objetivos generales

Desarrollo de la ingeniería básica de proceso para una planta de purificación de regenerado de metilmetacrilato crudo (RMMA crudo) de acuerdo a FEL II.

## 1.2 Objetivos particulares

Realización de los siguientes documentos entregables de la ingeniería básica de proceso:

- Bases de diseño.
- Descripción del proceso.
- Diagrama de flujo de proceso.
- Lista de equipos.
- Balance de materia y energía.
- Diagrama de tubería e instrumentación para torre de destilación fina (A-404).
- Plano de localización general.
- Hoja de datos para tanque flash (HD-A-003).
- Dimensionamiento de equipo.

## 2 ALCANCES

Este trabajo de titulación se encuentra ubicado y limitado sólo a lo correspondiente a la ingeniería básica de la disciplina de proceso.

A continuación, se describe el alcance de cada uno de los documentos presentados en este trabajo.

**Bases de diseño de proceso.** Se enlistan diferentes normas que aplican al proyecto. Se especifican las condiciones de presión, temperatura y composición de las corrientes de entrada a la planta de purificación del monómero metilmetacrilato, corrientes intermedias principales y corrientes de salida. Adicionalmente se definen los datos del sitio y condiciones de paro, arranque y operación de la planta.

**Descripción de proceso.** Se define ordenadamente el proceso de purificación de metilmetacrilato dentro del límite de baterías tomando como referencia el diagrama de flujo de proceso A-101, especificando condiciones de presión y temperatura en los equipos y en las corrientes de entrada y salida de la planta.

**Diagrama de flujo de proceso.** Se incluyen principales líneas del proceso, símbolos de equipos principales, nombres y números de identificación, controles básicos del proceso, líneas de recirculación, datos de presión y temperatura de los fluidos que circulan.

**Lista de equipos.** Se define el listado de equipos de la planta de purificación del monómero metilmetacrilato que se encuentren dentro del límite de baterías, así como algunas especificaciones de estos.

**Balance de materia.** Obtenido a través de una simulación en CHEMCAD 7.1.2 (anexo A) y de una planta piloto. Se encuentra incluido en el diagrama de flujo de proceso. Se definen los flujos másicos, fracciones mol de cada compuesto, así como la densidad y condiciones de presión y temperatura de cada corriente presentada en el DFP.

**Balance de energía.** Obtenido a través de una simulación en CHEMCAD 7.1.2 (anexo A), se presenta en el DFP con los flujos de calor para cada una de las corrientes.

**Diagrama de tubería e instrumentación.** Se presenta únicamente el DTI de la torre de destilación fina S-02 (A-404) con sus líneas de conexión, válvulas e instrumentos.

**Hoja de especificaciones.** Se presenta únicamente la hoja de especificaciones del tanque flash S-01 (HD-A-003).

**Plano de localización general.** Se presenta un arreglo para los equipos de acuerdo a las medidas del terreno, dimensiones y especificaciones de los equipos.

## 3 ANTECEDENTES

### 3.1 Usos del polimetilmetacrilato

El poli(metil-2-metilpropenoato) o polimetilmetacrilato (PMMA) es un polímero plástico que se emplea con fines industriales y también médicos. Compite en algunas aplicaciones con otros polímeros, tales como el policarbonato o el poliestireno, sin embargo, destaca en cuanto a resistencia a la intemperie, transparencia y resistencia al rayado.

El PMMA es usado, por ejemplo, en la fabricación de autopartes; utensilios para el hogar como sillas, mesas, tinas de baño; también se usa en señalización y cartelería; algunas albercas y ventanas de acuarios también son construidas de lámina acrílica; además por la gran variedad de diseños, colores y acabados de lámina acrílica se abre un mundo de posibilidades para su uso en arte y decoración. En cuanto a aplicaciones médicas, por ejemplo, las prótesis dentales suelen estar hechas de PMMA, lentes de contacto, implantes para aplicaciones en craneoplastia (Ospina, 2014); y en cirugías estéticas se inyectan pequeñas microesferas de PMMA en suspensión con un fluido biológico para reducir arrugas o cicatrices de forma permanente en la piel (Cornejo, Alcolea, & Trelles, 2011).

### 3.2 Proceso actual de purificación de metilmetacrilato

Actualmente, en México, existe un proceso de purificación de monómero de metilmetacrilato (MMA) que se lleva a cabo por destilación batch como se muestra en la **Figura 3.1** y **Figura 3.2**. El proceso consiste en calentar MMA el cual esta previamente ajustado con una corriente de hidróxido de sodio al diez por ciento (NaOH al 10 %W), posteriormente se purifica en una torre de destilación de la cual obtenemos el producto final deseado.

Una de las desventajas de este proceso de destilación batch es la inconsistencia de las composiciones tanto en la parte ligera como en los fondos de la torre de destilación, ya que el producto que se espera únicamente se obtiene en estado

estacionario de la operación; además de ser un proceso energéticamente no tan eficiente.

En este proceso existe una considerable variabilidad de las propiedades del monómero de metilmetacrilato regenerado (RMMA), tales como la acidez, contenido de humedad y color. Por tal motivo para tener una lámina acrílica de calidad es necesario mezclar el RMMA con grandes porciones de MMA virgen.



**Figura 3.1** Torre de destilación batch de RMMA. (*Planta actual en el Estado de México*).



**Figura 3.2** Tanques de recolección de RMMA purificado. (*Planta actual en el Estado de México*).

### 3.3 Proceso de recolección de acrílico y pirólisis de PMMA

Previo al proceso de purificación de RMMA crudo se llevan a cabo las siguientes etapas:

- Recolección y limpieza de desperdicio de materiales acrílicos.
- Molienda de material acrílico recolectado.
- Despolimerización de PMMA por proceso de pirólisis.

La corriente obtenida en la depolimerización no es completamente pura debido a los aditivos y algunos otros componentes presentes en el acrílico recolectado. A esta corriente se le conoce con el nombre de RMMA crudo.

A continuación, se muestran imágenes de las etapas mencionadas anteriormente.



**Figura 3.3** Recolección de acrílico. *(Planta actual en el Estado de México).*



**Figura 3.4** Molienda de acrílico. *(Planta actual en el Estado de México).*



**Figura 3.5** Proceso de pirolisis para depolimerizar el PMMA. (*Planta actual en el Estado de México*).



**Figura 3.6** Tanque de almacenamiento de RMMA (*Planta actual en el Estado de México*).

## 4 PROBLEMÁTICA

### 4.1 Proceso batch y proceso continuo de purificación de MMA: comparación de datos

La principal razón por la que se inició este proyecto es que en los lodos (fondos de la torre de destilación del proceso batch) se tiene un desperdicio considerable de MMA (ver **Tabla 4.1**) y aunque estos lodos son vendidos como combustible para una cementera, se podría tener una mejor utilidad si se logra recuperar mayor porcentaje de MMA con mayor pureza. Por lo anterior, se propone la creación de una nueva planta de purificación de MMA a partir de un proceso continuo. En la **Tabla 4.1** se muestra una comparación de costos y cantidades anuales de materia prima, productos y subproductos de cada proceso.

**Tabla 4.1** Comparación de datos por proceso batch y proceso continuo.

Datos	Unidades	Proceso batch	Proceso continuo
		6 t/d (Actual)	10 t/d (Futuro)
<b>Cantidad de RMMA producido</b>	t/a	1,920	3,200
<b>Cantidad de lodos</b>	t/a	303	253.44
<b>Composición promedio de MMA en fondos (Lodos)</b>	% W	60	70
<b>Cantidad de MMA desperdiciada</b>	t/a	181.80	177.41
<b>Cantidad de materia prima (RMMA CRUDO)</b>	t/a	2,209.18	3,632.64
<b>Cantidad de materia prima (NaOH al 10 %W)</b>	m <sup>3</sup> /a	13.82	23.04
<b>Costo RMMA CRUDO</b>	USD/a	\$ 1,988,262.00	\$ 3,269,376.00
<b>Costo NaOH al 10 %W</b>	USD/a	\$ 39,999.74	\$ 66,666.24
<b>Costo total de la materia prima</b>	USD/a	\$ 2,028,261.74	\$ 3,336,042.24

<b>Cantidad de estireno</b>	t/a	0	199.68
<b>Recuperación de estireno</b>	USD/a	\$ -	\$ 199,680.00
<b>Recuperación de lodos (combustible para cementeras)</b>	USD/a	\$ 15,150.00	\$ 12,672.00
<b>Precio RMMA purificado</b>	USD/t	\$ 1,250.00	\$ 1,250.00
<b>Valor por el RMMA del proceso</b>	USD/a	\$ 2,400,000.00	\$ 4,000,000.00
<b>Valor total (RMMA purificado + Lodos + Estireno)</b>	USD/a	\$ 2,415,150.00	\$ 4,212,352.00
<b>Costos del proceso</b>	USD/a	\$ 259,200.00	\$ 423,683.00
<b>Utilidad</b>	USD/a	\$ 27,688.26	\$ 352,626.76

En la utilidad presentada en la **Tabla 4.1**, no se contempla que el rango de costos en el mercado del RMMA purificado va de \$ 2 a \$ 3 USD por kg. El costo de RMMA regenerado para la planta es de \$ 1.25 USD por kg, por lo que el proceso genera un ahorro significativo en ambos procesos.

#### **4.2 Indicadores de rentabilidad del proyecto de purificación de RMMA crudo (primer estimado de costo nivel V)**

A continuación, en la **Tabla 4.2**, se presentan los indicadores de rentabilidad del proyecto, nueva planta de purificación de MMA mediante proceso continuo de destilación, obtenidos previamente del caso de negocios.

**Tabla 4.2** Indicadores de rentabilidad del proyecto.

<b>TIR</b>	44 %
<b>VPN</b>	\$ 1,264,470.07
<b>TIRM</b>	12 %
<b>PRI</b>	Aprox. 2.25 años

- La TIR (Tasa Interna de Retorno): es la tasa de interés a la cual el valor presente de los flujos de efectivo positivo (ingresos) es igual a los flujos de efectivo negativos (egresos) de un proyecto de inversión; es decir, tasa a la cual el valor presente neto del proyecto es igual a cero.

*TIR > r Se acepta el proyecto, r corresponde a la tasa de descuento.*

*TIR = r Indiferente entre hacer o no el proyecto.*

*TIR < r Se rechaza el proyecto.*

- El VPN (Valor Presente Neto), es el método tradicional de la valuación de un proyecto de inversión y resulta de la suma de los flujos de efectivo (ingresos menos egresos que se producirán durante la vida del proyecto), descontados a una tasa de interés estipulada. Esta metodología asume volatilidades de cero en los flujos de efectivo libres proyectados.
- La TIRM (Tasa Interna de Retorno Modificada), es un método de valoración de inversiones que mide la rentabilidad de una inversión en términos relativos (en porcentaje), cuya principal cualidad es que elimina el problema de la inconsistencia que puede surgir al aplicar la TIR.
- El PRI (Periodo de Recuperación de la Inversión) es el tiempo, generalmente expresado en años, en el cual se recupera la inversión de un proyecto de inversión.

En la **Tablas 4.3** se presentan algunos datos importantes de la evaluación del caso de negocios para la nueva planta de purificación de MMA.

**Tabla 4.3** Datos importantes, resultado de la evaluación del caso de negocios.

<b>Vida útil del proyecto (años)</b>	20
<b>Inversión (USD)</b>	\$ 792,367.54
<b>Tasa de descuento</b>	12.00 %

## 5 FRONT END LOADING E INGENIERÍA BÁSICA DE UN PROYECTO

### 5.1 Origen del FEL

A finales de los años 70 había una disminución considerable en la productividad de la industria de la Construcción de los Estados Unidos. Por tal motivo se reunieron expertos para identificar las causas del problema.

Como resultado se creó un informe de Efectividad de Costo de la Industria de la Construcción (CICE, por sus siglas en inglés). Según CICE las principales causas que influyen en la pérdida de productividad y que tienen el impacto más importante en los costos de los proyectos son:

- Deficientes prácticas de seguridad.
- Deficientes prácticas de administración de la construcción.
- Falta de motivación de los trabajadores.

En octubre de 1983 por recomendación de CICE se creó el Instituto de la Industria de la Construcción (CII, por sus siglas en inglés).

La misión del CII es (CII, 2019): “Mejorar la efectividad del costo de la inversión durante el ciclo de vida de un proyecto industrial, desde la definición inicial del proyecto hasta la terminación, recepción y pruebas. Con la colaboración de importantes resultados de la industria y proveyendo orientación en las mejores prácticas descubiertas a través de la investigación, los miembros del CII son colectivamente un foro de la industria para los procesos de ingeniería-procura y construcción.”

Las principales mejores prácticas validadas que el CII reconoce son enlistadas a continuación (CII, 2019):

- Definición Inicial del proyecto o Front End Loading (FEL) incluyendo Project Definition Rating Index (PDRI).
- Alineación.

- Constructibilidad.
- Efectividad del diseño.
- Administración de materiales.
- Construcción de equipos.
- Administración de la calidad.
- Administración del cambio.
- Resolución de disputas.
- Técnicas de cero accidentes.

Una evaluación del impacto en resultados y aplicabilidad de las mejores prácticas propuestas por el CII mostro que la práctica de definición inicial del proyecto (FEL) fue la que obtuvo la calificación más alta.

## **5.2 Definición de Front End Loading (FEL)**

FEL, es un término acuñado por la compañía DuPont hace más de quince años. Es un modelo empleado por DuPont para ayudar a enfocar a la gente, desarrollar los procesos y la disciplina hacia la correcta ejecución de proyectos. En esencia sirve para definir qué es lo que se quiere hacer, y la forma en que la gente que lo realizará pueda llevarlo por el camino más efectivo para el negocio.

El concepto de FEL es ahora empleado por las más grande plantas químicas de energía y proceso.

La metodología FEL, es una metodología para proyectos de inversión, que consiste en un conjunto de procesos para el desarrollo de proyectos competitivos basados en la consideración gradual y comprensiva de todos los factores claves que permitan traducir la estrategia de una compañía en un proyecto clave.

El Front End Loading es una mejor práctica que se ha sido comprobada por empresas líderes de Estados Unidos y Europa mejorando el desempeño de los proyectos en términos de costo y operatividad. Las empresas emplean el FEL adaptado a las necesidades de negocio y cultura de cada una de ellas.

Las compuertas de autorización del FEL en sus etapas claves son:

- Planeación de negocios.
- Selección de alternativas.
- Definición del alcance y diseño.
- Plan de Ejecución del Proyecto.

A través de esas fases se selecciona el proyecto correcto y se planea la ejecución adecuada del mismo. Cada fase tiene objetivos y entregables específicos.

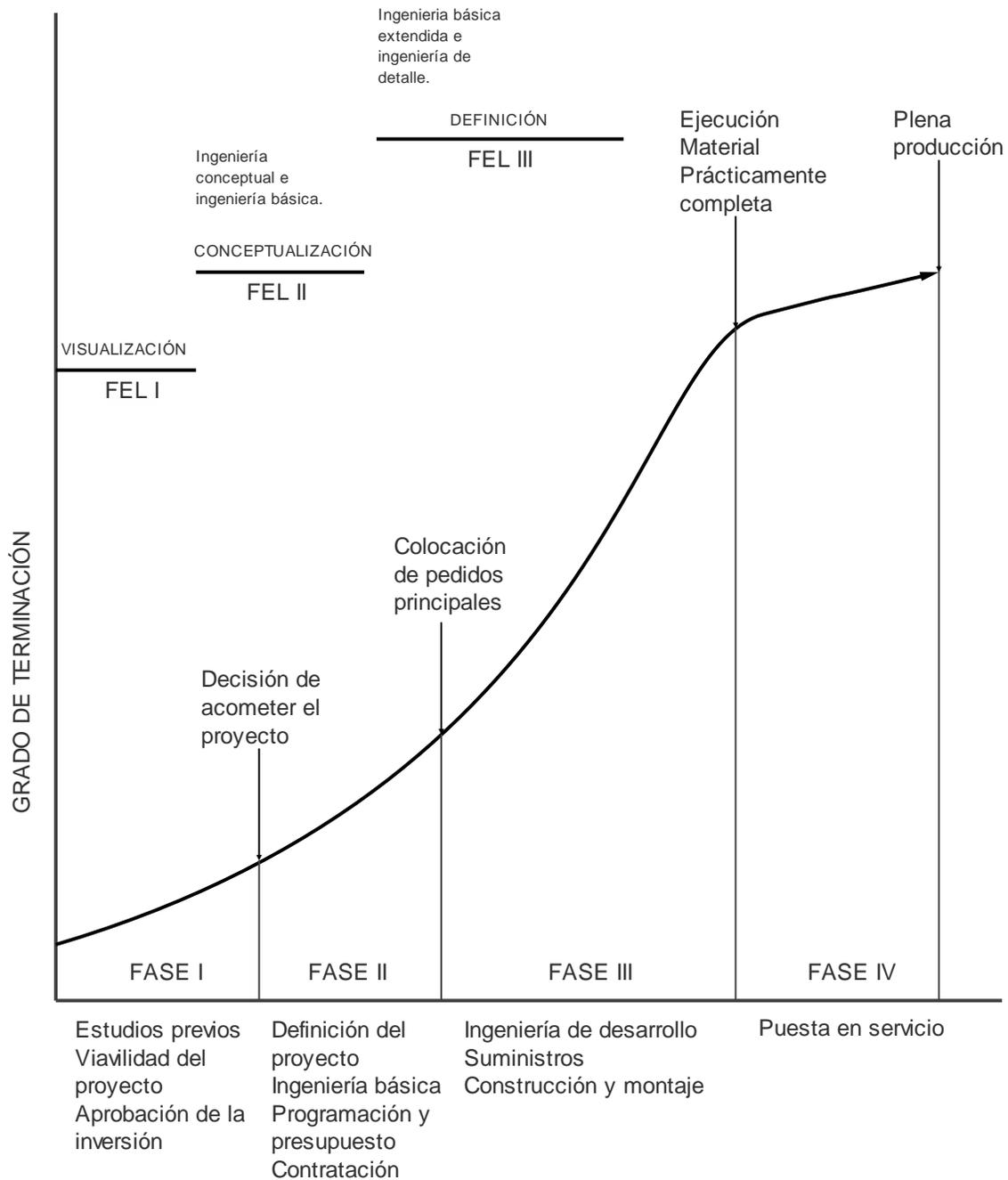
### **5.3 Ciclo de vida un proyecto de ingeniería**

Todo proyecto de ingeniería tiene fines ligados a la obtención de un producto, proceso o servicio que es necesario generar a través de diversas actividades, que podemos agrupar en fases, como se muestra en la **Figura 5.1**. En el campo industrial hay que distinguir el producto del proyecto que lo origina, siendo diferentes los ciclos de vida de uno y de otro (Castillo, 1995; Marcos, Elías, & Meré, 2014).

En la **Figura 5.1** se muestra una curva que representa el ciclo de vida típico de un proyecto:

1. La *fase I* corresponde a los estudios previos para determinar la viabilidad del proyecto y conseguir la aprobación de la inversión necesaria.
2. La *fase II* se inicia con la definición de los objetivos y el establecimiento de la organización, para continuar con la realización del diseño básico y el establecimiento del presupuesto y de la programación. En ella suele iniciarse la contratación de los suministros principales que en muchos casos inciden en el camino crítico necesario para cumplir el objetivo del plazo.
3. La *fase III* suele ser la de mayor duración en el tiempo, ya que incluye todo el desarrollo del diseño, la adquisición de recursos y ejecución de actividades previstas. Esta fase finaliza cuando la ejecución material del proyecto está prácticamente acabada y en condiciones de iniciar el periodo de pruebas.
4. Finalmente, la *fase IV* corresponde a las pruebas, puesta en marcha y puesta en operación de los diferentes sistemas y subsistemas, hasta que la totalidad

del proyecto se pone en servicio y se alcanzan los objetivos establecidos en las especificaciones iniciales.



**Figura 5.1** Ciclo de vida de un proyecto. (Castillo, 1995).

## 5.4 Ingeniería básica

La ingeniería básica se puede definir como (Marcos, Elías, & Meré, 2014): *“Conjunto de documentos que definen inequívocamente el proyecto y su coste más favorable en un entorno dado”*.

Esta ingeniería básica puede ejecutarse directamente por la propiedad o por una empresa de ingeniería independiente. Una característica importante es que, si está bien hecha, puede ser desarrollada perfectamente, en las fases posteriores de ingeniería de detalle, compras, construcción y montaje por otra empresa con un mínimo de problemas. (Marcos, Elías, & Meré, 2014).

En la **Figura 5.2** se enlistan las actividades propias de la ingeniería básica y así como las actividades de las etapas que la anteceden y la preceden, siendo estas, la ingeniería conceptual, ingeniería de detalle, gestión de compras, construcción y montaje y puesta en servicio.

### Ingeniería de conceptual

- Objetivos y alcances del proyecto.
- Descripción del Proyecto y del proceso (define la capacidad de producción).
- Bases de usuario.
- Arreglo general.
- Diagrama de flujo del proceso preliminar.
- Estudios técnicos básicos, incluye selección y evaluación de tecnologías (técnico-económica) y ambientales EIA. MIA etc.
- Primer estimado de costo nivel V.
- Estipular términos legales y jurídicos.

### Ingeniería básica

- Revisión de estudios previos.
- Datos de partida. Permisos y autorizaciones.
- Ingeniería de proceso.
- Transferencia de tecnología.

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definición técnica del proyecto.</li> <li>• Estimación de costos clase IV.</li> </ul>
<b>Ingeniería de detalle</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cálculos, especificaciones, planos, mediciones, etcétera.</li> <li>• Ingeniería civil, infraestructura, arquitectura y estructuras.</li> <li>• Equipos, maquinaria e instalaciones.</li> <li>• Tuberías, instrumentación y control.</li> <li>• Informática.</li> <li>• Estimación de costos clase III.</li> </ul>
<b>Gestión de compras</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gestión de compras.</li> <li>• Gestión de contratación.</li> <li>• Seguimiento: inspección, activación y tráfico.</li> </ul>
<b>Construcción y montaje</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Organización de la construcción y montaje.</li> <li>• Supervisión de la construcción y montaje.</li> </ul>
<b>Puesta en servicio</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pruebas.</li> <li>• Puesta en marcha.</li> <li>• Puesta en operación.</li> </ul>

**Figura 5.2** Actividades propias de un proyecto en cada etapa. *(Castillo, 1995).*

### 5.5 Ingeniería básica de proceso

Previo a esta etapa se realizó un análisis y evaluación de los posibles procesos y se seleccionó uno de ellos.

La ingeniería básica de proceso es la actividad en dónde se determinan los aspectos técnicos y condiciones de operación que presentará la planta. El objetivo primordial de esta especialidad es establecer las características de los equipos y elementos principales de una planta para materializar las operaciones fisicoquímicas.

Como entregables principales y no limitativos de esta especialidad se pueden considerar:

- Bases de diseño.
- Diagrama de flujo de proceso.
- Balance de materia y energía.
- Descripción del proceso.
- Filosofía de operación y control.
- Hojas de datos de equipo.
- Diagramas de tuberías e instrumentación.
- Arreglo general de planta o de equipos.
- Lista de equipo.

### **5.5.1 Bases de diseño**

Antes de iniciar el diseño del proceso, es necesario dejar sentadas unas bases claras de partida para todo el desarrollo posterior, como son (Castillo, 1997):

- Fijar claramente los productos a obtener y su calidad, mediante una completa especificación de los mismos.
- Aspectos como grado de pureza del producto, su contenido en humedad, o la proporción entre los distintos subproductos obtenidos.
- El tamaño de la planta es función no solo de la cantidad de producto a obtener, si no del tipo de proceso (continuo o por lotes "batch") y de las horas de operación al año.

La posibilidad de ampliaciones futuras puede afectar el tamaño de algunos equipos, que pueden sobredimensionarse previendo esta eventualidad.

- La calidad de las materias primas, su procedencia, la posibilidad de orígenes distintos y de modificación de sus características por efecto de almacenamiento deben ser detalladamente contempladas.
- Los criterios económicos siempre han de estar presentes en cualquier diseño. La elección entre una primera inversión alta y unos costes de operación bajos, es un eterno dilema que hay que decidir en cada caso.

La flexibilidad del proceso y el nivel de seguridad en los resultados parciales de cada operación y en el global deben ser atentamente estudiados con el

claro criterio de que el exceso de factores de seguridad revierte siempre en un mayor coste de la planta. Este coste habrá que compararlo con el originado por una posible parada, evaluando el cese de producto, la pérdida de mercado, el lucro cesante, etcétera.

- Finalmente, el plazo disponible afecta muy directamente a la economía de la planta. Un buen diseño necesita tiempo; con tiempo suficiente pueden estudiarse alternativas, valorarse y seleccionar la mejor, aunque está en contradicción con la necesidad de que el producto ya fabricado esté presente en el mercado antes de que el espacio disponible sea ocupado por la competencia.

Dentro de las bases de diseño hay que incluir una serie de datos locales, que condicionan el proceso. Hay que tener en cuenta las condiciones locales con el objetivo de conseguir los mejores rendimientos en esa instalación concreta.

### **5.5.2 Balance de materia y energía**

Los balances de materiales y energía constituyen el arranque mismo del proceso y es donde los conocimientos específicos de química y físico-química son directamente aplicables.

Los balances analizan los flujos cualitativos y cuantitativos de todos los materiales que intervienen en el proceso, indicando su estado físico, presión, temperatura, etcétera.

Todas las necesidades se calculan a partir del conocimiento de las propiedades físicas de los materiales que intervienen en el proceso y cuando estas no se conocen y no se pueden obtener de ninguna fuente de información, será necesario recurrir al laboratorio y/o a la planta piloto (Castillo, 1997).

Como resultado de los balances pueden definirse:

- Cargas térmicas de intercambiadores de calor, condensadores y enfriadores.
- Cargas térmicas de calderas, generadores y hornos.

- Flujos de vapor y líquidos en torres de fraccionamiento.
- Capacidades de bombas y válvulas de control.
- Capacidades de válvulas de seguridad y relevo.

### **5.5.3 Diagrama de flujo de proceso**

La función de un diagrama de flujo (DFP, por sus siglas) es recoger toda la información suministrada por los diagramas de bloques y balances de materiales y energía, tanto referentes a los equipos principales necesarios para la operación como a las líneas de conexión. A continuación, se enlista lo que debe incluirse en un DFP (Marcos, Elías, & Meré, 2014):

- Corrientes de proceso.
- Símbolos de equipos principales, nombres y números de identificación.
- Controles básicos del proceso.
- Interconexión con otros sistemas.
- Líneas de recirculación.
- Datos de presión y temperatura de los fluidos que circulan.
- Mezclas de fluidos.

Un diagrama de flujo debe suministrar información suficiente para (Castillo, 1997):

- Estimar, en forma preliminar, el coste del equipo.
- Calcular y comprobar los rendimientos.
- Seleccionar el sistema de control más efectivo.
- Fijar necesidades de servicios auxiliares.
- Estimar necesidades de mantenimiento.
- Establecer áreas de peligrosidad que permitan diseñar el sistema de seguridad.
- Justificar la operatividad de la instalación y el número y calificación del personal necesario.

Un DFP es la fuente principal de información para las demás especialidades involucradas en el proyecto. Un buen diagrama de flujo debe ser lo más exacto posible, para eliminar errores de diseño y retrasos en el cronograma.

La principal finalidad de los diagramas de flujo es proporcionar la información necesaria para desarrollar un diagrama de tubería e instrumentación (DTI).

#### **5.5.4 Diagrama de tubería e instrumentación**

El diagrama de tuberías e instrumentos es el producto final de la ingeniería de proceso y proporciona el máximo de información sobre el mismo.

En este diagrama aparecen todos los equipos, las tuberías de conexión, todas las válvulas e instrumentos de control y todos los puntos de conexión con los servicios auxiliares.

Las tuberías aparecen identificadas indicando el material y el espesor de aislamiento, las condiciones de diseño y operación.

En general para no recargar los planos de información escrita, se suelen identificar líneas y equipos, válvulas e instrumentos con una codificación, prácticamente normalizada y bastante intuitiva, que permite relacionarlos con su respectiva especificación. Una lista de líneas, que suele anexar al plano da toda la información necesaria para cada línea identificada.

Los diagramas de tuberías e instrumentos se suelen hacer separadamente para las distintas unidades fundamentales que engloba el proceso, a fin de utilizar documentos más manejables.

Las áreas se pueden separar de la siguiente manera (Castillo, 1997):

- Almacenamiento de materias primas.
- Preparación.
- Reacción.
- Separación.

- Purificación.
- Almacenamiento de productos.
- Servicios auxiliares.

### **5.5.5 Plano de localización general**

Los planos de planta son dibujos a escala que muestran la relación entre equipo, espacios y características físicas vistos desde arriba. Ofrecen una forma de visualizar el acomodo de equipo por el espacio. Los planos de planta facilitan verificar si el espacio es apropiado para su finalidad prevista, analizar cualquier problema potencial y rediseñar antes de avanzar hacia etapas de planificación y construcción más elaboradas.

### **5.5.6 Hoja de especificaciones**

Las hojas de especificaciones estándares se utilizan normalmente para transmitir la información requerida para el diseño detallado, o la compra de los distintos equipos; tales como intercambiadores de calor, bombas, columnas, reactores a presión, etcétera.

Así como garantizan que la información se presente de forma clara y de modo inequívoco, las hojas de especificaciones estándares sirven como lista de comprobación para asegurar que se incluye toda la información necesaria. (Sinnott & Towler, 2012).

## **6 PLANTA DE PURIFICACIÓN DE REGENERADO DE MMA: DOCUMENTOS ENTREGABLES DE LA INGENIERÍA BÁSICA DE PROCESO**

En este capítulo se presentan los documentos entregables en una ingeniería básica de proceso de acuerdo a FEL II.

En primer lugar, se presentan las bases de diseño de proceso para la planta de purificación RMMA, en las que se aborda la normativa aplicable al proyecto, datos generales del sitio, capacidad de la planta, filosofía de operación, control y arranque y paro de la planta, calidad de reactivos y productos, y una lista de los documentos entregables de la ingeniería básica de proceso.

En segundo lugar, se presenta una descripción detallada del proceso de purificación de RMMA, se mencionan temperaturas y presiones de equipos y corrientes principales.

También se presenta el DFP de la planta, lista de equipos, los balances de materia y energía, así como el DTI de la torre de destilación S-02 y hoja de especificaciones del tanque flash S-01.

Por último, se añade un PLG de la planta.

A continuación, se enlistan algunos datos importantes de ser destacados para la elaboración de la ingeniería básica presentada.

- Todos los equipos se construirán en acero inoxidable, incluyendo el empaque estructural de la torre de destilación S-02.
- El proceso continuo de destilación se lleva a cabo a una presión de vacío, ya que por arriba de los 423 K el MMA tiende a polimerizarse.
- Se tiene que disminuir la acidez de la materia prima para proteger equipo y evitar auto polimerización.

**Planta de Purificación del Monómero de Metilmetacrilato**

1 Bases de diseño  
1.1 Bases de proceso

Clave: ABD-001

Fecha: 20 de enero del 2021

**6.1 Bases de diseño**  
**Bases de proceso**

Creating Engineering			EL CLIENTE				
Elaboró	Revisó	Aprobó	Revisó	Aprobó	Coordinó	Autorizó	Descripción
							LIBRO DE PROYECTO
Archivo electrónico:						Fecha: 20/01/2021	Revisión: APD

### **6.1.1 Objetivo general**

Construir una nueva planta de proceso continuo de purificación de regenerado de metilmetacrilato crudo para reemplazar la planta de proceso batch que actualmente existe.

### **6.1.2 Objetivo específico**

Con la construcción de la nueva planta de proceso continuo se pretende reducir la cantidad actual de metilmetacrilato desperdiciado en los fondos de la torre de destilación del proceso batch existente, además de eliminar las inconsistencias de composición en el producto final deseado.

### **6.1.3 Alcances**

La planta nueva de purificación de metilmetacrilato se va a construir en un terreno que se encuentra vacío y dentro las instalaciones de la planta general, a continuación, se presentan los puntos a cubrir en el alcance del proyecto:

- Todos los equipos a instalar son nuevos y cumplen con las especificaciones que cada uno requiere.
- Se instalará un sistema de control distribuido (SCD) que permitirá el control y la supervisión de una forma centralizada y automatizada.
- Los servicios que se requieren en la planta, tales como agua de enfriamiento, aceite térmico, vacío, son servicios con los cuales ya cuenta la planta general y se garantiza su suministro para el funcionamiento de la nueva planta. Dicho suministro será responsabilidad de otra área por lo que queda fuera del alcance de este proyecto.
- La materia prima esta almacenada en totes, las líneas para conducir la materia prima a la planta quedan fuera de límite de baterías.

## **6.1.4 Normativa**

### **6.1.4.1 Leyes**

Las leyes que aplican son:

- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.
- Ley Federal del Trabajo.

### **6.1.4.2 Reglamentos**

Los reglamentos aplicables son:

- Reglamento Federal de Seguridad e Higiene en el Medio Ambiente de Trabajo.
- Reglamento en Materia de Residuos de la LGPGIR.
- Reglamento para el Transporte de Materiales Peligrosos.
- Reglamento de Ingeniería Sanitaria Relativo a Edificios.

### **6.1.4.3 Normativa**

La normatividad internacional aplicable es la siguiente:

- ISO 9001- Sistema de Gestión de Calidad.
- ISO 14001- Sistema de Gestión Ambiental.
- ISO 45001-Sistema de Gestión de la seguridad y salud en el trabajo.

Las normas nacionales aplicables son:

- NOM-052-SEMARNAT-2005. ESTABLECE LAS CARACTERÍSTICAS, EL PROCEDIMIENTO DE IDENTIFICACIÓN, CLASIFICACIÓN Y LOS LISTADOS DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS.
- NOM-004-SEMARNAT-2002. PROTECCIÓN AMBIENTAL –LODOS Y BIOSÓLIDOS – ESPECIFICACIONES Y LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES

DE CONTAMINANTES PARA SU APROVECHAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL.

- NOM-081- SEMARNAT –1994. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE EMISIÓN DE RUIDO DE LAS FUENTES FIJAS Y SU MÉTODO DE MEDICIÓN.
- NOM-001-STPS-2008. EDIFICIOS, LOCALES, INSTALACIONES Y ÁREAS DE LOS CENTROS DE TRABAJO. CONDICIONES DE SEGURIDAD E HIGIENE.
- NOM-002-STPS-2010. CONDICIONES DE SEGURIDAD-PREVENCIÓN Y PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS EN LOS CENTROS DE TRABAJO.
- NOM-005-STPS-1998. RELATIVA A LAS CONDICIONES DE SEGURIDAD E HIGIENE EN LOS CENTROS DE TRABAJO PARA EL MANEJO, TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DE SUSTANCIAS QUÍMICAS PELIGROSAS.
- NOM-006-STPS-2014. MANEJO Y ALMACENAMIENTO DE MATERIALES- CONDICIONES Y PROCEDIMIENTOS DE SEGURIDAD.
- NOM-010-STPS-2014. "AGENTES QUÍMICOS CONTAMINANTES DEL AMBIENTE LABORAL- RECONOCIMIENTO, EVALUACIÓN Y CONTROL".
- NOM-011-STPS-2001. CONDICIONES DE SEGURIDAD E HIGIENE EN LOS CENTROS DE TRABAJO DONDE SE GENERE RUIDO.
- NOM-017-STPS-2008. EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL- SELECCIÓN, USO Y MANEJO EN LOS CENTROS DE TRABAJO.
- NOM-018-STPS-2015. SISTEMA ARMONIZADO PARA LA IDENTIFICACIÓN Y COMUNICACIÓN DE PELIGROS Y RIESGOS POR SUSTANCIAS QUÍMICAS PELIGROSAS EN LOS CENTROS DE TRABAJO.
- NOM-020-STPS-2011. "RECIPIENTES SUJETOS A PRESIÓN, RECIPIENTES CRIOGÉNICOS Y GENERADORES DE VAPOR O CALDERAS - FUNCIONAMIENTO - CONDICIONES DE SEGURIDAD."

- NOM-024-STPS-2001. VIBRACIONES-CONDICIONES DE SEGURIDAD E HIGIENE EN LOS CENTROS DE TRABAJO.
- NOM-025-STPS-2008.CONDICIONES DE ILUMINACIÓN EN LOS CENTROS DE TRABAJO.
- NOM-026-STPS-2008. COLORES Y SEÑALES DE SEGURIDAD E HIGIENE, E IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS POR FLUIDOS CONDUCTIDOS EN TUBERÍAS
- NOM-008-SCFI-2002 SISTEMA GENERAL DE UNIDADES DE MEDIDA.
- NOM-001-SEDE-2012 INSTALACIONES ELÉCTRICAS (UTILIZACIÓN).
- NOM-002-SCT-2011. LISTADO DE LAS SUBSTANCIAS Y MATERIALES PELIGROSOS MÁS USUALMENTE TRANSPORTADOS
- NOM-002-STPS-2010. CONDICIONES DE SEGURIDAD-PREVENCIÓN Y PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS EN LOS CENTROS DE TRABAJO.
- NOM-004-STPS-1999. SISTEMAS DE PROTECCIÓN Y DISPOSITIVOS DE SEGURIDAD EN LA MAQUINARIA Y EQUIPO QUE SE UTILICE EN LOS CENTROS DE TRABAJO.
- NOM-013-SCFI-2004. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN - MANÓMETROS CON ELEMENTO ELÁSTICO-ESPECIFICACIONES.
- NOM-016-ENER-2010. EFICIENCIA ENERGÉTICA DE MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN, TIPO JAULA DE ARDILLA, DE USO GENERAL, EN POTENCIA NOMINAL DE 0.746A 343 KW. LÍMITES, MÉTODOS DE PRUEBA Y MARCADO.

#### 6.1.4.4 Normativa estatal

- Constitución Política del Estado Libre y Soberano de México
- Ley de Cambio Climático del Estado de México.

#### 6.1.4.5 Reglamentación municipal

Bando Municipal de Ocoyoacac 2019.

#### 6.1.4.6 Códigos de ingeniería

Los datos de ingeniería, diseño y equipo cumplirán con la última edición de los códigos que se encuentran en la **Tabla 6.1**.

**Tabla 6.1** Lista de códigos de ingeniería.

EQUIPOS	NORMA O CÓDIGO APLICABLE
Recipientes	ASME Secc. VIII
Cambiadores de calor	TEMA/ ASME Secc. (I o VIII)
Tanques de almacenamiento	API- 650
Bomba	ANSI B73.1
tubo y accesorio	ANSI/ASME B16.9 ANSI/ASME B 16.11 ANSI/ASME B 16.25 ANSI/ASME B 36.10 ANSI/ASME B 31.3
Válvula	ANSI/ASME B 16.34
Brida	ANSI/ASME B 16.5
Corrosión	NACE MR0103

#### 6.1.5 Desarrollo

##### 6.1.5.1 Datos generales del sitio

El proyecto se desarrolla en un predio del municipio de Ocoyoacac, **Figura 6.1** y **Figura 6.2**, en el Estado de México. Cuenta con una superficie de 400 m<sup>2</sup>. Los datos generales del predio se muestran en la **Tabla 6.2**.

**Planta de Purificación del Monómero de Metilmetacrilato**  
1 Bases de diseño  
1.1 Bases de proceso

Clave: ABD-001

Fecha: 20 de enero del 2021



**Figura 6.1** Ubicación geográfica. (Google Maps, 2020).



**Figura 6.2** Vista satelital de la planta de plásticos dentro de Ocoyoacac. (Google Maps, 2020).

<b>Planta de Purificación del Monómero de Metilmetacrilato</b> 1 Bases de diseño 1.1 Bases de proceso	Clave: ABD-001
	Fecha: 20 de enero del 2021

**Tabla 6.2** Datos generales del sitio.

COORDENADAS GEOGRÁFICAS	
Latitud norte	19°, 27' y 99° 46'
Longitud oriente	99° 18' y 99° 30'
Altura sobre el nivel del mar	2560 m
CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS	
Presión barométrica	1,010 mBar
Promedio anual	751 mBar
Promedio mensual máximo	765 mBar
Promedio mensual mínimo	745 mBar
TEMPERATURA	
Temperatura promedio anual	24°C
Temperatura absoluta más alta	30°C
Temperatura absoluta más baja	-7°C
Promedio más alto por día en el mes más caluroso	27°
Promedio más baja por el día en el mes más frío	10°C
Temperatura de HVAC (cuarto de control)	14°C
Época seca-fría	Enero y febrero
Época seca-cálida	Marzo, abril y mayo
Época seca-fría	Noviembre y diciembre
ATMÓSFERA	
Atmósfera corrosiva	SI
Atmósfera húmeda	NO
Atmósfera marina	NO
Atmósfera salina	NO
VELOCIDAD DE LOS VIENTOS	
Velocidad media	5 a 12 km/h
Velocidad máxima	19 a 28 km/h

**Planta de Purificación del Monómero de Metilmetacrilato**1 Bases de diseño  
1.1 Bases de proceso

Clave: ABD-001

Fecha: 20 de enero del 2021

**Dirección de los vientos**

Vientos reinantes	SSW a NNE
Vientos dominantes	N a E (invierno) S a N (primavera)
Vientos predominantes	S a N
Meses de vientos dominantes	Febrero y marzo

Para el diseño por viento de las instalaciones, se utilizará el capítulo de viento de la edición vigente del Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad.

Para diseño por sismo, la referencia CFE, zona sísmica B (ver tabla 3.1), sismo CFE pág. 40, clasificación de construcción grupo A y según estructura; tipo 5/Q=1.5

**PRECIPITACIÓN PLUVIAL**

Promedio anual	137 mm
Máxima diaria	160 mm
Máxima por hora	5 mm
Máxima anual	209 mm
Meses de mayor precipitación	Julio y agosto

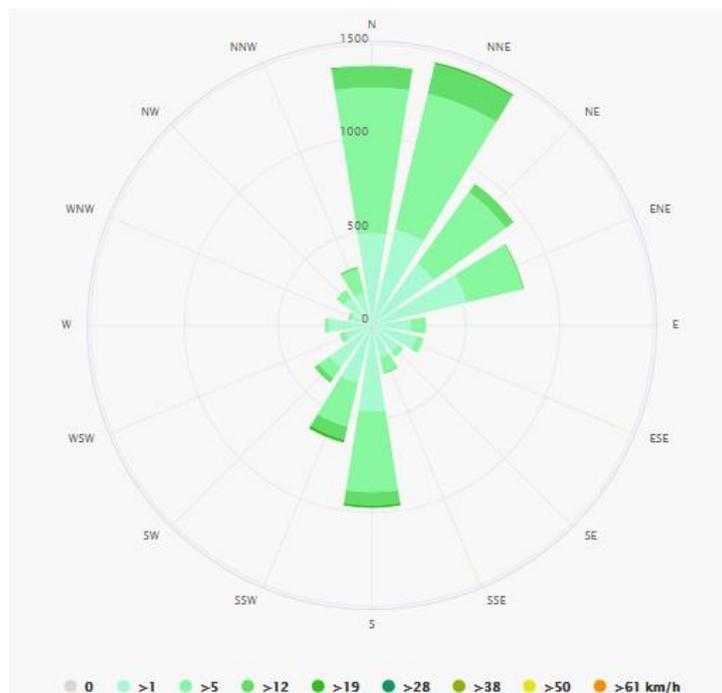
**HUMEDAD**

Humedad relativa promedio en el mes más caluroso	45.5%
Humedad relativa promedio en el mes más frío	41.3%
Extrema máxima	55.0%
Extrema mínima	13.2%

**SISMICIDAD**

Zona sísmica	B. Medio (SEGOB)
--------------	------------------

En la **Figura 6.3**, se muestra la rosa de vientos de la ubicación donde se implementará el proyecto.



**Figura 6.3** Rosa de los vientos municipio de Ocoyoacac.

La Rosa de los Vientos para Ocoyoacac muestra la dirección de los vientos reinantes, el número de horas anuales y la velocidad con la que el viento sopla en la dirección indicada.

### 6.1.5.2 Instalaciones

#### 6.1.5.2.1 Equipos principales

- Tanque buffer de almacenamiento de NaOH: D-01
- Tanque buffer de almacenamiento de RMMA neutralizado: D-02
- Calentador de RMMA neutralizado: E-01
- Tanque separador de metilmetacrilato: S-01

- Torre de destilación empacada: S-02
- Rehervidor de la torre S-02: RH-01
- Condensador de RMMA rectificado: E-02
- Enfriador de RMMA rectificado: E-03
- Enfriador de pesados de la torre S-02: E-04
- Tanque acumulador de RMMA rectificado: D-03
- Tanque buffer de almacenamiento de lodos: D-04
- Tanque buffer de almacenamiento de pesados de la torre S-02: D-05
- Tanque buffer de almacenamiento de RMMA purificado: D-06

#### *6.1.5.2.2 Equipos Auxiliares*

- Equipo de bombeo, NaOH: P-01
- Equipo de bombeo, RMMA neutralizado: P-02
- Equipo de bombeo, RMMA rectificado: P-03
- Equipo de bombeo, pesados de la torre S-02: P-04
- Equipo de bombeo, retiro de lodos de tanque flash S-01: P-05

#### *6.1.5.2.3 Sistemas*

- Sistema contra incendios
- Sistema de drenaje
- Sistema eléctrico
- Sistema de tuberías
- Sistema de control
- Sistema de aire acondicionado
- Sistema de alumbrado

#### 6.1.5.2.4 Fuera de límite de batería (FLB)

- Aceite térmico
- Agua de enfriamiento
- Sistema de vacío

#### 6.1.5.3 Capacidad de planta

En la **Tabla 6.3** se muestra las capacidades de la planta de purificación de monómero de metilmetacrilato (RMMA), a partir del tipo de operación de diseño, normal y mínima.

**Tabla 6.3** Capacidades de la planta.

CAPACIDAD	TPD
Diseño	10
Normal	10
Mínima	6

La base de estos valores es considerada de acuerdo a los niveles actuales y de crecimiento en el mediano plazo de la obtención monómero de metilmetacrilato crudo y de la capacidad instalada del proceso de pirólisis de scrap de polimetilmetacrilato corriente abajo.

El rango de operación se debe modular mediante el sistema de alimentación el cual lo constituyen un sistema de bombas de desplazamiento positivo. Se contempla el uso de bombas de pistón reguladas por un variador de frecuencia, las cuales pueden cubrir desde el paro hasta un flujo máximo de diseño.

#### 6.1.5.4 Filosofía de operación

La filosofía de operación del proceso de purificación del metilmetacrilato regenerado (RMMA) es de acuerdo al diseño propuesto, el cual se lleva a cabo mediante un

proceso continuo con una capacidad máxima de 10 TPD de RMMA purificado. El proceso está dividido en tres etapas: preparación de la mezcla, purificación y almacenamiento del producto y subproductos.

#### *6.1.5.4.1 Características de operación*

En la **Tabla 6.4** se describen las características de operación de la planta:

**Tabla 6.4** Parámetros de operación.

Descripción	Tiempo	Valor
Operación Anual	7680 horas	3404.25 m <sup>3</sup> /a
Tipo de proceso		Continuo desde la alimentación hasta el término del proceso.
Período de paro	45 días anuales tomando en cuenta el mantenimiento correctivo y preventivo.	

El período de paro de los equipos está en función de los procedimientos de mantenimiento y serán definidos por el área de mantenimiento de acuerdo con las especificaciones de los equipos.

#### *6.1.5.4.2 Capacidad de operación y flexibilidad*

La planta contará con una capacidad de operación máxima de 10 TPD y una mínima de 6 TPD de RMMA. A continuación, se muestran las características de operación para estas dos capacidades:

**Tabla 6.5** Características de operación.

Variable	Valor mínimo	Valor normal o máximo
Flujo volumétrico de RMMA (m <sup>3</sup> /d)	6.383	10.647
Estado físico	Líquido	Líquido
Flujo volumétrico de MMA crudo (m <sup>3</sup> /d)	7.045	11.584
Flujo Volumétrico NaOH 10 % (m <sup>3</sup> /d)	0.043	0.072
Flujo Volumétrico de lodos provenientes del S-01 (m <sup>3</sup> /d)	0.479	0.792

#### *6.1.5.4.3 Flexibilidad*

Los equipos están diseñados para tener una flexibilidad del 40% más sobre las condiciones mínimas de operación.

No se consideró ningún equipo de relevo. De haber mantenimiento o fallo en alguno de los equipos la planta se pararía por completo debido a que existen métodos alternativos para llevar a cabo el proceso principal (fabricación de lámina acrílica) de toda la planta.

#### *6.1.5.5 Filosofía de control*

##### *6.1.5.5.1 Grado de automatización*

Se instalará un sistema de control distribuido (SCD) que permitirá el control y la supervisión de una forma centralizada y automatizada. Con accesorios en hardware y software que permitan visualizar, controlar y almacenar los datos del proceso. La

principal característica del sistema será el uso de una red de control universal, misma que utilizará cable de datos como medio de transmisión.

El sistema de control universal deberá ser instalado en el cuarto de control propuesto y consistirá de:

- a) Estación de ingeniería.
- b) Estación de operación o HMI (Human-Machine Interface).
- c) Sistema de comunicación.
- d) Módulo de registro de históricos del proceso.
- e) Módulo de historia con discos redundantes.
- f) Módulo redundante de comunicación.
- g) Módulo de mantenimiento.

Se diseñarán las redes necesarias de comunicación y control general donde se encuentren los controladores redundantes.

Para garantizar la operación de la planta en lo referente a instrumentación y control, ante una falla de energía eléctrica, se alimentará a través de un sistema de alimentación ininterrumpida (UPS, por sus siglas en inglés).

También deberá ser posible la supervisión del UPS desde la estación de operación con las siguientes indicaciones:

- a) Operación normal.
- b) Con respaldo de baterías.
- c) Falla general.

Adicionalmente se deberá incluir en el paquete del sistema, el equipo de prueba necesario para diagnosticar en línea y fuera de línea, así como para realizar mantenimientos correctivos y preventivos.

El equipo de prueba mínimo a considerar con base en las recomendaciones del fabricante es:

- a) Configuradores portátiles para transmisores inteligentes.
- b) Multímetros digitales.
- c) Computadora portátil con el software para el diagnóstico y calibración electrónica de señales de la instrumentación y los transmisores instalados, así como la aplicación específica para el diagnóstico de rendimiento del UPS.
- d) Juego de herramientas para electricista / electrónico especializada.
- e) Equipo de protección personal para trabajos eléctricos con base en los procedimientos de seguridad de la empresa.

El SCD considera la medición y control de todas las variables del proceso y equipo necesarias para mantener el estado óptimo de operación y realizar los cambios requeridos de manera diferencial y ordenada de tal forma que asegure la obtención de los parámetros de calidad del proceso de purificación del RMMA.

Las variables del proceso que contarán con instrumentación y control son las siguientes:

- a) Flujo (en todas las corrientes entrantes, intermedias y salientes).
- b) Presión.
- c) Temperatura.
- d) Nivel.
- e) pH.

El tipo de instrumentación y control empleado para el sistema es:

- a) Sensores indicadores.
- b) Transmisores.
- c) Controladores.
- d) Indicadores controladores.
- e) Registradores controladores.

Todas las bombas se operarán de manera automática y manual, por lo que será necesario la instalación de botoneras con luces indicadoras para dos estados (arranque/verde-paro/rojo) y botonera de manual y remoto desde el panel de control.

Las válvulas de control principal deberán considerarse con bypass que permita el paso del fluido en caso de emergencia y válvulas de bloqueo laterales. Las válvulas de control empleadas como sistema de emergencia deberán considerarse adicionalmente con candado para la válvula “en directo”. Para el caso en donde las válvulas de control reciban señal del sistema de protección, éstas deben llegar igualmente a las válvulas de bloqueo laterales y las válvulas bypass.

El sistema de paros de emergencia y las alarmas críticas de los equipos principales y de los tanques de almacenamiento serán integradas al SCD a través de un controlador lógico programable (PLC, por sus siglas en inglés) donde llegarán todas las señales y éstas se traducirán en el HMI (Human-Machine Interface) para entendimiento del operador y pronta respuesta. El reseteo de las señales de alarma y paro deberá estar protegido por usuario y contraseña, así como la razón del reseteo. Lo anterior para efectos de la auditoría de rastreo del sistema.

Adicionalmente a los paros de emergencia configurados en cada equipo, deberá existir un paro de emergencia general (ESD, Emergency Shutdown System). Este deberá ser manual y encontrarse estratégicamente ubicado dentro del cuarto de control, así como en el área de proceso. De tal forma que permita el paro de los equipos principales y las bombas.

Los lugares propuestos para la colocación de los paros de emergencia son:

- a) Cercanos a la salida del área de proceso.
- b) En la entrada del cuarto de control.
- c) A un costado del panel de control principal.
- d) En cobertizos de las bombas.

Estos paros deberán ser colocadas convenientemente pero adicionalmente deberán ser protegidos de activaciones accidentales, para lo cual contarán con una protección acrílica. Las estaciones deberán encontrarse identificadas por la función de paro y la posición de paro de las válvulas. Las válvulas operadas manualmente deberán ser de operación rápida y no estar restringidas para facilitar la oportuna actuación del sistema de paro. La definición final del sistema de paro deberá ser con base en un estudio de análisis funcional de operabilidad (HAZOP, por sus siglas en inglés) realizado, considerando todos los equipos, bombas y válvulas del sistema propuesto.

La definición de la secuencia de paro por emergencia se indicará de manera descriptiva en el manual de operación del sistema, mismo que deberá contener listado de fallas codificadas, así como su posible solución.

#### *6.1.5.5.2 Filosofía de operación de motores e interlocks*

Se recomienda que, en la medición de niveles en tanques de almacenamiento temporal, así como en la columna de destilación y tanque flash se tenga alarmas por alto y bajo nivel en el SCD e interlock configurado para paro y arranque de bombas (motores) y adicionalmente alarmas de alto y bajo nivel registrado en el PLC de tal forma que puedan ser protegidos.

La flexibilidad de operación y recomendaciones estará limitada por la operación de los equipos y las especificaciones de sus fabricantes.

#### *6.1.5.6 Filosofía de arranque y paro*

##### *6.1.5.6.1 Arranque de planta*

La filosofía de arranque es establecida con los siguientes criterios:

- Se requiere de un protocolo de arranque el cual se debe incluir en el Manual de Operación y Seguridad de la planta.

- Cuando los equipos paquete hayan sido inspeccionados y probados en taller del fabricante antes de ser instalados en su sitio.
- Cuando los equipos dinámicos hayan sido inspeccionados y probados en el taller del fabricante antes de ser instalados en su sitio.
- Cuando se efectúe toda la inspección y pruebas a equipos, instrumentos, tuberías válvulas y accesorios en campo.
- Cuando los equipos instrumentos, tuberías, válvulas y accesorios estén limpios y secos.
- Cuando los instrumentos estén calibrados.
- Cuando se haga el arranque secuencial en cada una de las fases de la planta.
- Cuando la torre de destilación S-02 esté estabilizada siendo esta actividad la premisa para el arranque.

Esta filosofía de arranque deberá ser complementada y detallada en el del Manual de Operación y Seguridad de la planta.

#### *6.1.5.6.2 Paro de planta*

Paro por seguridad, la planta no opera, bajo las siguientes condiciones:

- a) A falla de energía eléctrica. La planta está diseñada de tal forma que en caso de falla de energía eléctrica se tiene la facilidad de efectuar un paro ordenado y seguro.
- b) A falla de aire de instrumentos, la planta se va a condición segura, lo anterior se deberá definir en el análisis de riesgo de operación HAZOP.
- c) A falla total del Sistema de Control Distribuido.
- d) A condición de inflamabilidad (condición a ser revisada durante los análisis de riesgo de operación de HAZOP).
- e) A falla de los siguientes sistemas: agua de enfriamiento, aceite térmico y vacío.

Todas las condiciones deberán confirmarse mediante los sistemas de control y protecciones, los cuales se integrarán en el sistema de protección de la planta que permitirá conducir la operación a una condición de paro seguro.

#### 6.1.5.6.3 Fuente de la tecnología del proceso de la planta

El desarrollo de diseño de planta es una propuesta del área de desarrollo tecnológico de la empresa.

#### 6.1.5.7 Calidad de reactivos y productos

A continuación, se presentan las características de reactivos y productos, así como de otras corrientes principales presentes en el proceso.

##### 6.1.5.7.1 Corriente de RMMA crudo (reactivo)

Las características de la corriente de RMMA crudo proveniente del proceso de pirólisis, se presentan en la **Tabla 6.6**.

**Tabla 6.6** Corriente de RMMA crudo.

CORRIENTE DE RMMA CRUDO			
Flujo (l/h)	Temperatura (K)	Presión (kPa)	Estado físico
473	$T_{amb}$	$P_{amb}$	Líquido

Las condiciones ambientales en la Cd. de Toluca son: Presión = 75 kPa y Temperatura = 293 K.

### 6.1.5.7.2 Corriente de NaOH (reactivo)

La corriente de disolución de NaOH al 10 %W proveniente del tanque de almacenamiento de D-01, se muestra en la **Tabla 6.7**:

**Tabla 6.7** Corriente de NaOH.

CORRIENTE DE NaOH AL 10 %W		
Flujo (l/h)	Temperatura (K)	Presión (kPa)
3	T <sub>amb</sub>	P <sub>amb</sub>

### 6.1.5.7.3 Corriente de RMMA crudo ajustado

La corriente de RMMA crudo ajustado proveniente del mezclador estático ST-01, se muestra en la **Tabla 6.8**:

**Tabla 6.8** Corriente de RMMA crudo ajustado.

CORRIENTE DE RMMA CRUDO AJUSTADO		
Flujo (l/h)	476	
Temperatura (K)	293	
Presión (kPa)	200	
pH	7	
Componente		
	l/h	%W
Propionato de metilo	1.63	0.34
Metilmetacrilato	428.64	90.05
Acrilato de butilo	3.70	0.78
Estireno	16.86	3.54
Otros	22.47	4.72
Agua	2.68	0.56

*6.1.5.7.4 Corriente mezclada y estabilizada para envío a tanque separador de metilmetacrilato S-01*

Las propiedades de las corrientes para envío a tanque de separación flash S-01 se muestran en la **Tabla 6.9**.

**Tabla 6.9** Propiedades de corrientes para envío a tanque de separación.

FLUJOS, PRESIÓN Y TEMPERATURA A TANQUE FLASH S-02			
Corriente (Origen)	Especificación		
	Flujo (l/h)	Presión (kPa)	Temperatura (K)
Tanque Buffer D-02	476	100	293
Calentador E-01	476	200	353
Válvula de expansión VCP-1	476	46.6	353

*6.1.5.7.5 Corriente de RMMA purificado (producto)*

La corriente de RMMA rectificado en el tanque de almacenamiento temporal D-06, proveniente del intercambiador E-03, se muestra en la **Tabla 6.10**:

**Tabla 6.10** Corriente de RMMA purificado.

CORRIENTE RMMA PURIFICADO		
Flujo (l/h)	417	
Temperatura (K)	290 - 295	
Presión (kPa)	100	
Componente		
	l/h	%W
Propionato de metilo	1.53	0.37
Metilmetacrilato	394.89	94.93
Acrilato de butilo	2.11	0.51

**Planta de Purificación del Monómero de Metilmetacrilato**1 Bases de diseño  
1.1 Bases de proceso

Clave: ABD-001

Fecha: 20 de enero del 2021

Estireno	10.19	2.45
Otros	5.68	1.36
Agua	1.59	0.38

**6.1.5.7.6 Corriente de fondos de la torre S-02 (subproducto).**

La corriente de los fondos de la torre en el tanque de almacenamiento temporal de pesados D-05, proveniente de la torre de separación S-02, se muestra en la **Tabla 6.11**:

**Tabla 6.11** Corriente de fondos de la torre S-02.

CORRIENTE FONDOS TORRE		
Flujo (l/h)	26	
Temperatura (K)	333	
Presión (kPa)	46.6	
Componente		
	l/h	%W
Propionato de metilo	0.03	0.10
Metilmetacrilato	10.72	41.22
Acrilato de butilo	1.09	4.19
Estireno	4.13	15.88
Otros	9.65	37.11
Agua	0.39	1.52

*6.1.5.7.7 Corriente de lodos (subproducto)*

La corriente de los lodos proveniente del tanque de separación flash S-01, se muestra en la **Tabla 6.12**:

**Tabla 6.12** Corriente de lodos.

CORRIENTE LODOS		
Flujo (l/h)	33	
Temperatura (K)	363	
Presión (kPa)	46.6	
Componente		
	l/h	%W
Propionato de metilo	0.07	0.21
Metilmetacrilato	22.89	69.35
Acrilato de butilo	0.49	1.49
Estireno	2.50	7.56
Otros	6.76	20.49
Agua	0.30	0.90

### 6.1.5.8 Calidad del proceso de purificación de monómero de metilmetacrilato

Después del proceso de purificación, la calidad esperada se muestra en la **Tabla 6.13**.

**Tabla 6.13** Calidad esperada del proceso.

CONDICIÓN DE PROCESO	
PROCESO CONTINUO	
Rendimiento	
Destilado %	87.61
Fondos torre S-02 %	5.46
Lodos %	6.93

#### 6.1.5.8.1 Calidad requerida del destilado

Las especificaciones esperadas del destilado se observan en la **Tabla 5.13**.

**Tabla 6.14** Composición del destilado.

COMPOSICIÓN DE DESTILADO	
Componente	%W
Propionato de metilo	0.37
Metilmetacrilato	94.93
Acrilato de butilo	0.51
Estireno	2.45
Otros	1.36
Agua	0.382

#### 6.1.5.8.2 Especificación de los valores de los fondos de la torre S-02

Los valores esperados en el fondo de la rectificación (el cual el material puede ser utilizado para otro proceso de valor), se observan en la **Tabla 5.14**.

**Tabla 6.15** Valores esperados por el proceso de Rectificación.

COMPOSICIÓN RECTIFICACIÓN	
Componente	%W
Propionato de metilo	0.10
Metilmetacrilato	41.22
Acrilato de butilo	4.19
Estireno	15.88
Otros	37.11
Agua	1.515

#### 6.1.6 Documentos

Los documentos que se entregarán como resultado del desarrollo de la ingeniería básica son los siguientes:

- ✓ Codificación de los planos.
- ✓ DFP.
- ✓ DTI.
- ✓ PLG
- ✓ Hojas de datos.
- ✓ Memorias de cálculo.
- ✓ Especificaciones de equipo.

Los siguientes documentos estarán alineados con el Procedimiento de Elaboración de Documentos de la empresa, en el cual se especifican su formato.

## **6.2 Descripción del proceso**

### 6.2.1 Objetivo

Se establece la descripción general del proceso de la planta de purificación de monómero de metilmetacrilato tomando como referencia el diagrama de flujo de proceso A-001.

### 6.2.2 Alcance

Se define ordenadamente el proceso de purificación de metilmetacrilato dentro del límite de baterías, especificando condiciones de presión y temperatura en los equipos y en las corrientes de entrada y salida de la planta.

### 6.2.3 Descripción del proceso

La siguiente descripción hace referencia al diagrama de flujo A-001.

El diseño de la planta de purificación de regenerado de metilmetacrilato crudo (RMMA crudo) está diseñada en función de los siguientes requerimientos de producción, **Tabla 6.1**:

**Tabla 6.16** Requerimientos de diseño.

CAPACIDAD	TPD
Diseño	10
Normal	10
Mínima	6

<b>Planta de Purificación del Monómero de Metilmetacrilato</b>  1 Descripción del proceso	Clave: ADP-001
	Fecha: 20 de enero del 2021

La alimentación de RMMA crudo a la planta de purificación tiene las siguientes características:

**Tabla 6.17** Características de la alimentación de RMMA crudo.

CORRIENTE DE RMMA CRUDO		
Flujo (l/h)	473	
Temperatura (K)	293	
Presión (kPa)	100	
pH	3.0-4.0	
Componente		
	l/h	%W
Metilmetacrilato	428.68	90.63
Estireno	16.84	3.56

Ajuste y preparación al tanque flash.

El RMMA Crudo que proveniente del proceso de pirolisis, es alimentado al proceso de purificación, mediante un sistema de bombeo fuera del límite de baterías, hacia un mezclador estático ST-01, en el cual es mezclado con una solución hidróxido de sodio (NaOH) al 10 %W, dicho mezclado se hace con la finalidad de ajustar la corriente de RMMA crudo a un valor de pH=7.0; disminuir la acidez de la mezcla protege al equipo y evita la autopolimerización. La solución de NAOH es suministrada a la planta por medio de pipas y se encuentra almacenada en el tanque de almacenamiento D-01, se suministra por medio de la bomba de desplazamiento positivo P-01 hacia el ST-01. Las condiciones de mezclado son: temperatura ambiente de 293 K y una presión de 200 kPa.

La corriente de RMMA crudo neutralizado es alimentada a un tanque buffer D-02, el cual es un tanque cerrado a condiciones ambientales.

El RMMA crudo neutralizado proveniente del tanque buffer D-02 es trasladado hacia el intercambiador de calor de placas E-01 mediante una bomba de desplazamiento positivo P-02, esto con la finalidad de incrementar su temperatura de 293 K hasta una temperatura de 353 K; para tal efecto se hace uso de un servicio de aceite térmico, como sistema de calentamiento proveniente fuera de límite de batería (OTS), la planta actualmente cuenta con este servicio.

#### Tanque flash

La corriente de proceso (7,8, ver A-101) es presionada a 200 kPa por efecto de la presión positiva generada por la bomba P-02, es una condición requerida para el ingreso a la válvula VPC-1, la corriente que sale de esta válvula ingresa al tanque flash S-01. El tanque flash tiene las condiciones de operación de presión y temperatura de 46.6 kPa y 353 K respectivamente.

En el tanque S-01, el RMMA crudo neutralizado sufre un cambio súbito de presión de 200 kPa a 46.66 kPa derivado de la condición de vacío del tanque; este cambio provoca la separación de una fase ligera que es alimentada a la torre de destilación S-02 a través de la succión provocada por el sistema de vacío. El vacío suministrado es un servicio con el que actualmente ya se cuenta en la planta y se encuentra fuera de límite de baterías.

La fase pesada (corriente 23) del tanque flash S-01 es retirada del equipo mediante un sistema de bombeo y enviada al tanque de almacenamiento temporal de lodos D-04 mediante la bomba P-05.

#### Torre de destilación

La fase ligera (corriente 10) proveniente del tanque flash S-01, se hace pasar, por el efecto del vacío, a través de la columna empacada de destilación S-02, en la cual

se lleva la rectificación de la corriente. El empaque de la columna es de tipo estructural y de acero inoxidable.

La fase ligera proveniente de la torre S-02 (corriente 11), es condensada por el equipo E-02 y depositada en el tanque retenedor D-03, el cual es el último equipo dentro del tren de destilación que se encuentra a vacío. Las condiciones de la corriente 11 son de 46.6 kPa y 333 K.

La fase pesada de la columna de destilación S-02 (corriente 18), es pasada a través de un rehervidor RH-01 a fin de mantener las condiciones de operación de la torre, los pesados del rehervidor son extraídos mediante la bomba P-04, enfriados y enviados al tanque de almacenamiento temporal de pesados D-05.

La destilación que se hace en la torre S-02 es principalmente para quitar el exceso de estireno en el producto final deseado, fase pesada de la torre (corriente 18).

El condensado ligero (corriente 13) es extraído del tanque D-03 mediante la bomba P-03, hacia el tanque de almacenamiento temporal de RMMA purificado D-06, una fracción de este flujo (corriente 14) es alimentado como reflujo hacia la torre de destilación S-02, la operación se lleva a cabo con la bomba P-03 y un sistema de válvulas que permiten seccionar el flujo.

El flujo de RMMA purificado (corriente 15), es enfriado mediante el intercambiador E-03 de 333 K a 293 K, el servicio de agua de enfriamiento es un sistema existente en la planta y fuera de límite de baterías. Posteriormente el RMMA purificado, producto final deseado, es almacenado en el tanque D-06, dicho tanque de almacenamiento está cerrado y en condiciones de presión y temperatura de ambiental.

#### Productos y subproductos

El producto deseado RMMA purificado, se encuentra en el tanque de almacenamiento D-06, dicho tanque tiene un volumen de 12.5 m<sup>3</sup> que es equivalente a más de un día de almacenamiento del producto. Diariamente el

producto será extraído para ser enviado a un tanque, fuera de límite de baterías, donde será mezclado con RMMA virgen y posteriormente enviado directo a producción de lámina acrílica.

Por otro lado, los lodos almacenados en el tanque D-04 (subproducto), son vendidos a una planta cementera, la cual los utiliza como combustible. Los lodos serán descargados en pipas y se enviarán diariamente a dicha planta.

Por último, en el tanque de almacenamiento D-06, contamos con un subproducto rico en estireno, el cual, es extraído diariamente y es usado para producción de opacante en la misma planta productora de lámina acrílica.

principales y corrientes de salida. Adicionalmente se definen los datos del sitio y condiciones de paro, arranque y operación de la planta.

**Planta de Purificación del Monómero de Metilmetacrilato**

Clave: A-101

3 Diagrama de flujo de proceso

Fecha: 20 de enero del 2021

**6.3 Diagrama de flujo de proceso**



## **6.4 Lista de equipos**

### 6.4.1 Objetivo general

Se establece la lista de los equipos principales dentro de la planta.

### 6.4.2 Alcances

Se define el listado de equipos de la planta de purificación del monómero metilmetacrilato que se encuentren dentro del límite de baterías, así como algunas especificaciones de estos.

### 6.4.3 Lista de equipos

**Tabla 6.18** Lista de tanques.

Núm. Ident.	Servicio	Capacidad (m <sup>3</sup> )	Tipo	Diámetro (m)	Longitud (m)	Material	DTI
D-01	Tanque buffer de almacenamiento de NaOH.	0.15	Vertical	0.5	0.75	Acero Inoxidable 316	A-401
D-02	Tanque buffer de almacenamiento de RMMA neutralizado.	12.5	Vertical	2	4	Acero Inoxidable 316	A-402

**Planta de Purificación del Monómero de Metilmetacrilato**

4 Lista de equipos

Clave: ALE-001

Fecha: 20 de enero del 2021

D-03	Tanque acumulador de RMMA rectificado.	0.40	Horizontal	0.6	1.40	Acero Inoxidable 316	A-404
D-04	Tanque buffer de almacenamiento de lodos.	0.83	Vertical	0.9	1.30	Acero Inoxidable 316	A-405
D-05	Tanque buffer de almacenamiento de pesados de la torre S-02.	0.83	Vertical	0.9	1.30	Acero Inoxidable 316	A-406
D-06	Tanque buffer de almacenamiento de RMMA purificado.	12.5	Vertical	2	4	Acero Inoxidable 316	A-407

Tabla 6.19 Lista de bombas.

Núm. Ident.	Servicio	Tipo	Capacidad (l/h)	Presión de succión (kPa)	Presión de descarga (kPa)	Potencia del motor (hp)	Material	DTI
P-01	Equipo de bombeo, NaOH.	Pistón	3	100	200	1	Acero Inoxidable 316	A-401
P-02	Equipo de bombeo, RMMA neutralizado.	Pistón	485.71	100	200	1	Acero Inoxidable 316	A-402
P-03	Equipo de bombeo, RMMA rectificado.	Pistón	443.62	100	200	1	Acero Inoxidable 316	A-404
P-04	Equipo de bombeo, pesados de la torre S-02.	Pistón	26	46.6	200	1	Acero Inoxidable 316	A-404
P-05	Equipo de bombeo, retiro de lodos de tanque flash S-01.	Pistón	33	46.6	200	1	Acero Inoxidable 316	A-403

**Tabla 6.20** Lista de equipos de calentamiento o enfriamiento.

Núm. Ident.	Servicio	Tipo	Núm. placas	Carga térmica (Btu/h)	Área de transferencia (m <sup>2</sup> )	Material	Ancho (m)	Longitud (m)	DTI
E-01	Calentador de RMMA ajustado.	Placas verticales	17	54838.8	2.8	Acero Inoxidable 316	0.40	0.45	A-402
E-02	Condensador de RMMA rectificado.	Placas verticales	10	-6612.36	1.5	Acero Inoxidable 316	0.40	0.40	A-404
E-03	Enfriador de RMMA rectificado.	Placas verticales	10	-293983	1.5	Acero Inoxidable 316	0.40	0.40	A-407
E-04	Enfriador de fondos de la torre.	Placas verticales	10	-45068.9	1.5	Acero Inoxidable 316	0.40	0.40	A-406
RH-01	Rehervidor fondos de la torre.	Rehervidor	25	115831	5.5	Acero Inoxidable 316	0.45	0.50	A-404

**Planta de Purificación del Monómero de Metilmetacrilato**

4 Lista de equipos

Clave: ALE-001

Fecha: 20 de enero del 2021

**Tabla 6.21** Lista de torres.

<b>Núm. Ident.</b>	<b>Servicio</b>	<b>Capacidad (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Diámetro (m)</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Material</b>	<b>DTI</b>
S-01	Tanque separador de metilmetacrilato.	0.97	0.64	3	Acero Inoxidable 316	A-403
S-02	Torre de destilación empacada.	2.69	0.60	7	Acero Inoxidable 316	A-404

## **6.5 Diagrama de tubería e instrumentación**

<b>S-02</b> Torre de destilación empacada D=0.6 m L= 7 m P= 46.6 kPa T=333 K	<b>D-03</b> Tanque acumulador de RMMA rectificado D=0.6 m L= 1.4 m P= 100 kPa T=333 K	<b>RH-01</b> Rehervidor de la torre S-02 Q=115,831 BTU/h A. TRANS.=1.5 m <sup>2</sup>	<b>E-02</b> Condensador de RMMA rectificado Q=6612 BTU/h A. TRANS.=1.5 m <sup>2</sup>	<b>P-03</b> Equipo de bombeo, RMMA rectificado Q= 443.62 l/h P=100 kPa Potencia= 1 hp	<b>P-04</b> Equipo de bombeo, pesados de la torre S-02 Q= 26 l/h P=153.4 kPa Potencia= 1 hp
--	---	--	--	---	---

**LISTA DE EQUIPO**

**CLAVE SERVICIO**

**TORRES/SEPARADORES**

S-02 TORRE DE DESTILACIÓN EMPACADA

**INTERCAMBIADORES**

E-02 CONDENSADOR DE RMMA RECTIFICADO  
RH-01 REHERVADOR DE LA TORRE

**RECIPIENTES**

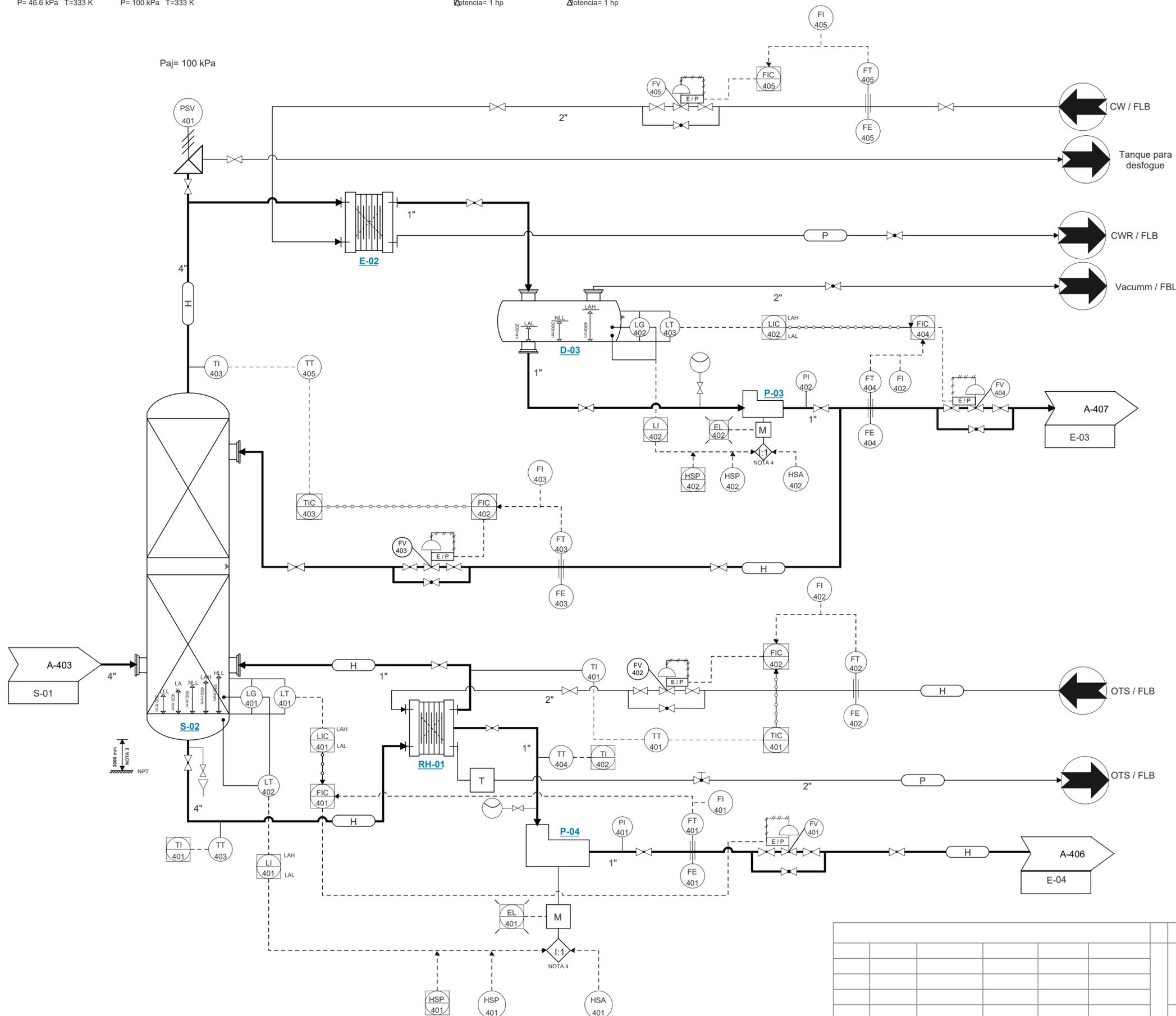
D-03 TANQUE ACUMULADOR DE RMMA RECTIFICADO

**BOMBAS**

P-03 EQUIPO DE BOMBEO, RMMA RECTIFICADO  
P-04 EQUIPO DE BOMBEO, PESADOS DE LA TORRE S-02

**NOTAS:**

- 1.- LA ESPECIFICACIÓN DE LAS BOMBAS SE DEFINIRÁ EN LA INGENIERÍA DE DETALLE, LA TECNOLOGÍA CONTEMPLA EL USO DE BOMBAS DE PISTÓN.
- 2.- NO SE USAN BOMBAS DE RESPALDO DERIVADO DEL TAMAÑO DE LA PLANTA, SU PARO NO AFECTA LOS PROCESOS A LÍMITE DE BATERÍA.
- 3.- ALTURA ESTIMADA, LA DEFINITIVA SERÁ DETERMINADA DURANTE EL DESARROLLO DE IPC.
- 4.- EL OPERADOR LÓGICO I:1 INDICA QUE LAS SEÑALES DE PARO TIENEN PREDOMINIO SOBRE EL ARRANQUE.
- 5.- SERVICIOS  
OTS SISTEMA DE ACEITE TÉRMICO  
CW /FLB AGUA DE ENFRÍAMIENTO FUERA DE LÍMITE DE BATERÍA  
CWR /FLB



						<b>PLANTA DE PURIFICACIÓN DE MONÓMERO DE METILMETACRILATO REGENERADO (RMMA) DIAGRAMA DE TUBERÍA E INSTRUMENTACIÓN</b>		
REV.	ELABORÓ	REVISÓ	DIBUJÓ	VERIFICÓ	PROYECTO	ESC MM: S/E	DIBUJO No: A-404	REV. APD

**Planta de Purificación del Monómero de Metilmetacrilato**

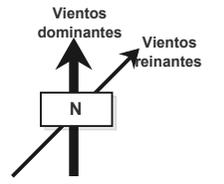
6 Plano de localización general

Clave: E-001

Fecha: 20 de enero del 2021

**6.6 Plano de localización general**

28.5 m



LISTA DE EQUIPO

CLAVE SERVICIO

TORRES/SEPARADORES

- S-01 TANQUE SEPARADOR FLASH DE RMMA CRUDO
- S-02 TORRE DE RECTIFICACIÓN DE RMMA

INTERCAMBIADORES

- E-01 CALENTADOR DE RMMA CRUDO
- E-02 CONDENSADOR DE RMMA RECTIFICADO
- E-03 ENFRIADOR DE RMMA RECTIFICADO
- E-04 ENFRIADOR DE FONDOS DE TORRE DE RECTIFICACIÓN
- RH-01 REHERVIDOR FONDOS DE TORRE DE RECTIFICACIÓN

RECIPIENTES

- D-01 TANQUE DE DISOLUCIÓN NAOH 10 %V CONCENTRACIÓN
- D-02 TANQUE INTERMEDIO DE RMMA CRUDO AJUSTADO
- D-03 TANQUE DE CONDESANDO DE TORRE RECTIFICACIÓN
- D-04 TANQUE DE RECIBO DE LODOS DE TANQUE FLASH
- D-05 TANQUE DE RECIBO DE FONDO TORRE DE RECTIFICACIÓN
- D-06 TANQUE DE RECIBO/TRANSFERENCIA DE RMMA RECTIFICADO

BOMBAS

- P-01 BOMBA DE ALIMENTACION DE DISOLUCIÓN DE NAOH
- P-02 BOMBA DE ALIMENTACIÓN DE RMMA CRUDO AJUSTADO A TANQUE FLASH
- P-03 BOMBA DE REFLUJO A TORRE DE RECTIFICACIÓN
- P-04 BOMBA DE DRENADO DE FONDOS DE TORRE DE RECTIFICACION
- P-05 BOMBA DE DRENADO DE LODOS DE TANQUE FLASH

MEZCLADOR EN LINEA

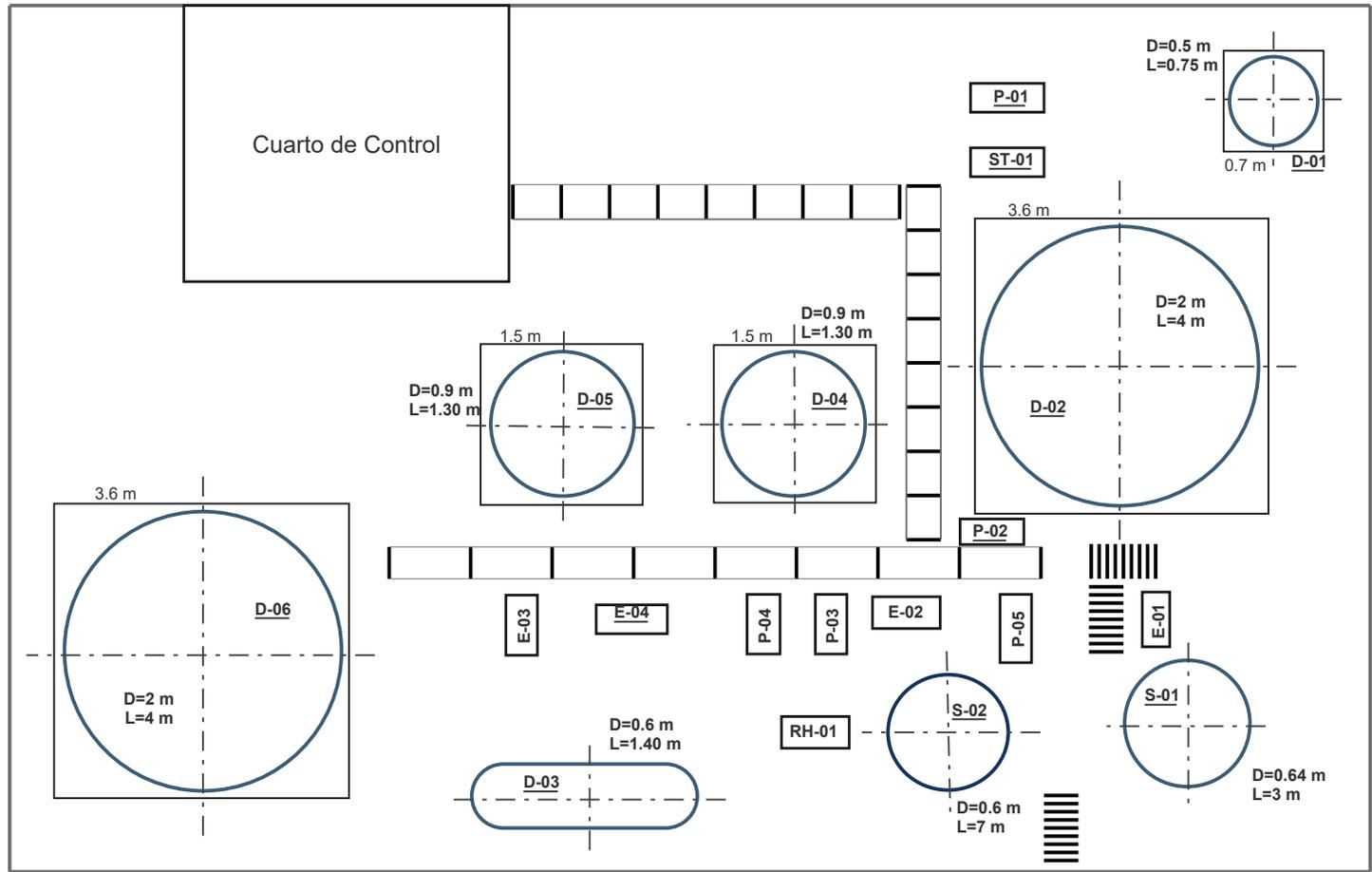
- ST-01 MEZCLADOR ESTÁTICO EN LINEA

14 m

CALLE

CALLE

CALLE



PLANTA DE PURIFICACIÓN DE MONÓMERO DE METILMETACRILATO REGENERADO (RMMA)  
PLANO DE LOCALIZACIÓN GENERAL

REV.	ELABORÓ	REVISÓ	DIBUJÓ	VERIFICÓ	PROYECTO

ESC MM: S/E

DIBUJO No: E-001

REV. APD

## 6.7 Hoja de datos



## 7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para la realización de los documentos entregados fue necesaria la realización de una simulación hecha con el software CHEMCAD versión 7.1.2. (anexo A), así como una pequeña planta piloto de purificación de MMA.

A partir del balance de materia se obtuvieron resultados relevantes que indican la viabilidad del proyecto, estos son el rendimiento del proceso continuo y factores que influyen en la calidad de la lámina acrílica (porcentaje de MMA y de estireno en el destilado).

En la **Tabla 7.1** se presenta una comparación de porcentajes de rendimiento en un proceso batch y en un proceso continuo. Se tiene que en un proceso batch es de aproximadamente el 84 %, mientras que en un proceso continuo 87.6 %.

**Tabla 7.1** Porcentaje de rendimiento en un proceso batch y uno continuo.

Porcentaje de rendimiento	Proceso continuo	Proceso batch
Destilado	87.61	84
Fondos de torre de rectificación	5.46	0
Lodos	6.93	16

A continuación, en la **Tabla 7.2**, se presenta la composición del destilado y lodos. Se observa claramente que, en un proceso continuo de purificación, la composición de MMA en el destilado es mayor y la cantidad de estireno menor con respecto a un proceso batch. La cantidad de estireno repercute directamente en la calidad de la lámina acrílica, a mayor cantidad, menor calidad.

**Tabla 7.2** Porcentajes de composiciones de destilado y lodos por destilación batch y continua.

Porcentaje de la composición [%W]	Proceso continuo	Proceso batch
<b>Composición del destilado</b>		
Propionato de metilo	0.37	0.56
Metilmetacrilato	94.93	93.11
Acrilato de butilo	0.51	0.30
Estireno	2.45	4.66
<b>Composición de los lodos</b>		
Propionato de metilo	0.21	-
Metilmetacrilato	69.35	62.92
Acrilato de butilo	1.50	3.15
Estireno	7.56	20.06

Al término de la ingeniería básica de proceso se modificaron un poco los costos presentados al inicio de este trabajo (**Tabla 4.2**), quedando de la siguiente manera:

**Tabla 7.3** Costos clase IV.

<b>Vida útil años</b>	20
<b>Inversión=</b>	\$ 965,396.25
<b>Tasa de descuento</b>	12.00 %

**Tabla 7.4** Indicadores de rentabilidad después de la ingeniería básica de proceso.

<b>TIR</b>	36 %
<b>VPN</b>	\$ 1,128,518.94
<b>TIRM</b>	11 %
<b>PRI</b>	Aprox. 2.74 años

La modificación de los indicadores de rentabilidad y el monto de la inversión se deben a que, en cada nueva etapa, en este caso la ingeniería básica de proceso,

se van conociendo nuevas especificaciones de los equipos y más detalle de la instalación del mismo.

A continuación, se enlistan algunos resultados importantes obtenidos a partir de la ingeniería básica:

- Dimensiones de equipos.
- Arreglo final de equipos y tubería.
- Diámetro de tuberías.
- Longitud estimada de tuberías de acuerdo a arreglo general.
- Consumo estimado de servicios.
- Número estimado de señales de entrada y salida del cuarto de control.

## 8 CONCLUSIONES

La elaboración de la ingeniería básica de proceso es indispensable para desarrollar el proyecto de la nueva planta de purificación de metilmetacrilato crudo, en este trabajo, se presentan los documentos entregables para esta etapa.

Al término de esta etapa surge una modificación de costos, pasando de clase V a clase IV, como se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 8.1** Modificación de costos.

Indicador	Clase V	Clase IV
<b>Vida útil años</b>	20	20
<b>Inversión=</b>	\$ 792,367.54	\$ 965,396.25
<b>Tasa de descuento</b>	12.00 %	12.00 %

La construcción de la nueva planta para el proceso de purificación de MMA, a partir de una destilación continua, tiene las siguientes ventajas respecto al proceso de destilación batch existente:

- Mayor porcentaje de recuperación de MMA
- Poca inconsistencia en las composiciones tanto en la parte ligera como en los fondos de la torre de destilación.
- Mayor pureza de MMA en el destilado.
- Menor cantidad de estireno en el destilado.
- Menor cantidad de lodos.
- Menor cantidad de MMA desperdiciado.
- Menor consumo de energía del proceso.
- Mayor utilidad.

Este proyecto contribuye a tener una utilidad doce veces mayor que la que se tiene con la planta actual (destilación batch).

Con el proceso actual de purificación de MMA se reducen los costos de la materia prima para la fabricación de lámina acrílica aproximadamente 12 %, sin embargo, con la nueva planta, podríamos llegar a tener una reducción de costos de hasta un 40 %, esto es porque el MMA purificado podría alcanzar purezas de hasta el 98 %, lo cual permitiría que, en la fabricación de la lámina acrílica, se necesite menor cantidad de MMA virgen, sin sacrificar la calidad del producto.

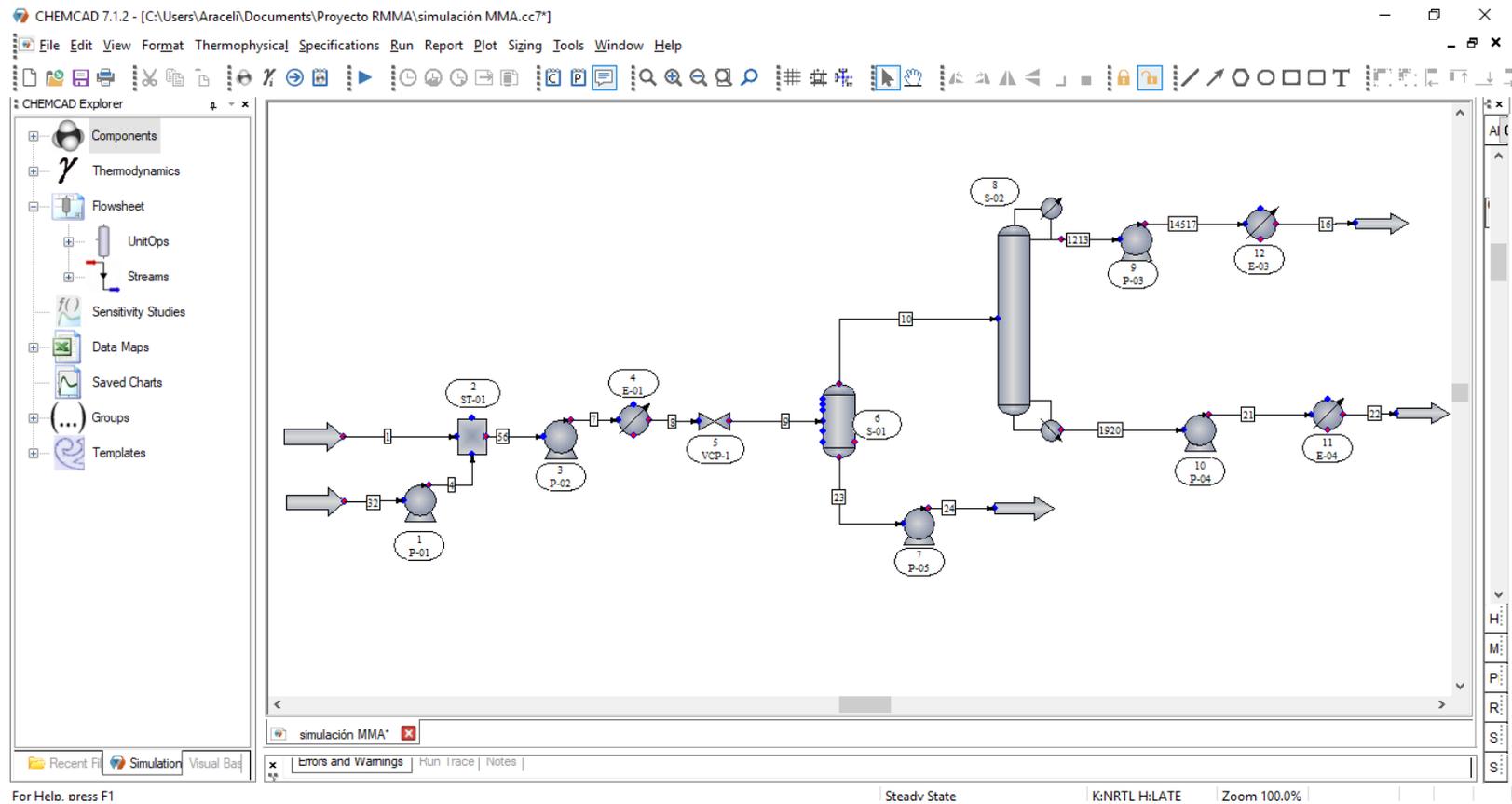
Los subproductos no son desechados; los lodos de la torre S-01 son vendidos como combustible a una cementera y los fondos de la torre de rectificación S-02 son utilizados por la empresa en otra parte de todo el proceso. El reciclaje de acrílico además del reciclaje de los subproductos, contribuye a que este proyecto de purificación de MMA sea favorable con el medio ambiente.

Actualmente existe una gran demanda de producción de láminas de acrílico, esto debido a que se está utilizando para la fabricación de caretas, cubículos o barreras de protección como medida de seguridad sanitaria para el nuevo coronavirus SARS-CoV-2 que está provocando la enfermedad COVID-19, responsable de la pandemia actual. Este proyecto contribuirá favorablemente a la producción de láminas de acrílico disminuyendo la demanda de la materia prima, sustituyendo el acrílico virgen por el acrílico reciclado.

Por último, cabe mencionar que en China y en la India se encuentran los grandes recicladores de MMA por el proceso de pirolisis, sin embargo, en México la única empresa que está llevando a cabo este proceso de purificación es la responsable de este proyecto.

## ANEXO A

A continuación, se presentan una serie de imágenes de la simulación de la planta de purificación de regenerado de MMA crudo. Dicha simulación se realizó en el programa CHEMCAD versión 7.1.2.



**Figura 9.0.1** DFP de la planta de purificación de MMA. (Simulación CHEMCAD 7.1.2).

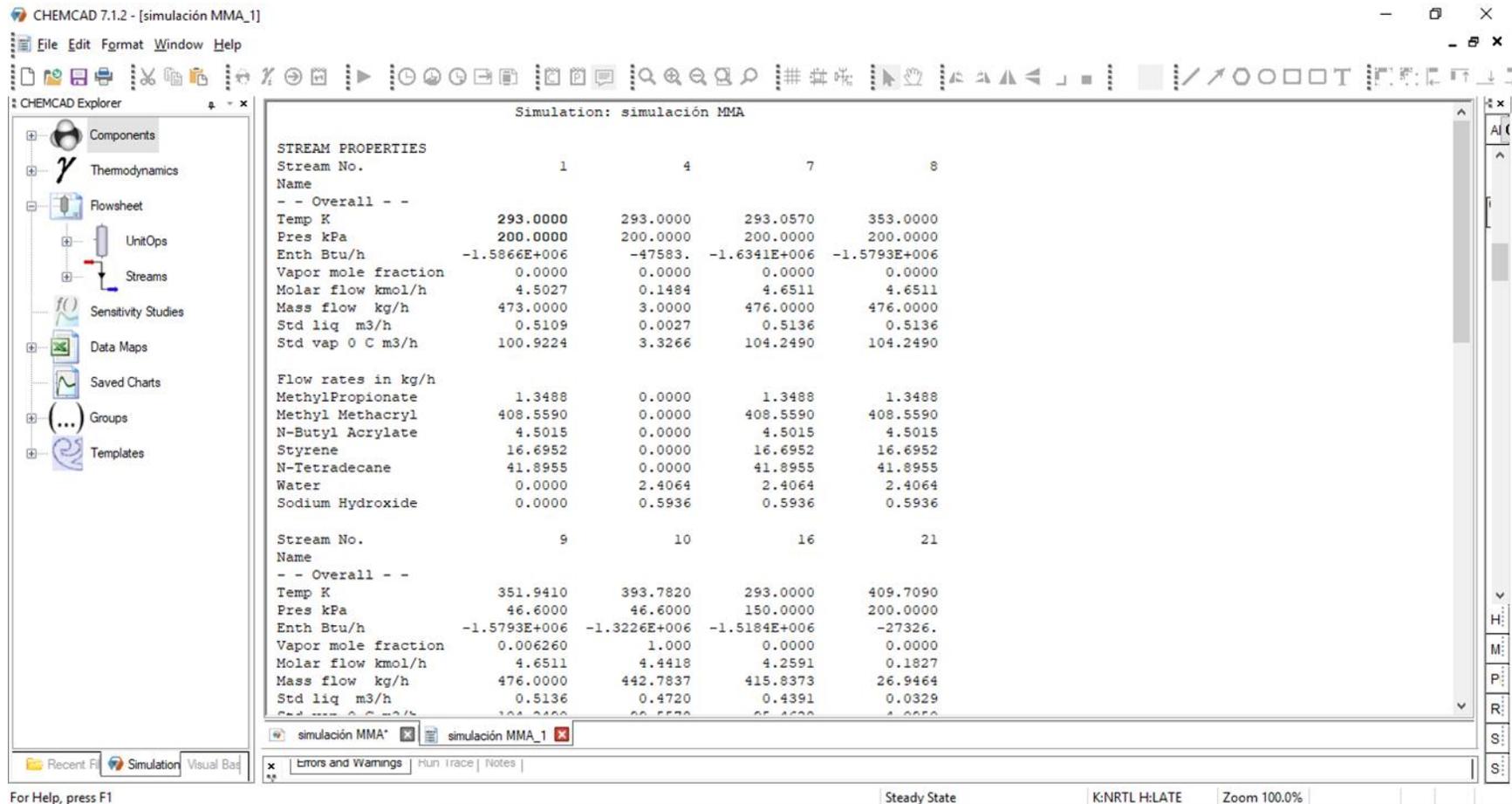
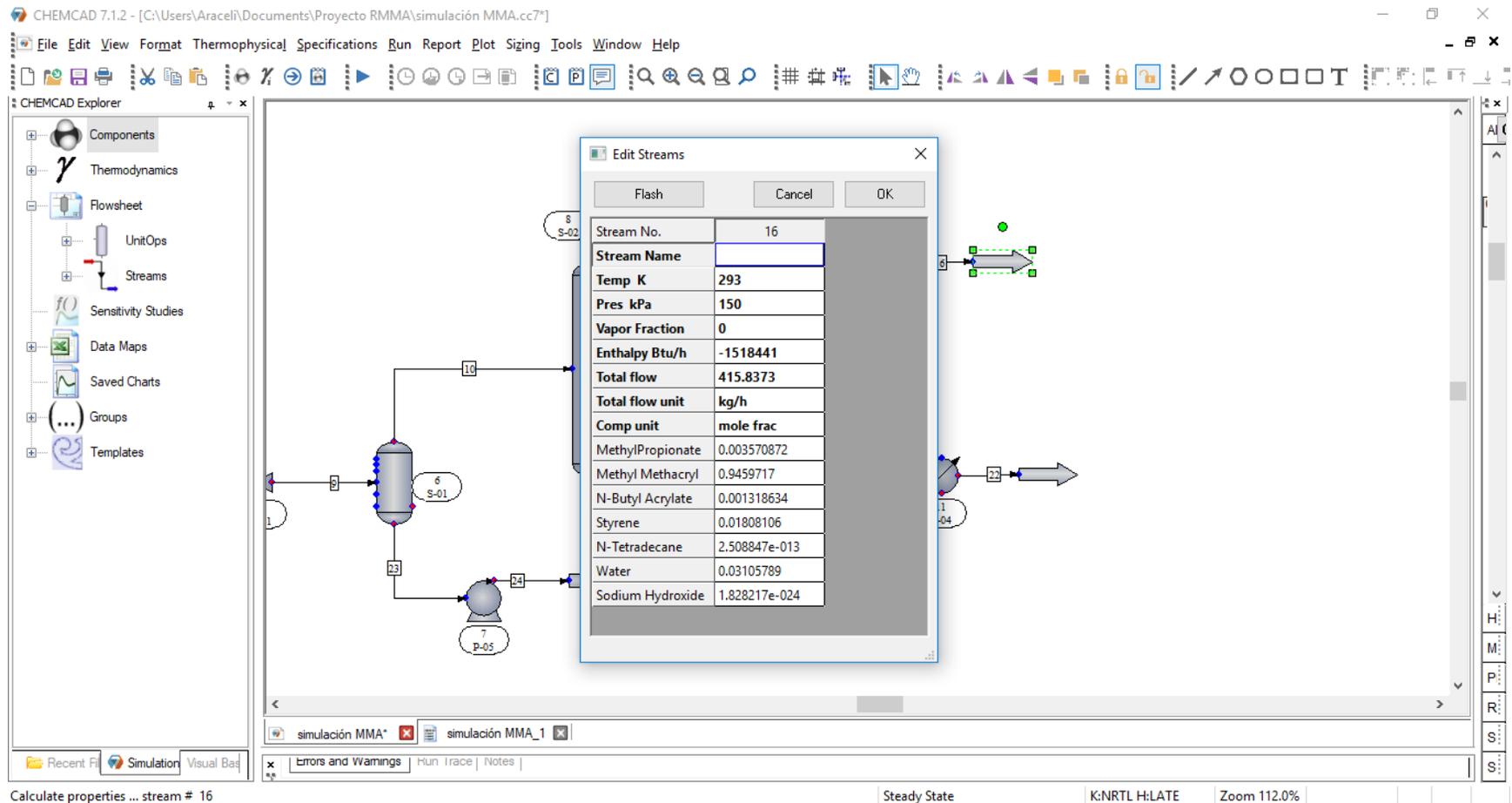


Figura 9.0.2 Balance de materia y energía en cada corriente. (Simulación CHEMCAD 7.1.2).



**Figura 9.0.3** Condiciones de salida del destilado de MMA. (Simulación CHEMCAD 7.1.2).

CHEMCAD 7.1.2 - [C:\Users\Araceli\Documents\Proyecto RMMA\simulaci3n MMA.cc7\*]

File Edit View Format Thermophysical Specifications Run Report Plot Sizing Tools Window Help

CHEMCAD Explorer

- Components
- Thermodynamics
- Flowsheet
  - UnitOps
  - Streams
- Sensitivity Studies
- Data Maps
- Saved Charts
- Groups
- Templates

**- Pump (PUMP) -**

Specifications | Cost Estimation

ID: 7

Pump operating mode:  On  Off

Mode: Specify outlet pressure

Outlet pressure: 200 kPa

Efficiency: 1

Performance curve calc option: Fixed flowrate, calc Pout

Calculate NPSHa (assumes detailed piping is specified in the flowsheet)

**Calculated results:**

NPSH(available)		ft
Calculated power	0.00262494	hp
Calculated Pout	200	kPa
Head	70.925	ft
Vol. flow rate	0.0459053	m3/h
Mass Rate	33.2164	kg/h

Buttons: Help, Cancel, OK

simulaci3n MMA\* | simulaci3n MMA\_1

Recent Files | Simulation | Visual Base

Errors and Warnings | Run Trace | Notes

PUMP.my

Steady State | K:NRTL H:LATE | Zoom 100.0%

**Figura 9.0.4** Datos de la bomba P-04 del proceso. (Simulaci3n CHEMCAD 7.1.2).

## REFERENCIAS

- Alonso, C. F. (2006). *"Definición inicial del proyecto (FEL), una mejor práctica para incrementar el desempeño en los proyectos"*. México.
- Araceli, G. (s.f.). CHEMCAD 7.1.2.
- Castillo, M. d. (1995). *Teoría General del proyecto-Dirección de proyectos/Project management*. España: Editorial Síntesis, S.A.
- Castillo, M. d. (1997). *Teoría General del Proyecto-Volumen II: Ingeniería de Proyectos/Priject Engineering*. España: Editorial Síntesis, S.A.
- CII. (02 de Abril de 2019). Obtenido de CII: <https://www.construction-institute.org/resources/knowledgebase/about-the-knowledge-base/glossary/best-practices>
- CII. (02 de Abril de 2019). Obtenido de CII: <https://www.construction-institute.org/>
- Cornejo, P., Alcolea, J., & Trelles, M. (2011). Perspectivas en el uso de materiales derelleno inyectables para tejidos blandos, desde nuestra experiencia. 1ra Parte. *Cirugía Plástica Ibero-Latinoamerica*.
- Google Maps. (2020). Obtenido de Google Maps.
- Ludwig, E. E. (1999). *Applied Process Design For Chemical And Petrochemical Plants* (Vol. I). Houston, Texas: GPP.
- Marcos, A. G., Elías, F. A., & Meré, J. O. (2014). *Ingeniería de proyectos*. España: Dextra Editorial S.L.
- Ospina, M. A. (2014). *Implantes personalizados de Polimetilmetacrilato (PMMA) para aplicaciones en Craneoplastia*. Bogotá, Colombia.
- PEMEX. (1999). *Simbología de Equipo de Proceso P.2.0401.01*. México.

PEMEX. (2000). *Estructuración de Planos y Documentos Técnicos de Ingeniería*  
P.1.000.06. México.

Sinnott, R., & Towler, G. (2012). *Diseño en Ingeniería Química*. Barcelona: Reverté  
S.A.

Wankat, P. C. (2008). *Ingeniería de procesos de separación* . México: Pearson  
Educación.