



# PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN

---

## ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD DEL DESARROLLO LOCAL DE INSUMOS PARA REVESTIMIENTO EXTERNO TRICAPA DE TUBOS DE ACERO UTILIZANDO TÉCNICAS DE INGENIERÍA INVERSA

---

Carrera Ingeniería Industrial

Alumna: Pérez Pellisa, Martina

Tutora: Ing. Nancy Alves

AÑO 2025

# 1. ÍNDICE

1.	ÍNDICE .....	2
1.1	Glosario .....	4
1.2	Índice de Figuras .....	4
1.3	Índice de Tablas .....	5
2.	INTRODUCCIÓN .....	6
2.1	Objetivo .....	6
2.2	Resumen Gráfico .....	7
2.3	Revestimientos de Tubos de Acero .....	8
2.3.1	Evolución de los Revestimientos Externos .....	8
2.3.2	Poliolefinas de Tres Capas .....	10
3.	METODOLOGÍA INGENIERÍA INVERSA .....	12
3.1	Estudio del Producto .....	13
3.1.1	Primera Capa: Imprimador Epoxi .....	13
3.1.1.1	Composición y propiedades del Epoxi .....	13
3.1.2	Segunda Capa: Adhesivo .....	15
3.1.2.1	Composición y propiedades del Adhesivo .....	15
3.1.3	Tercera Capa: Polietileno o Polipropileno .....	15
3.1.3.1	Polietileno .....	16
3.1.3.2	Polipropileno .....	17
3.1.3.3	Diferencia entre Polietileno y Polipropileno .....	17
3.1.3.4	Composición y propiedades del Polietileno .....	18
3.1.4	Proceso de Aplicación .....	20
3.2	Análisis de Factibilidad Legal .....	21
3.2.1	Norma NAG .....	22
3.2.2	Norma Canadiense CSA .....	23
3.2.3	Consideraciones .....	24
3.3	Estudio de Mercado .....	24
3.3.1	Análisis PESTEL .....	25
3.3.2	Las 5 Fuerzas de Porter .....	27

3.3.3	Análisis de Volúmenes .....	29
3.3.3.1	Volúmenes de Importaciones. ....	29
3.3.3.2	Volúmenes de Consumo Real. ....	31
3.3.3.3	Tubos de Acero Revestidos.....	32
3.3.3.4	Pronóstico de la Demanda de los Componentes. ....	33
3.4	Análisis de Factibilidad Técnica .....	37
3.4.1	Diagramas de Flujo de los Componentes.....	37
3.4.1.1	Diagrama de Flujo del Epoxi.....	37
3.4.1.2	Diagrama de Flujo del Polietileno. ....	40
3.4.2	Matriz de Leopold.....	42
4.	METODOLOGÍA DE COSTEO POR PROCESO .....	46
4.1	Materiales Directos.....	48
4.1.1	Balance de Masa del Epoxi .....	49
4.1.2	Balance de Masa del Polietileno.....	54
4.2	Mano de Obra Directa .....	58
4.3	Costos Indirectos de Fabricación.....	59
4.5	Análisis Comparativo .....	60
5.	CONCLUSIONES.....	62
5.1	Planes Alternativos.....	62
6.	REFERENCIAS Y ANEXOS.....	64

## 1.1 Glosario

3LPE	<i>Three Layer Polyethylene</i> - Sistema tricapa polietileno
3LPP	<i>Three Layer Polypropylene</i> - Sistema tricapa polipropileno
FBE	<i>Fusion Bonded Epoxy</i> - Epoxi aplicado por fusión
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de alta densidad
PEBD	Polietileno de baja densidad
PEMD	Polietileno de media densidad
PP	Polipropileno
UV	Ultravioleta

## 1.2 Índice de Figuras

Figura 1. Desarrollos de revestimientos en los últimos 40 años .....	9
Figura 2. Revestimiento externo tricapa 3LPE/3LPP .....	11
Figura 3. Proceso de ingeniería inversa .....	12
Figura 4. Aplicación de epoxi en una empresa estadounidense .....	14
Figura 5. Estructura del prepolímero epoxi tipo bisfenol A no modificado.....	14
Figura 6. Estructura molecular del polietileno.....	19
Figura 7. Proceso de aplicación de revestimiento externo tricapa .....	20
Figura 8. PESTEL, análisis de macroentorno.....	26
Figura 9. Las 5 Fuerzas de Porter.....	28
Figura 10. Volumen de importaciones de cada componente en el período 2022-2024.....	29
Figura 11. Importaciones de la empresa frente a las demás en el período 2022-2024.....	30
Figura 12. Países de origen de los componentes.....	31
Figura 13. Evolución de relación lineal por categoría .....	35
Figura 14. Producción y estimación de tubos de acero revestidos .....	36
Figura 15. Materias primas empleadas en la elaboración de resina epoxídicas .....	38
Figura 16. Diagrama de componentes para la obtención de epoxi .....	38
Figura 17. Diagrama de flujo del proceso de fabricación de FBE .....	39
Figura 18. Diagrama de flujo de un proceso de PEAD con reactor de agitación continua ...	42
Figura 19. Diagrama de flujo del proceso de FBE con volúmenes parciales estimados .....	50
Figura 20. Diagrama de flujo del proceso de FBE con volúmenes estimados .....	53
Figura 21. Diagrama de flujo del proceso del PEAD con volúmenes parciales estimados...	55

## 1.3 Índice de Tablas

Tabla 1. Tipos de revestimiento externo.....	10
Tabla 2. Componentes de la tercera capa.....	18
Tabla 3. Espesores mínimos del sistema aplicado.....	23
Tabla 4. Espesores mínimos del revestimiento .....	24
Tabla 5. Posiciones arancelarias de los componentes para revestimiento tricapa .....	29
Tabla 6. Consumo de componentes para revestimiento tricapa en Tenaris .....	32
Tabla 7. Superficie total anual revestida en Tenaris.....	32
Tabla 8. Coeficientes de relación lineal.....	34
Tabla 9. Cantidades necesarias estimadas por componente .....	36
Tabla 10. Factores ambientales para la Matriz de Leopold .....	43
Tabla 11. Acciones asociadas a cada etapa productiva .....	43
Tabla 12. Valorización.....	44
Tabla 13. Matriz de Leopold.....	45
Tabla 14. Costos asociados a cada etapa productiva del epoxi .....	47
Tabla 15. Costos asociados a cada etapa productiva del PEAD .....	48
Tabla 16. Costos de materias primas para FBE .....	53
Tabla 17. Costos de materias primas para PEAD .....	57
Tabla 18. Salarios del personal.....	58
Tabla 19. Depreciaciones .....	59
Tabla 20. Comparación de costos.....	61

## 2. INTRODUCCIÓN

### 2.1 Objetivo

Este proyecto de graduación surgió a partir de la necesidad de una empresa metalúrgica de expandirse y reducir su dependencia de productos importados. El principal objetivo de este proyecto es determinar si es técnica y económicamente factible el desarrollo de los componentes requeridos para el revestimiento externo tricapa de tubos de acero en Argentina. Estos componentes son epoxi, adhesivo y polietileno o polipropileno.

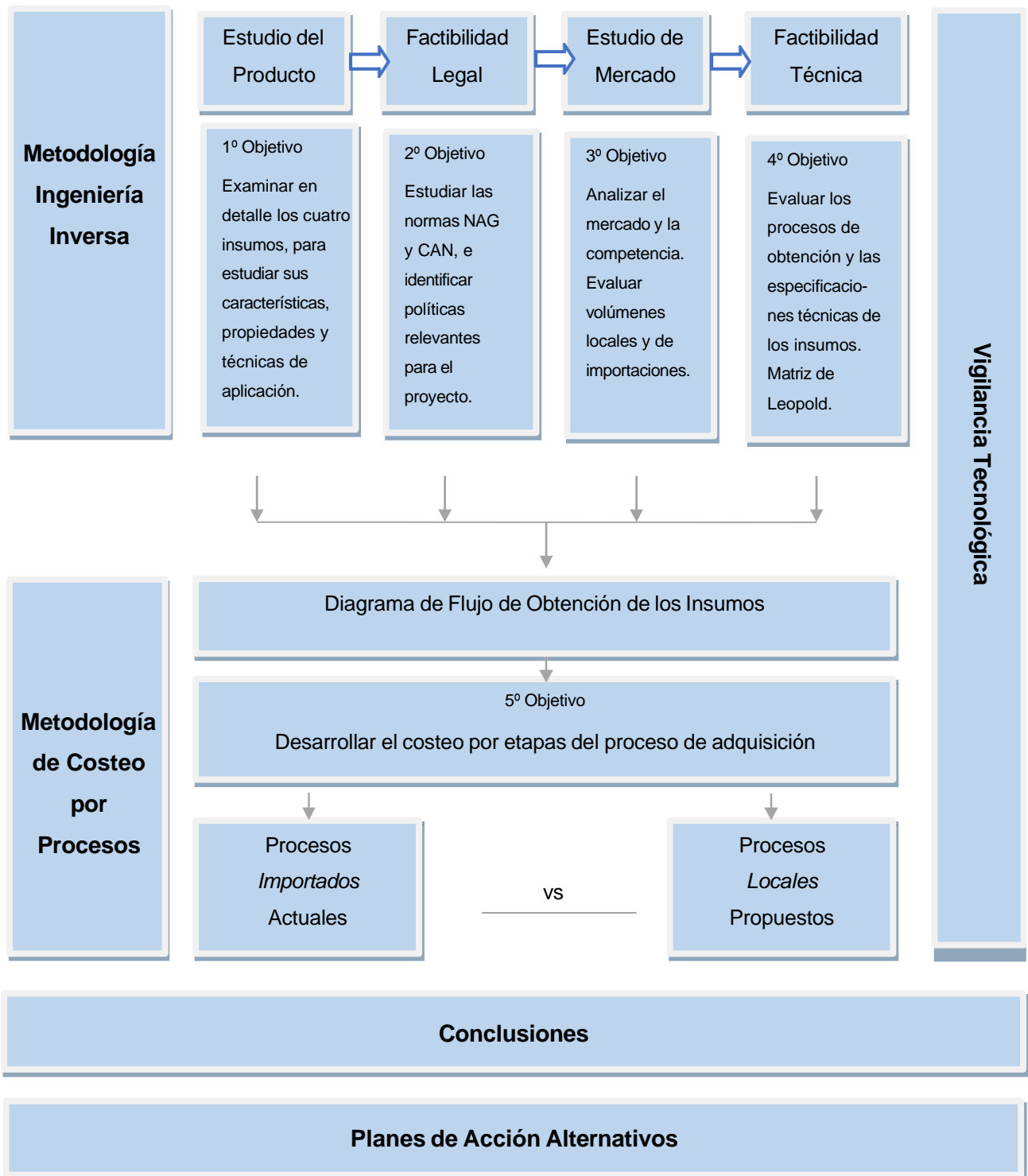
Está organizado en dos bloques, iniciando con una primera parte donde se aplicarán técnicas de ingeniería inversa para analizar en detalle cada componente, junto con un estudio de factibilidad legal. Seguido, se realizará un estudio de mercado para estudiar la demanda a nivel nacional de estos componentes y, por último, un análisis de factibilidad técnica centrado en los procesos productivos.

En la segunda parte, se implementará una metodología de costeo por procesos, donde se asignarán costos en función de las etapas de producción. Esto permitirá realizar análisis comparativos y extraer conclusiones sobre la viabilidad del proyecto.

Palabras claves: revestimiento, desarrollo local, mercado, epoxi, adhesivo, polietileno.

## 2.2 Resumen Gráfico

**Objetivo Principal:** analizar la factibilidad del desarrollo de insumos para revestimiento externo tricapa de tubos de acero en Argentina.



## 2.3 Revestimientos de Tubos de Acero

Con el rápido crecimiento de la demanda global de energía, la producción de petróleo y gas se ha expandido sustancialmente debido a importantes avances tecnológicos, lo que ha impulsado la creciente necesidad de nuevos oleoductos o tuberías. Estos se consideran el medio más eficaz y seguro para transportar líquidos y gases a largas distancias. Hoy en día, las demandas cada vez mayores de tuberías hacen que la industria de protección de ductos esté a la vanguardia de la tecnología necesaria para mantener la integridad de estas estructuras, según Thompson & Saithala (2015).

Múltiples sectores han realizado un gran esfuerzo, incluidos operadores de oleoductos, reguladores, investigadores y personas a fines, para mantener los oleoductos alejados de riesgos de degradación y fallas que podrían causar consecuencias catastróficas, como pérdida de energía, daños ambientales y ecológicos e incluso accidentes fatales. Por lo que, la gestión de la integridad y seguridad del sistema de ductos ha sido el negocio fundamental y central para todas las empresas operadoras de ductos.

Se trata de poder mantener la operación segura y confiable para el transporte de energía, mejorar la sostenibilidad del sistema de tuberías y reducir los riesgos operativos optimizando las operaciones y gastos de capital, maximizando el ciclo de vida y la confiabilidad de la tubería. El revestimiento debe poder mantener sus propiedades y permanecer intacto y funcional, separando el sustrato de acero del medioambiente durante un período de tiempo suficiente. Se deben considerar los factores ambientales (temperatura, humedad, productos químicos, bacterias, etc.) porque todos afectan las propiedades y el rendimiento del revestimiento.

La corrosión externa es el principal mecanismo de falla que afecta la durabilidad y la integridad de las tuberías. Los revestimientos proporcionan el método primario para proteger una tubería contra el ataque de corrosión, daños mecánicos y amenazas geotécnicas, y también para mantener la integridad de una tubería en ambientes de suelo o agua. Si el revestimiento se encuentra intacto y bien adherido al acero de la cañería, separa efectivamente la cañería del ambiente y evita que se desarrolle el proceso corrosivo. (Cheng & Norsworthy, 2016)

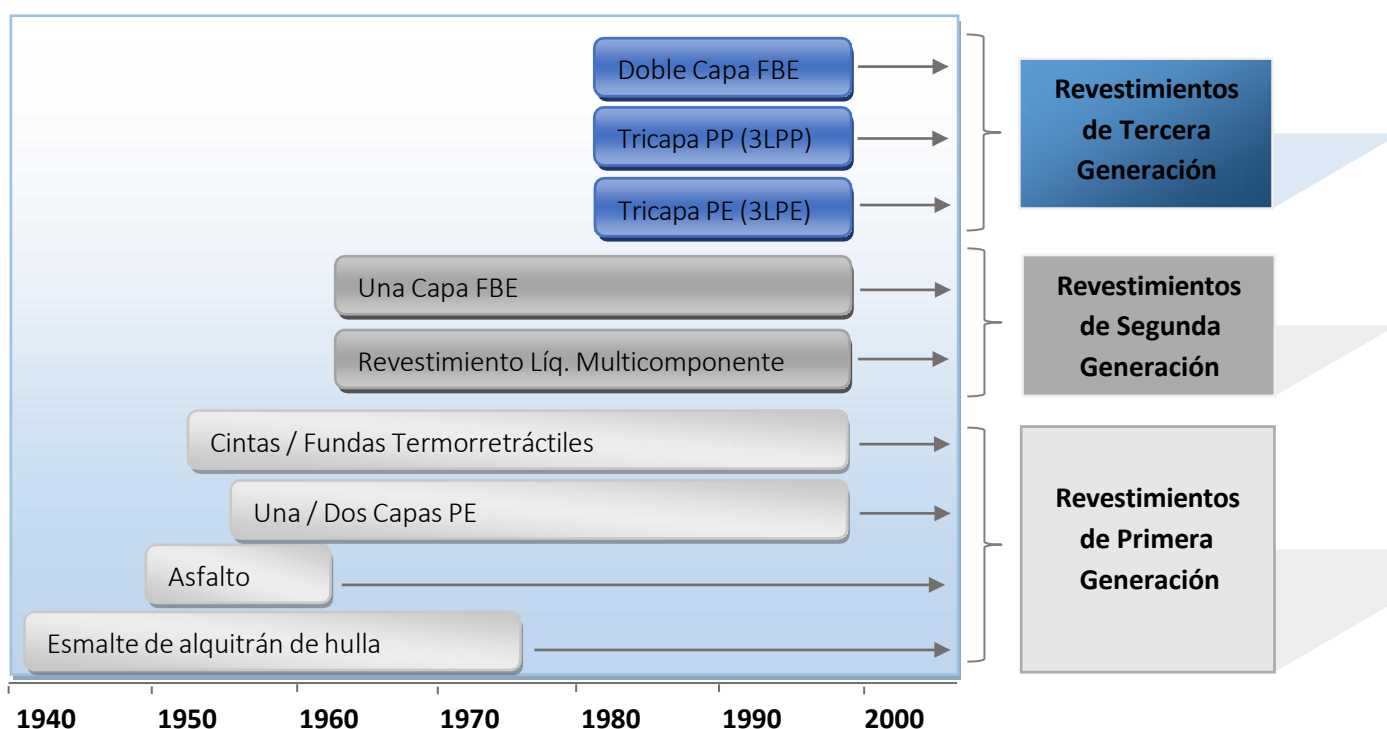
### 2.3.1 Evolución de los Revestimientos Externos

Durante el último medio siglo, la tecnología de revestimientos ha experimentado innovaciones revolucionarias en la protección de tuberías contra ataques de corrosión. Existen una gran variedad de materiales que se utilizan para revestir y envolver tuberías y se han desarrollado nuevos revestimientos que implican nuevas técnicas de aplicación para

mejorar la vida útil y el rendimiento de los componentes que deben proteger. Esto incluye innovaciones en tecnología de materiales, desde alquitrán de hulla hasta asfalto, polietileno sinterizado (PE) y epoxi unido por fusión (FBE), y también el desarrollo de nuevos sistemas, desde revestimientos de una sola capa hasta sistemas de dos y tres capas.

La evolución de los revestimientos de tuberías desde 1940 hasta la actualidad se muestra cronológicamente en la Figura 1, donde se presentan los distintos sistemas de revestimiento, organizados en tres categorías según su período de desarrollo.

La primera generación incluye opciones como el esmalte de alquitrán de hulla y el asfalto, que ya no se utilizan para recubrir tuberías debido a las malas experiencias de campo y a los riesgos para la salud. Además, se incluyen las cintas de polietileno, el polietileno de una o dos capas y las mangas termorretráctiles, que su uso también se encuentra en declive debido a problemas como la mala adhesión, el estrés del suelo y la corrosión externa. En la segunda generación se encuentran revestimientos como epoxi fusionado en polvo (FBE) de una sola capa y revestimientos líquidos multicomponente. Finalmente, la tercera generación abarca revestimientos más avanzados como el polietileno y polipropileno de tres capas (3LPE y 3LPP) y epoxis unidos por fusión de doble capa.



**Figura 1.** Desarrollos de revestimientos en los últimos 40 años (Thompson & Saithala, 2015)

Los revestimientos tricapa superaron las debilidades de los revestimientos de una sola capa gracias a las ventajosas características de las combinaciones de materiales. Generalmente,

el desarrollo de revestimientos tricapa se basa en dos principios, un diseño multicapa que combina las propiedades favorables de los materiales de revestimiento individuales, y la separación funcional de protección contra la corrosión y resistencia al daño mecánico.

Este trabajo, se enfoca en el estudio de los insumos de revestimiento, específicamente del revestimiento externo tricapa.

### 2.3.2 Poliolefinas de Tres Capas

A principios de la década de 1980, Mannesmann desarrolló el sistema de revestimiento de tuberías de poliolefina de tres capas. La composición básica del mismo incluye un imprimador epoxi como capa base, una capa adhesiva intermedia y una capa superior de poliolefina, ya sea polietileno (PE) o polipropileno (PP). La Tabla 1 presenta los diferentes tipos de revestimiento tricapa externo de tubos de acero. Cada capa es funcional para ciertos propósitos a fin de garantizar que todo el sistema maximice su protección contra el ataque de corrosión a la estructura del sustrato.

**Tabla 1.** Tipos de revestimiento externo

Revestimiento	Nombre	1° Capa	2° Capa	3° Capa
<b>3LPE</b>	<i>3 Layer Polyethylene</i>	Imprimador Epoxi	Adhesivo	Polietileno de Alta Densidad
<b>3LPP</b>	<i>3 Layer Polypropylene</i>	Imprimador Epoxi	Adhesivo	Polipropileno

El sistema tricapa está destinado a combinar la excelente adhesión y resistencia a la desunión catódica de un epoxi, con la alta resistencia mecánica y flexibilidad de una poliolefina, siendo la capa intermedia el adhesivo que une la poliolefina al epoxi.

En la Figura 2 se muestran las tres capas que componen el sistema de revestimiento de tubos de acero. Estos revestimientos tricapa se lanzaron al mercado con la promesa de ser la solución definitiva a los problemas de corrosión. Desde entonces, el polietileno tricapa (3LPE) es el tipo de revestimiento más utilizado en cañerías enterradas, y actualmente representa el 66% de las cañerías instaladas en el mundo, según Coniglio & Carzoglio (2021).

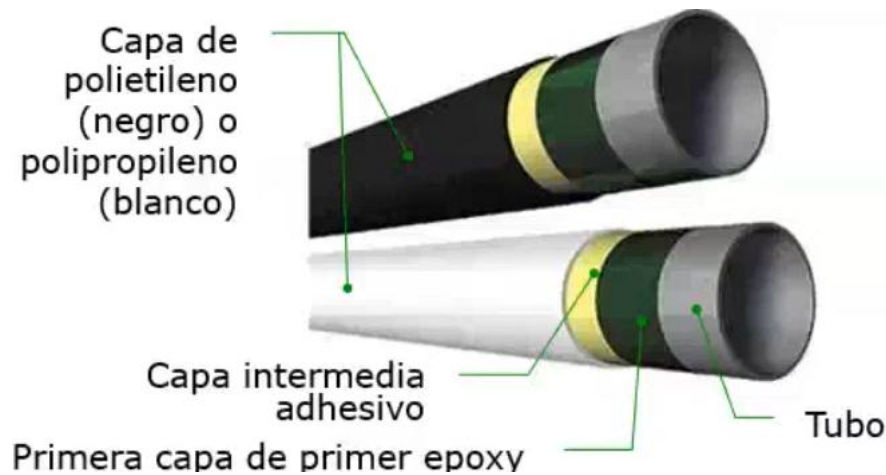


Figura 2. Revestimiento externo tricapa 3LPE/3LPP

Entre los beneficios más destacados del revestimiento externo tricapa se encuentran:

- **Alta resistencia a fluidos corrosivos.** Garantiza la durabilidad y la integridad estructural del revestimiento, especialmente en entornos donde las superficies están expuestas a sustancias químicas corrosivas.
- **Excelente resistencia mecánica.** Permite soportar operaciones de funcionamiento de tuberías, revestimientos y herramientas, destacando su capacidad para resistir fuerzas mecánicas y tensiones sin sufrir deformaciones significativas o fallos prematuros.
- **Excelente adherencia entre capas.** Garantiza efectividad, durabilidad y facilita la transmisión eficiente del par, evitando la delaminación o separación prematura del revestimiento.
- **Alta resistencia a los hidrocarburos.** Capacidad para resistir la acción de los hidrocarburos, como aceites, grasas y derivados del petróleo, especialmente relevante en aplicaciones de la industria petrolera o en sistemas de transporte de combustibles.
- **Resistencia a la abrasión.** Capacidad para resistir acciones mecánicas como frotamiento, raspado o erosión, que podrían eliminarlo progresivamente de la superficie. Mantiene su apariencia y estructura original, prolongando su vida útil.
- **Resistencia a la intemperie.** Capacidad para resistir a condiciones climáticas adversas, como radiación solar, lluvia, nieve y cambios de temperatura, sin excesiva formación de tiza (polvo), agrietamiento, formación de ampollas, pérdida de adherencia o cambio de color.

En síntesis, los componentes necesarios para revestir y proteger las tuberías principalmente contra la corrosión son IMPRIMADOR EPOXI, ADHESIVO y POLIETILENO o POLIPROPILENO.

### 3. METODOLOGÍA INGENIERÍA INVERSA

A partir de la identificación de estos componentes, se plantea el desarrollo de una metodología que permite caracterizar y comprender en detalle cada uno de ellos. Con este fin, se aplica un enfoque de ingeniería inversa, descrito a continuación.

La ingeniería inversa es el proceso mediante el cual se estudia en profundidad un producto final, en este caso los componentes del revestimiento tricapa, con la intención de extraer de él un conocimiento profundo de su funcionamiento, su origen y su proceso de fabricación. En un sentido amplio, se puede decir que la ingeniería inversa de un producto trata de entender un objeto al punto de poder reproducirlo y mejorarlo. Se le llama proceso inverso porque el flujo de trabajo va en sentido contrario de lo que suele ser el proceso de ingeniería convencional, donde se parte de lo teórico hacia un producto final.

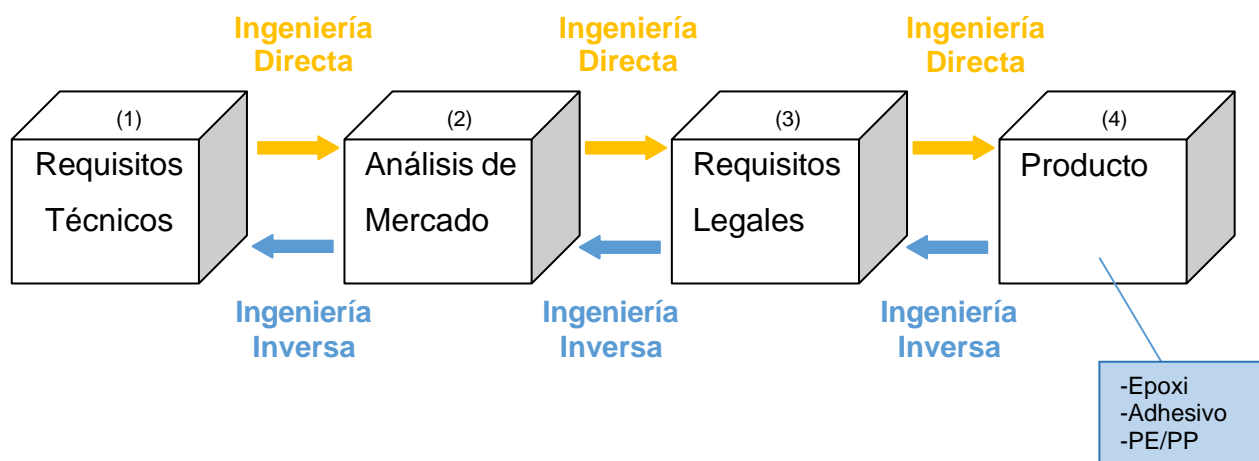


Figura 3. Proceso de ingeniería inversa

En la Figura 3 se muestran las diferencias de los dos tipos de ingeniería: el procedimiento convencional se realiza por métodos de ingeniería concurrente, donde se desarrolla un producto (los componentes en este caso) a partir de especificaciones y exigencias previas (1) que serán el punto de partida para estudiar el mercado (2) y considerar las condiciones legales del producto en ese mercado (3), para así fabricar lo buscado (4), con la característica de ser un proceso de desarrollo que requiere de mucho tiempo y estudios.

Por el contrario, la ingeniería inversa parte del producto final (4) y mediante las normas que lo rigen se conocen los requisitos legales (3). Una vez identificado el entorno normativo, se procede a conocer el mercado en el que se desenvuelven (2) y, por último, las especificaciones y exigencias necesarias para producirlo con éxito (4), con la característica de ser un proceso rápido ya que parte de una solución. La ingeniería inversa ofrece un método valioso y útil ya que puede introducir formas que reduzcan costos de fabricación y minimizar desperdicios en el proceso de fabricación de estos insumos.

## 3.1 Estudio del Producto

### 3.1.1 Primera Capa: *Imprimador Epoxi*

La primera capa conocida como *primer epoxy* o imprimación epoxi es una de las partes más críticas de un sistema de revestimiento y es universal en todos aquellos diseñados para resistir la corrosión. Es la capa que se encuentra directamente sobre el sustrato de acero y se utiliza para proporcionar protección primaria contra la corrosión, siendo el objetivo principal en los revestimientos tricapa. La imprimación tiene funciones esenciales, que incluyen:

- ✓ Adhesión: Al ser la base sobre la que se aplica el resto del sistema de revestimiento, debe proporcionar una fuerte unión entre el revestimiento y el sustrato de acero.
- ✓ Cohesión: Debe ser compatible con la capa intermedia, proporcionar una fuerte adhesión a la capa siguiente y proporcionar resistencia interna.
- ✓ Carga de inhibidores de corrosión: Se carga con pigmentos que pueden inhibir la corrosión del sustrato metálico (o pasivar el metal) una vez que se produce la corrosión. Una imprimación catódicamente activa debe reaccionar con la humedad y los electrolitos del medio ambiente para proteger catódicamente el sustrato metálico.
- ✓ Resistencia a la permeabilidad del agua: Es la última línea de defensa contra la penetración de agua o humedad a través del sistema de revestimiento. Debe ser suficientemente resistente a la penetración de humedad durante el servicio.
- ✓ Distensión: Debe poseer la flexibilidad adecuada para mantener la integridad durante la flexión mecánica de la estructura del sustrato o cuando la temperatura cambia en los ciclos estacionales.

#### 3.1.1.1 Composición y propiedades del Epoxi.

El imprimador epoxi o FBE cuyo nombre proviene del inglés *Fusion Bonded Epoxy*, y significa "epoxi unido por fusión", es un recubrimiento que se aplica como polvo seco y luego se fusiona a la superficie de la tubería con calor. Este proceso resulta en una dura capa continua que se adhiere fuertemente a la superficie.

Para su aplicación, el polvo se pulveriza electrostáticamente sobre la tubería precalentada como se observa en la Figura 4. Al entrar en contacto con la superficie caliente, el polvo se funde, gelifica y en 2 o 3 minutos se convierte en una capa de esmalte resistente.

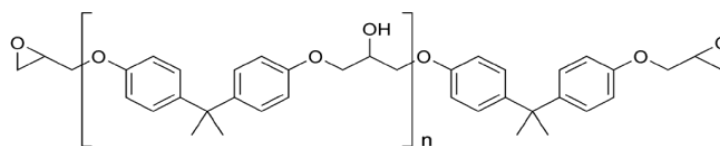


**Figura 4.** Aplicación de epoxi en una empresa estadounidense

En cuanto a su composición, el FBE está formado por los siguientes componentes:

- ✓ **Resina epoxi**, que le otorga resistencia química y adherencia.
- ✓ **Agente de curado** o endurecedor, generalmente aminas o anhídridos que reaccionan con la resina epoxi al calentarse.
- ✓ **Cargas y pigmentos**, que mejoran propiedades como la resistencia al impacto y la estabilidad UV.
- ✓ **Aditivos**, que controlan características como la fluidez y la adherencia.

La estructura de una resina de tipo epoxi contiene un anillo cíclico de tres elementos compuesto por un átomo de oxígeno conectado a dos átomos de carbono. Las resinas más utilizadas son derivados del bisfenol A, como se muestra en la Figura 5, donde al combinarse con epiclorhidrina se obtiene una molécula con grupos funcionales de óxido de etileno, con grupos epoxi en los extremos generalmente y grupos hidroxilo eventualmente. Además, existen variantes disponibles con distintas longitudes moleculares, lo que permite ajustar las propiedades del revestimiento final según las necesidades específicas.



**Figura 5.** Estructura del prepolímero epoxi tipo bisfenol A no modificado

Los agentes de curado contenidos en el FBE reaccionan con los anillos epoxi o con los grupos hidroxilo. El tipo de agente de curado seleccionado determina las características del producto FBE final, como la densidad de reticulación del revestimiento y su resistencia química, fragilidad, flexibilidad, entre otras. Durante la aplicación de calor, la resina y el agente de curado reaccionan para formar polímeros reticulados, que otorgan al revestimiento sus propiedades de solidez y resistencia.

Además de estos dos componentes principales (resina epoxi y endurecedor), el epoxi incluye cargas, pigmentos, extensores y otros aditivos para proporcionar las propiedades deseadas, los cuales controlan características que incluyen permeabilidad, dureza, color, espesor, resistencia al desgarro y otras; y normalmente son sólidos secos, aunque se pueden usar pequeñas cantidades de aditivos líquidos en algunas formulaciones de FBE.

### **3.1.2 Segunda Capa: Adhesivo**

La capa intermedia es un adhesivo cuyo propósito es unir la capa superior e inferior, y no está diseñada para utilizarse como capa de acabado. Sus principales funciones incluyen:

- ✓ Fuerte unión con la imprimación y la capa superior: Suele tener un alto contenido de pigmento, por lo que es una capa uniforme con una buena adhesión física.
- ✓ Espesor del sistema de revestimiento total: Un sistema con propiedades medias puede adquirir propiedades adicionales con un mayor espesor. Aumentar el espesor del revestimiento puede otorgar una mayor resistencia al impacto y la abrasión, como así también, mayor resistencia a la transferencia de vapor de humedad.
- ✓ Resistencia química: Puede aumentar la resistencia química del revestimiento al actuar como una barrera contra la penetración de químicos en ambientes corrosivos.

#### **3.1.2.1 Composición y propiedades del Adhesivo.**

El adhesivo utilizado en revestimientos de tres capas es un adhesivo de polímero injertado, suministrado en forma de gránulos de color natural. Su composición depende del material de la tercera capa para asegurar la compatibilidad: si esta capa es de polietileno (PE), el adhesivo será un polietileno modificado con grupos polares injertados; si es de polipropileno (PP), se utilizará un polipropileno modificado de manera similar.

Es un adhesivo basado en polietileno o polipropileno con grupos polares injertados, que permiten formar enlaces entre dos compuestos químicos de propiedades muy diferentes, como el polietileno (PE) no polar y el FBE polar. Estos grupos polares injertados en la columna vertebral del polímero ofrecen una excelente adhesión a los materiales polares, es decir: resinas epoxi, aluminio y polímeros polares.

### **3.1.3 Tercera Capa: Polietileno o Polipropileno**

La capa superior del sistema de revestimiento es la que está en contacto directo con los entornos de servicio; es más densa y delgada que las anteriores. Entre sus funciones más

importantes se encuentran:

- ✓ Proporcionar una barrera de bloqueo contra el medio ambiente, ya que es la primera línea de defensa contra un ataque ambiental al sustrato.
- ✓ Mejorar la resistencia a los químicos, la humedad y la permeación de gases.
- ✓ Proporcionar una superficie resistente y duradera al desgaste.
- ✓ Proporcionar color, brillo y textura, con características de apariencia.
- ✓ Proporcionar protección contra el deterioro por rayos ultravioleta (en instalaciones sobre el suelo) y resistencia a las incrustaciones marinas (en entornos marinos).

La tercera capa del revestimiento externo puede estar compuesta por polietileno de alta densidad (por sus siglas también llamado PEAD) o por polipropileno (PP), ambos polímeros con propiedades similares.

### **3.1.3.1 Polietileno.**

El polietileno es un polímero termoplástico que, en condiciones ambientales, se presenta como un sólido blanco granulado o en polvo. Es un material semicristalino que se destaca por su excelente resistencia química, así como por su resistencia al desgaste y al impacto. Sin embargo, posee una menor resistencia a la tracción y soporta temperaturas de trabajo bajas. Además, es resistente al agua, ácidos, álcalis y a la mayoría de los solventes. En muchos casos, la incorporación de aditivos específicos mejora su estabilidad y propiedades. Por ejemplo, se agregan pigmentos amarillos a algunos pellets de PE para protección UV y otros fines para el revestimiento de tuberías.

Según las propiedades fisicoquímicas del producto, se pueden distinguir tres tipos distintos de polietileno, descritos a continuación. Cada uno de ellos requiere un proceso de producción distinto y la diferencia principal es la densidad del producto final.

A causa de su elevada cristalinidad, el polietileno de alta densidad (PEAD) es el tipo de polietileno más rígido y menos flexible de todos. Su rigidez y resistencia lo hacen ideal para una amplia variedad de aplicaciones, como revestimientos, envases y botellas, tuberías de alta presión, cajas plásticas, juguetes y muebles de plástico, entre otros.

Por otro lado, el polietileno de media densidad (PEMD), ofrece un equilibrio entre flexibilidad y resistencia, lo que lo hace especialmente adecuado para la fabricación de tuberías, así como para recubrimientos de cables y películas plásticas. Y, por último, el polietileno de baja densidad (PEBD) es un polímero incoloro, inodoro y no tóxico. Se utiliza principalmente en la fabricación de bolsas de supermercados, embalajes y láminas impermeabilizantes. Por estas propiedades, estos dos materiales no son adecuados para el revestimiento de tubos de acero.

### 3.1.3.2 Polipropileno.

El polipropileno (PP) es uno de los materiales termoplásticos económicamente más importantes a nivel industrial. Es un polímero termoplástico parcialmente cristalino que se obtiene de la polimerización del propileno y se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, ya sean transparentes o pigmentadas, como envoltorios para alimentos, textiles, componentes de automóvil, dispositivos médicos, productos de consumo y otros.

Este polímero posee una estructura compleja y se puede dividir en cuatro superestructuras distintas. Entre sus principales propiedades destacan su alto punto de fusión, baja densidad, buena rigidez y resistencia. No obstante, no es resistente a hidrocarburos aromáticos y clorados, benceno, gasolina ni oxidantes fuertes. La exposición al oxígeno y una elevada radiación de energía lo convierten en un material quebradizo e incluso pueden descomponerlo.

En su estado natural, el polipropileno es bastante traslúcido, no es resistente a los rayos ultravioleta sin estabilización y es químicamente resistente a los ácidos (excepto los ácidos oxidantes), soluciones salinas, disolventes, alcoholes, agua, aceites, grasas y detergentes. Además, apenas presenta rotura por fatiga, lo que lo hace ideal para aplicaciones sometidas a esfuerzos repetitivos.

### 3.1.3.3 Diferencia entre Polietileno y Polipropileno.

Aunque el polipropileno tiene muchas similitudes con el PEAD, existen algunas diferencias claves. La primera se haya en torno a sus densidades, mientras que la del PEAD supera los  $941 \text{ kg/m}^3$ , la densidad del polipropileno ronda los  $900 \text{ kg/m}^3$ . Esto se debe, en parte, a que el PP es un material más amorfo (menos cristalino) que el PEAD. Además, el PP es más rígido que el PEAD, lo que lo hace ideal para la manipulación de tuberías.

La segunda diferencia radica en la temperatura de operación. Como se observa en la Tabla 2, el polipropileno ofrece una mayor resistencia térmica soportando temperaturas entre  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $110 \text{ }^\circ\text{C}$ , en comparación con el PEAD, que resiste entre  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ . Sin embargo, una desventaja del PP frente al PEAD en aplicaciones de tuberías es su temperatura de transición vítrea relativamente alta, alrededor de  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Esta temperatura marca el punto en que el material pasa de ser duro y vítreo a blando y flexible, lo que hace que el PP sea más quebradizo que el PEAD a bajas temperaturas.

**Tabla 2.** Componentes de la tercera capa

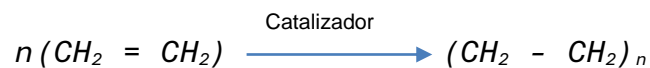
	PEBD	PEMD	PEAD	PP
<b>Rango de temperatura de operación (°C)</b>	-20 a 60	-50 a 80	-40 a 85	-20 a 110
<b>Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	910 a 925	930 a 940	941 a 954	900

Sin embargo, para los fines de este proyecto de graduación y su aplicación en Argentina, el rango de temperatura de operación del PEAD es adecuado para las condiciones locales. Este material funciona de manera óptima entre 65 y 80°C, un rango en el que operan todos los yacimientos con conducción de fluidos, por lo tanto, no sería necesario utilizar polipropileno. Si bien no se descarta su uso, hoy el PP tiene un mercado muy reducido en el país, ya que en la práctica no se utiliza en aplicaciones donde el polietileno puede cumplir con los requerimientos técnicos de manera eficiente y a un menor costo.

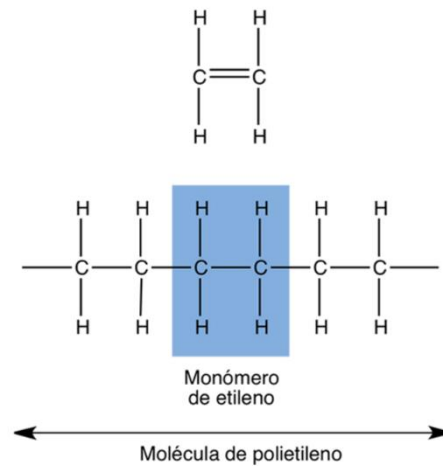
Por estas razones, los análisis de factibilidad se realizan sobre el revestimiento externo tricapa de polietileno de alta densidad, descartando la opción del revestimiento donde la tercera capa está compuesta por polipropileno (3LPP).

### 3.1.3.4 Composición y propiedades del Polietileno.

El polietileno es un polímero sintético y termoplástico obtenido a partir de una reacción conocida como polimerización del etileno, un gas derivado del etano, componente del gas natural. El elemento básico para la formación del polietileno es el etileno ( $CH_2 = CH_2$ ), la olefina más simple. Este compuesto es una molécula estable que sólo se polimeriza al entrar en contacto con catalizadores, principalmente basados en cloruro de titanio (III), conocidos como catalizadores Ziegler-Natta. El proceso de polimerización se representa de la siguiente manera:



El producto se conoce como polietileno. La Figura 6 muestra la estructura básica de una molécula de PE, compuesta por largas cadenas de carbono e hidrógeno. Su densidad varía en función de la longitud de estas cadenas: cuanto más largas, mayor es la densidad.



**Figura 6.** Estructura molecular del polietileno

Cuando el polietileno se expone al sol, la energía solar rompe sus cadenas moleculares, y si se entierra, su degradación se acelera debido a sus limitadas propiedades mecánicas. Para prevenir esto, se le añade un aditivo llamado *negro de humo*, cuya función principal es absorber los rayos UV. En lugar de que la radiación solar degrade el material, el negro de humo actúa como una barrera protectora, evitando la ruptura de las cadenas poliméricas.

Según este proceso de polimerización es que el PE se denominará PEBD, PEMD o PEAD. Con el aumento de la densidad, el PE tiene un bajo grado de ramificación y, por lo tanto, fuertes fuerzas intermoleculares y resistencia a la tracción. Sus propiedades dependen fundamentalmente de su estructura, es decir básicamente de su peso molecular y cristalinidad.

Con respecto a sus propiedades físicas, el polietileno de alta densidad tiene una densidad de  $0.941 - 0.965 \text{ g/cm}^3$  y presenta un alto grado de cristalinidad, siendo así un material opaco y de aspecto ceroso.

En cuanto a su permeabilidad, el PEAD posee una alta capacidad de barrera al vapor ya que, debido a su naturaleza no-polar, absorbe muy poca humedad. A mayor densidad, menor permeabilidad. Además, su impermeabilidad al agua y a soluciones acuosas no se ve afectada por la humedad relativa. Incluso en ambientes cálidos y húmedos, la cantidad de adsorción de agua en la superficie es muy leve, al igual que su permeabilidad al vapor.

Por otro lado, este material presenta una baja adherencia sobre superficies metálicas lisas y es sensible a los cambios de temperatura, aunque puede operar sin fallas frágiles a temperaturas de hasta  $-18 \text{ }^\circ\text{C}$  o inferiores. También, se destaca como un excelente aislante eléctrico, con alta resistividad y baja constante dieléctrica, propiedades que se mantienen estables frente a variaciones de temperatura y humedad en condiciones normales de servicio.

### 3.1.4 Proceso de Aplicación

El proceso de aplicación del revestimiento externo tricapa se muestra en la Figura 7, abordando las etapas críticas. Esto no solo permite conocer las técnicas de aplicación de cada componente, sino también comprender el sistema de aplicación en su totalidad, es decir, el circuito completo del proceso.

#### I. Pre calentamiento

En primer lugar, el tubo se somete a un proceso de pre calentamiento para cumplir con las especificaciones y condiciones necesarias antes del lavado y granallado.

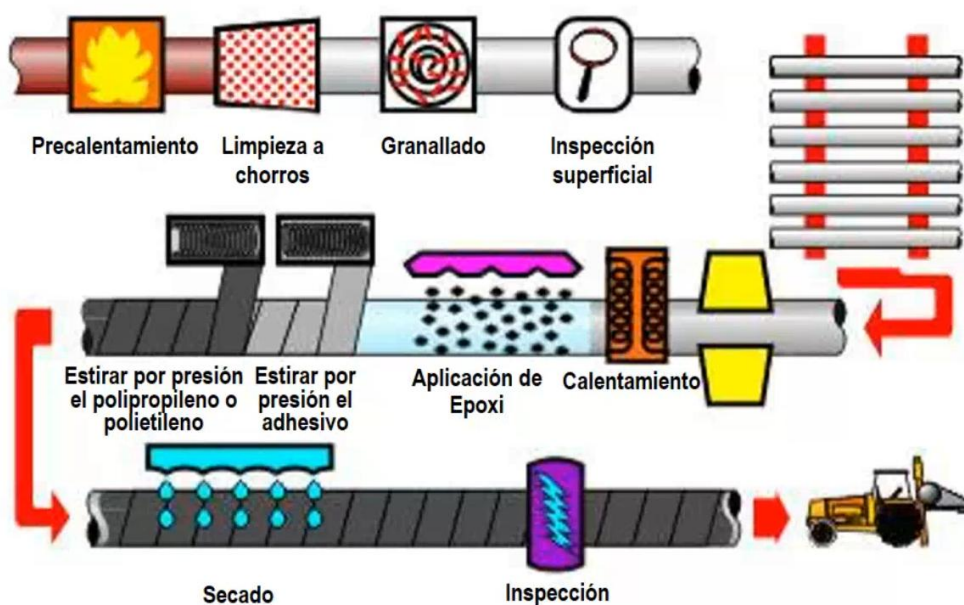


Figura 7. Proceso de aplicación de revestimiento externo tricapa

#### II. Prelimpieza de superficie de la tubería

Previo a la granalladora, se realiza una limpieza de materiales contaminantes. Se inspecciona la tubería visualmente para verificar la presencia de aceite, grasa y otros contaminantes visibles. Las contaminaciones salinas en la superficie del acero se miden mediante un detector de sales solubles.

#### III. Proceso de granallado

El granallado es una técnica de tratamiento superficial por erosión usada para la limpieza y preparación de superficies donde serán aplicados revestimientos. Antes de ingresar, la tubería debe estar totalmente seca y cumplir con los requisitos de temperatura. El proceso emplea una mezcla de abrasivos que es recirculada para retener materiales extraños y mejorar la adherencia del revestimiento. Tras el granallado, se inspecciona la tubería: si

cumple con los estándares debe ser revestida en un plazo máximo de 2 horas para evitar la oxidación y si presenta defectos, se elimina del flujo de producción.

#### IV. Calentamiento de la superficie

La tubería se transporta a través de bobinas de inducción, calentando la tubería al rango de temperatura de aplicación necesario recomendado por el fabricante del epoxi.

#### V. Aplicación de imprimación epoxi

El tubo ingresa a la cámara de revestimiento, donde se aplica el material epoxi en polvo mediante pulverización electrostática logrando un espesor uniforme en la película. Este se adhiere al tubo gracias a la temperatura alcanzada previamente.

#### VI. Extrusión de adhesivo

Se aplica el adhesivo por extrusión lateral después de la aplicación del epoxi respetando la ventana de tiempo de gel para obtener una buena adherencia química entre las capas.

#### VII. Extrusión de polietileno

El polietileno de alta densidad se aplica mediante extrusión lateral inmediatamente después de la aplicación del adhesivo, hasta alcanzar el espesor deseado. La película es prensada para garantizar su adherencia y uniformidad.

#### VIII. Enfriamiento

Tras la aplicación de la capa superior, la tubería se somete a un proceso de enfriamiento con agua, asegurando que no supere los 90 °C.

#### IX. Inspección

Se mide el espesor del revestimiento para verificar que cumpla con las tolerancias y requisitos establecidos. Las tuberías revestidas con defectos son rechazadas o sometidas a reparación y re-revestimiento.

### **3.2 Análisis de Factibilidad Legal**

Con el objetivo de identificar políticas relevantes para este proyecto y garantizar su viabilidad normativa en Argentina, se lleva a cabo un análisis de factibilidad legal basado en dos normas específicas: la norma argentina NAG-108 (Norma Argentina de Gas) y la norma canadiense CSA (*Canadian Standards Association*). Este análisis asegura que el desarrollo de los materiales propuestos, epoxi, adhesivo y polietileno, es viable desde un punto de vista normativo. Muchos proveedores locales no superan los ensayos exigidos por estas normas, lo que representa un desafío clave a considerar en este proyecto.

Es importante destacar que, en un sistema de revestimiento tricapa, cada componente no sólo debe cumplir con las especificaciones técnicas correspondientes, sino que también es necesario obtener la homologación conjunta, es decir, la aprobación de la combinación específica de los tres componentes que conforman la tricapa.

El cumplimiento de estas normas es esencial para garantizar que los revestimientos cumplan con los requisitos técnicos y de seguridad, ya que regulan:

- Las propiedades físicas mínimas que deben poseer los componentes.
- Los métodos de ensayo para verificar dichas propiedades.
- Los procesos de certificación y homologación necesarios.

Aunque las normas NAG-108 y CSA son similares y muchos de los ensayos solicitados por la NAG-108 se basan en la norma canadiense, existen diferencias significativas entre ellas.

### **3.2.1 Norma NAG**

Dado que se trata del mercado local y un gasoducto, se aplica esencialmente la norma NAG-108. Esta norma argentina establecida por el ENARGAS bajo la Ley 24.076 incluye especificaciones sobre los materiales, métodos de aplicación y pruebas de calidad que deben cumplirse para garantizar la integridad y durabilidad de los revestimientos anticorrosivos.

En el caso de la norma NAG, la homologación se realiza a través del organismo BureauVeritas, donde se realizan los ensayos descritos en la norma y se presentan expedientes. El proceso de homologación puede durar hasta 4 meses, ya que esta norma tiene ensayos a 100 días.

Es importante destacar que, a diferencia de la norma canadiense, la norma NAG vincula el producto homologado con su planta de origen, por lo que la aprobación de la terna completa debe contemplar el lugar de origen de cada componente. En cambio, la norma CSA no requiere prehomologación; basta con cumplir con los ensayos para obtener la homologación.

Según la norma, la aplicación debe realizarse de la siguiente manera: la primera capa de epoxi con un espesor entre 120  $\mu\text{m}$  y 150  $\mu\text{m}$ , la segunda capa de adhesivo con un espesor entre 200  $\mu\text{m}$  y 300  $\mu\text{m}$ , y la tercera capa de polietileno de alta densidad conforme a las especificaciones del cliente.

Además de los valores mínimos por capa, en ella se determinan los espesores totales mínimos del revestimiento. Estos valores se detallan en la Tabla 3.

**Tabla 3.** *Espesores mínimos del sistema aplicado*

Diámetro del caño (mm)	Espesor mínimo total (mm)
$\varnothing n \leq 114,3$	1,4
$114,3 < \varnothing n \leq 273$	1,6
$273 < \varnothing n \leq 508$	1,8
$508 < \varnothing n \leq 762$	2,0
$\varnothing n > 762$	2,5

Fuente: ENARGAS (2009)

Con respecto a las propiedades de la resina epoxi en polvo, la norma exige cumplir con una serie de datos que el fabricante del epoxi debe brindar en una ficha técnica; entre los más relevantes: nombre y tipo de resina epoxi en polvo, densidad, rango de temperaturas de aplicación, contenido de humedad y curva de temperaturas de gelificación (Gel time). Este último es un parámetro clave ya que, en algunos ensayos realizados en la empresa con epoxi de proveedores locales, se observaron resultados negativos. El *Gel Time* indica el tiempo que tarda la resina epoxi al pasar de un estado líquido a un estado gelatinoso durante el proceso de curado y su valor puede variar ya que depende de la velocidad de la línea de aplicación y el tamaño del tubo.

En cuanto a las propiedades del adhesivo y del polietileno de alta densidad, la norma establece ciertos parámetros que deben cumplirse, detallados en el Anexo I.

### **3.2.2 Norma Canadiense CSA**

La norma CSA se posiciona como una de las más utilizadas a nivel global en la industria de los revestimientos de tubos de acero, gracias a su enfoque integral en aspectos técnicos y de calidad. Su amplio reconocimiento en mercados internacionales y su adopción por empresas líderes del sector la convierten en una referencia para garantizar la competitividad y la aceptación de los productos desarrollados.

Esta norma cubre la calificación, aplicación, inspección, prueba, manejo y almacenamiento de materiales requeridos para el revestimiento de tuberías de acero diseñadas principalmente para sistemas de oleoductos o gasoductos.

Según la norma CSA Z245.21.22 (edición 2022), las propiedades de la imprimación epoxi en polvo, del polietileno virgen y las propiedades adhesivas deben ser las especificadas en el Anexo II. Sus aplicaciones deben realizarse según las recomendaciones de sus respectivos fabricantes. Esta norma establece los espesores mínimos requeridos para cada componente del revestimiento, según se presenta en la Tabla 4, garantizando así su protección contra la corrosión y factores ambientales.

**Tabla 4.** *Espesores mínimos del revestimiento*

<b>Espesores mínimos del revestimiento (mm)</b>			
<b>Diámetro del tubo</b>	<b>Espesor Epoxi</b>	<b>Espesor Adhesivo</b>	<b>Espesor Polietileno de Alta Densidad</b>
Todos los diámetros	0,12	0,10	0,45

Fuente: CSA Group (2022)

### **3.2.3 Consideraciones**

La certificación de ambas normas en las plantas de Argentina es un proceso complejo y largo. Primero se realizan pruebas internas y luego, la homologación en sí con sus respectivos ensayos dependiendo de cada norma. Uno de los principales desafíos es la antigüedad de las plantas de revestimiento de la empresa: cuando el componente es de alta calidad, puede compensar algunas deficiencias del sistema, pero con una infraestructura más moderna sería más fácil ajustar parámetros y optimizar el proceso.

Cabe mencionar que la empresa en estudio realizó varios intentos previos de homologación con proveedores locales de epoxi y polietileno de alta densidad, pero no tuvo éxito debido a que las pruebas realizadas no alcanzaron los estándares requeridos. Sin embargo, se logró homologar el adhesivo de un proveedor argentino dentro de varias ternas, donde la primera y tercera capa correspondían a materiales importados.

Otro aspecto a destacar es que ninguna de estas normas permite el uso de materiales reciclados o que contengan porcentajes de material reciclado.

En conclusión, a pesar de estas dificultades y del tiempo y costo que requiere, la certificación sigue siendo un objetivo alcanzable.

## **3.3 Estudio de Mercado**

El estudio de mercado es de suma importancia para este proyecto ya que permite comprender el entorno donde se desarrolla el mismo y analizar qué tipo de mercado se está por afrontar.

Dicho estudio tendrá como objetivo la recolección y análisis de información que servirá para identificar las características principales del sector revestimiento, comprender cómo funciona y entender tanto las necesidades específicas de los clientes como sus expectativas.

### 3.3.1 Análisis PESTEL

Se lleva a cabo un análisis PESTEL para evaluar el impacto de los componentes externos que permanecen fuera del control de la organización, como los factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ecológicos y legales mostrados en la Figura 8, lo que permite identificar oportunidades y amenazas clave en la industria.

Factor político: se refiere a la participación del gobierno en el país y a cómo influye el marco político en la empresa y en este proyecto. Entre los aspectos relevantes se encuentran:

- Régimen de incentivos a grandes inversores. Posibles incentivos para empresas que inviertan en sectores clave como minería y energía. Reducción de impuestos y exenciones de aranceles.
- Mejoras en políticas de importación. La eliminación de aranceles a la importación de polímeros representa un desafío para el desarrollo local, ya que reduce la competitividad de los productos nacionales frente a los importados con costos más bajos.
- Normativas gubernamentales sobre infraestructura. El impulso de proyectos energéticos y de transporte puede aumentar la demanda de tubos de acero, impactando directamente en la necesidad de insumos para su revestimiento.

Factor económico: evalúa la estabilidad económica local y su impacto en los costos y la viabilidad de las empresas. En el contexto actual, se destacan aspectos como:

- Inflación y fluctuación cambiaria. Aunque la inflación ha disminuido recientemente, continúa siendo un desafío, y las fluctuaciones en el tipo de cambio pueden impactar significativamente los costos para la producción de resina epoxi, adhesivo y polietileno.
- Tasas de interés y volatilidad en tasas de cambio. Las políticas de consolidación fiscal y la búsqueda de estabilidad macroeconómica podrían influir en las tasas de interés y en la volatilidad del tipo de cambio, afectando el acceso al financiamiento y los costos operativos.

Factor sociocultural: estudia cómo la cultura y las tendencias sociales pueden afectar la demanda de productos y servicios. En particular, para este proyecto, se destacan:

- Preferencias de productos con estándares de calidad. Lograr un posicionamiento competitivo en el mercado representa un gran desafío, dado que se trata de una empresa multinacional comprometida con la excelencia y busca mantener cierto estándar.
- Creciente interés en materiales y procesos más sostenibles.

**Factor tecnológico:** hace referencia a la innovación y a la adopción de tecnologías modernas que mejoran productos, servicios y también la forma de producción. Se destacan:

- Investigación y desarrollo en procesos de revestimiento más eficientes o innovadores. Posible desarrollo de una nueva generación de revestimientos.
- Avances en la formulación de los componentes: resina epoxi, adhesivo, PEAD.

**Factor ecológico:** examina las leyes de protección y contaminación ambiental, así como la regulación de consumo de energías. En este contexto, es importante considerar:

- Impacto ambiental. La huella de carbono podría tener implicancias significativas, especialmente debido a que las resinas epoxi tradicionales tienen una huella de carbono considerable.
- Normas ambientales. La Ley General del Ambiente establece normas generales sobre gestión de residuos y emisiones atmosféricas.
- Residuos industriales. La eliminación de ellos podría implicar costos adicionales.

**Factor legal:** cumplir con regulaciones locales e internacionales es fundamental para el desarrollo del proyecto. Algunos aspectos clave incluyen:

- Normativas específicas de calidad. La norma argentina NAG y la norma canadiense CSA garantizan la calidad y seguridad de los revestimientos.
- Leyes laborales y de seguridad. Éstas pueden afectar los costos y la estructura operativa.

## PESTEL

### Análisis del macroentorno



Figura 8. PESTEL, análisis de macroentorno

### 3.3.2 Las 5 Fuerzas de Porter

Utilizar la investigación de las Cinco Fuerzas de Porter permite examinar el sector de revestimientos, identificando principales desafíos y oportunidades que impactan en su competitividad.

Según Porter (2015), en toda industria, sin importar si es nacional o internacional, o si se produce un bien o servicio, las reglas de la competencia están contenidas en cinco fuerzas representadas en la Figura 9: la amenaza de nuevos competidores, la amenaza de productos o servicios sustitutos, el poder negociador de los compradores, el poder negociador de los proveedores y la rivalidad entre los competidores actuales.

- Poder de negociación de los clientes

Porter (2015) estima que cuanto más se organicen los clientes, más exigencias y condiciones impondrán en la interacción de costos, calidad o servicios. En este caso, los principales compradores son empresas que fabrican o revisten tubos de acero para aplicaciones industriales, especialmente en los sectores de petróleo y gas. Además, existen otros segmentos de mercado más pequeños con diferentes aplicaciones para estos productos. No obstante, el poder de negociación de los clientes se considera de moderado a alto por dos razones: en primer lugar, la elevada sensibilidad al precio en industrias como la petrolera; y en segundo lugar, la posibilidad de recurrir a proveedores globales consolidados si los productos locales no cumplen con los estándares requeridos.

- Poder de negociación de los proveedores

Debido a que los insumos necesarios para producir epoxi, adhesivo y polietileno de alta densidad son, en su mayoría, productos químicos especializados, el poder de negociación de los proveedores es elevado. Esto se debe a factores como la alta concentración del mercado, las propiedades de los insumos que proporcionan y el efecto de dichos insumos en el precio de la industria, incluyendo la volatilidad de precios de los productos derivados del petróleo (base de los polímeros requeridos).

- Amenaza de productos sustitutos

El revestimiento tricapa, por su especificidad técnica, es un estándar industrial difícil de reemplazar a corto plazo, lo que limita significativamente las alternativas disponibles. Como resultado, la amenaza de sustitutos es baja en la actualidad, favoreciendo el mercado de estos insumos.

- Amenaza de entrada de nuevos competidores

A medida que sea más simple el ingreso de nuevos productos/competidores al mercado, más grande será la amenaza. En este caso, el alto costo de capital, los conocimientos técnicos necesarios y los estándares de calidad actúan como barreras significativas para la entrada de nuevos actores en el mercado local. Sin embargo, incentivos gubernamentales podrían reducir estas barreras. Actualmente, la amenaza de nuevos competidores se considera moderada a baja, ya que las restricciones técnicas y de inversión limitan la aparición de nuevas empresas.

- Rivalidad entre los competidores

El mercado de revestimientos tricapa para tubos de acero está dominado globalmente por grandes fabricantes internacionales que cuentan con economías de escala y tecnología avanzada. Sin embargo, en Argentina, la producción de estos insumos tiene menor competencia debido a la dependencia de las importaciones. Esto no descarta la existencia de competidores que produzcan materiales similares, ni que las fluctuaciones en el tipo de cambio afecten los costos de importación, lo que podría hacer más competitiva la producción local. En conclusión, esta fuerza se considera baja a moderada.

## Las 5 Fuerzas de Porter



**Figura 9.** Las 5 Fuerzas de Porter

Como conclusión, el análisis de las Cinco Fuerzas de Porter muestra un sector con oportunidades para el desarrollo local, especialmente debido a la baja amenaza de productos sustitutos y a la poca competencia interna. De todos modos, también revela desafíos importantes como la fuerte dependencia de proveedores especializados y el alto poder de negociación de los clientes con respecto a calidad y precio. Estos factores deben considerarse para fortalecer la competitividad del sector.

### 3.3.3 Análisis de Volúmenes

#### 3.3.3.1 Volúmenes de Importaciones.

El análisis de los volúmenes de importación es un paso clave para comprender el panorama actual del comercio internacional de estos insumos para el revestimiento externo. Esto permite conocer la magnitud de las importaciones en términos de volumen, distribución y la procedencia de los principales proveedores internacionales.

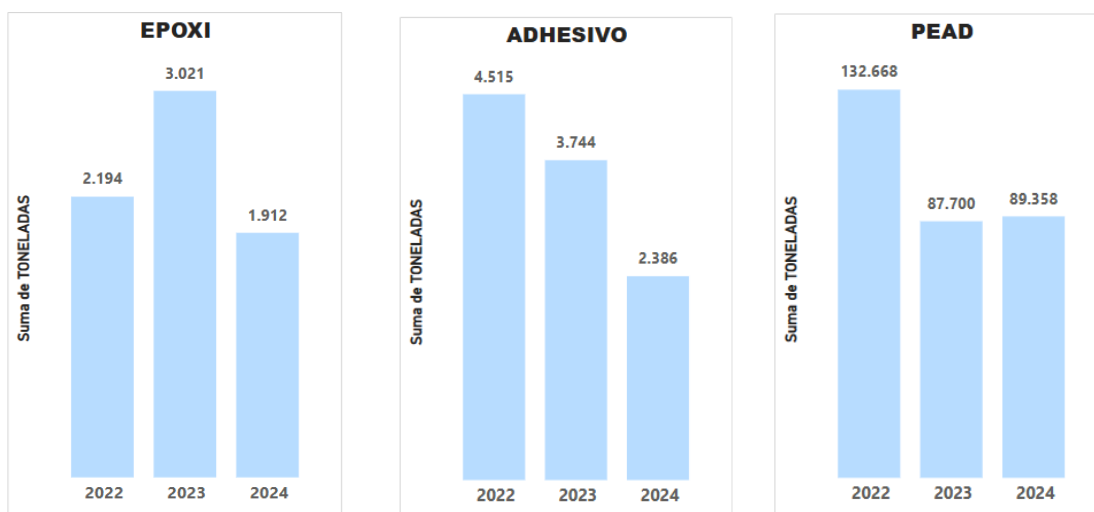
En la Tabla 5 se identifican las posiciones arancelarias sobre las cuales se desarrolla la investigación.

**Tabla 5.** Posiciones arancelarias de los componentes para revestimiento tricapa

ANALISIS ARANCELARIO DE COMPONENTES PARA EL REVESTIMIENTO TRICAPA		
Posición Arancelaria	Producto	Descripción Arancelaria
3907.30.11.000Z	Epoxi	Resinas epoxi con carga, en formas previstas
3907.30.19.100Q	Epoxi	Resinas epoxi con carga
3901.10.10.100H	Adhesivo	Polietileno de densidad inferior a 0,94 lineal
3901.10.20.000M	Adhesivo	Polietileno de densidad inferior a 0,94, con carga
3901.20.19.000K	Polietileno	Polietileno de densidad superior o igual a 0,94 con carga
3901.20.29.900U	Polietileno	Polietileno de densidad superior o igual a 0,94 sin carga

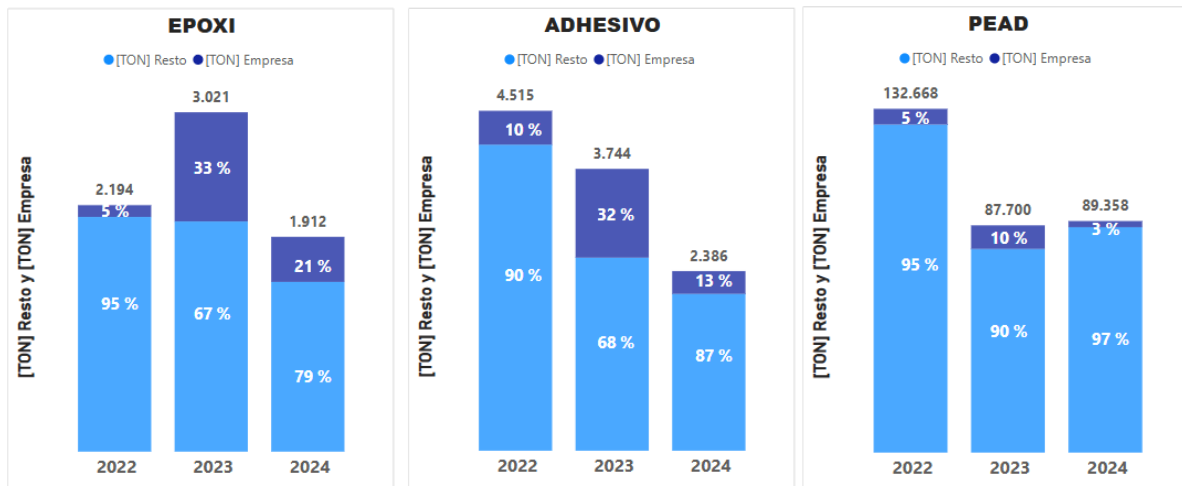
Nota: Fuente propia con datos extraídos de Softrade

Con el objetivo de analizar las operaciones comerciales de Argentina para las posiciones arancelarias nombradas anteriormente, se presentan en la Figura 10, las importaciones de estos tres componentes desde mercados de diferentes países del mundo, tomando como años de referencia 2022, 2023 y 2024.



**Figura 10.** Volumen de importaciones de cada componente en el período 2022-2024

Seguidamente, se realiza un análisis comparativo de las importaciones, en el que se distingue la empresa en estudio (Tenaris) y las demás empresas importadoras. En la Figura 11 se detallan los porcentajes de los volúmenes importados por la empresa analizada en este proyecto, en relación con el total anual importado de cada componente.

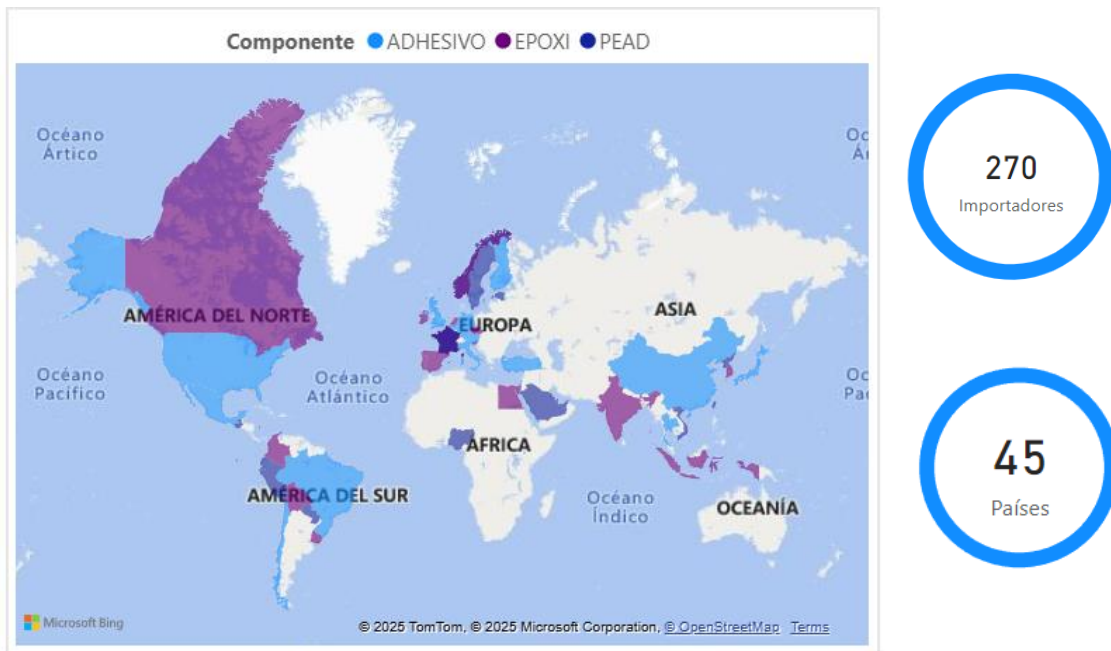


**Figura 11.** Importaciones de la empresa frente a las demás en el período 2022-2024

Al comparar las importaciones de la empresa analizada con el resto del mercado, se observa que Tenaris representa un porcentaje significativo del total importado durante el período mencionado. En particular, sus importaciones de epoxi constituyen el 21% del total, las de adhesivo el 19% y las de polietileno el 7% del total importado.

Además, se observa que los volúmenes anuales importados por Tenaris varían año a año en cada componente. Esta variabilidad depende de diversos factores, como el stock acumulado de años anteriores o la reducción de precios, lo que ha llevado a la empresa a importar y almacenar en determinadas circunstancias.

La Figura 12 muestra gráficamente el origen de las importaciones por cada componente, destacando las principales naciones exportadoras.



**Figura 12.** Países de origen de los componentes

Se identifican 270 importadores provenientes de 45 países diferentes. En el caso del componente epoxi, los principales proveedores son Brasil (48%) y Estados Unidos (29%). Para el adhesivo, la distribución es más diversificada, destacando México (29%), Brasil (22%), Estados Unidos (19%) e Italia (16%). Por último, el polietileno se concentra mayoritariamente en dos países: Brasil (51%) y Estados Unidos (43%). Si bien los proveedores provienen de diversas regiones, queda claro que Brasil y Estados Unidos son los principales proveedores de componentes para revestimientos tricapa de tubos de acero en Argentina, seguidos por otros países como México, Italia y Canadá, que también tienen una participación significativa en el mercado.

### 3.3.3.2 Volúmenes de Consumo Real.

Luego de conocer los volúmenes de las importaciones de cada componente, se debe distinguir los consumos reales de los mismos ya que no todos los tubos de acero se revisten con el método tricapa y no todos los tubos de acero requieren las mismas cantidades.

El consumo real de los componentes epoxi y adhesivo dependen directamente de la superficie revestida, es decir, del diámetro de los tubos de acero ya que no siempre será el mínimo espesor permitido según las normas (puede ser más). Para el componente de la tercera capa, el consumo real depende de la superficie a revestir y también depende del requerimiento del cliente según sea el uso del tubo de acero.

A partir de lo anterior, se analizan bases de datos de la empresa de los consumos destinados al revestimiento tricapa en un período determinado y se obtiene la información

reflejada en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Consumo de componentes para revestimiento tricapa en Tenaris

CONSUMOS REALES [KG]							
Componente	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
<b>Epoxi</b>	60.408	97.947	26.799	63.585	267.821	541.211	303.575
<b>Adhesivo</b>	78.200	55.225	20.350	58.205	275.116	554.244	315.607
<b>Polietileno</b>	383.071	249.675	102.625	403.173	2.807.014	5.644.087	3.298.110

Nota: Fuente propia con datos extraídos de la empresa

### 3.3.3.3 Tubos de Acero Revestidos.

Por otro lado, para estudiar los volúmenes de los componentes para revestir, es necesario conocer la superficie revestida, ya que esto permite estimar la producción futura. A partir de la producción de tubos de acero, se identifica la superficie total anual revestida con el sistema tricapa, según las fuentes de datos proporcionadas por la empresa.

Para especificar el análisis, se clasifican los tubos de acero en tres categorías basadas en los tamaños de sus diámetros. La empresa produce tubos que van desde diámetros muy pequeños, utilizados en aplicaciones como airbags de automóviles (1,3 pulgadas), hasta diámetros muy grandes, destinados a estructuras de alambrados, puentes y conductos (36 pulgadas). Sin embargo, para este estudio sobre revestimientos tricapa, se excluyen los tubos de diámetros pequeños que no requieren revestimiento tricapa. Las categorías establecidas son las siguientes:

- Categoría Chico: diámetros desde 2,4 a 6,6 pulgadas.
- Categoría Mediano: diámetros desde 8,6 a 16 pulgadas.
- Categoría Grande: diámetros desde 18 a 36 pulgadas.

Con esta clasificación, se obtienen los datos expresados en la Tabla 7 correspondientes a las superficies totales revestidas por año.

**Tabla 7.** Superficie total anual revestida en Tenaris

SUPERFICIE REVESTIDA [M2]							
Categoría	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
<b>Chico</b>	214.081	118.546	47.217	73.593	172.444	244.383	183.528
<b>Mediano</b>	38.281	66.310	19.995	79.214	144.426	342.301	260.099
<b>Grande</b>	-	-	-	111.927	993.363	1.584.782	1.464.785

Nota: Fuente propia con datos extraídos de la empresa

Cabe aclarar que los tubos de acero con diámetros superiores a 16 pulgadas se fabrican en una planta industrial específica, adquirida por la empresa en el año 2021. Por esta razón, no se dispone de datos sobre la superficie revestida para la categoría grande durante el período 2018-2020.

A partir de los datos sobre las superficies revestidas y las cifras de consumo real de los componentes utilizados en su revestimiento, se calcula un coeficiente que establece la relación entre los tubos de acero y el consumo de los componentes requeridos para su revestimiento. Este coeficiente permite estimar la producción futura de los componentes en estudio.

### 3.3.3.4 Pronóstico de la Demanda de los Componentes.

La proyección de demanda futura, conocida como *Forecast*, es una herramienta analítica utilizada para anticipar el comportamiento de variables claves en función de datos históricos y tendencias actuales. En este contexto, el *Forecast* se enfoca en estimar el consumo futuro del epoxi, del adhesivo y del polietileno de alta densidad, en función de los patrones de consumo registrados en períodos anteriores y el crecimiento esperado de la industria.

Se dispone de datos correspondientes a los metros cuadrados de superficie revestida y a las cantidades utilizadas de cada componente durante un mismo período. Para estudiar la conexión entre ambas variables e identificar un coeficiente de relación, se optó por aplicar el **modelo de regresión lineal simple**. Descubrir cuál es la relación entre el consumo de cada componente y el metro cuadrado de superficie es muy importante ya que la empresa cuenta con una gran variedad de diámetros de tubos y varias plantas.

El cálculo de este coeficiente de relación lineal se lleva a cabo utilizando la herramienta PowerBI que permite integrar, transformar y analizar grandes volúmenes de datos relacionados con el consumo de materiales y las superficies revestidas.

Según Hernández-Lalinde (2019), al considerar una variable respuesta “Y” y un regresor “X”. La relación lineal entre Y y X queda definida a partir de la siguiente expresión:

$$Y = \beta_0 + \beta_1.X + \varepsilon$$

donde  $\beta_0$  y  $\beta_1$  son los coeficientes de regresión o parámetros del modelo y  $\varepsilon$  es el componente del error o perturbación aleatoria. En este caso:

- Y: cantidad en kilogramos de componente utilizado, variable dependiente.
- X: cantidad en metros cuadrados de superficie revestida, variable independiente.
- $\beta_0$ : intercepto (valor de Y cuando X=0).
- $\beta_1$ : pendiente (coeficiente de relación lineal entre X y Y).
- $\varepsilon$ : término de error.

Además, se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- ✓ El consumo de cada componente aumenta proporcionalmente con la superficie revestida, por lo tanto, existe una relación lineal entre X e Y.
- ✓ El intercepto  $\beta_0$  es cercano a cero, ya que cuando  $X=0$ , Y también es cercano a 0 (es decir, sin superficie revestida, no hay consumo).
- ✓ Los puntos en el gráfico de dispersión (X,Y) se ajustan a una línea recta sin desviaciones, por lo tanto  $\epsilon$  es cercano a 0.
- ✓ Para evitar generalizaciones, se decide calcular un coeficiente de relación lineal para cada componente y para cada categoría de tamaño de tubo de acero.

Si se asumen las suposiciones mencionadas, el modelo puede simplificarse a calcular un cociente directo entre Y y X, resultando en la siguiente ecuación:

$$Y = \beta_1.X$$

Por lo tanto, en este caso, el coeficiente de relación lineal entre X e Y se calcula de la siguiente manera:

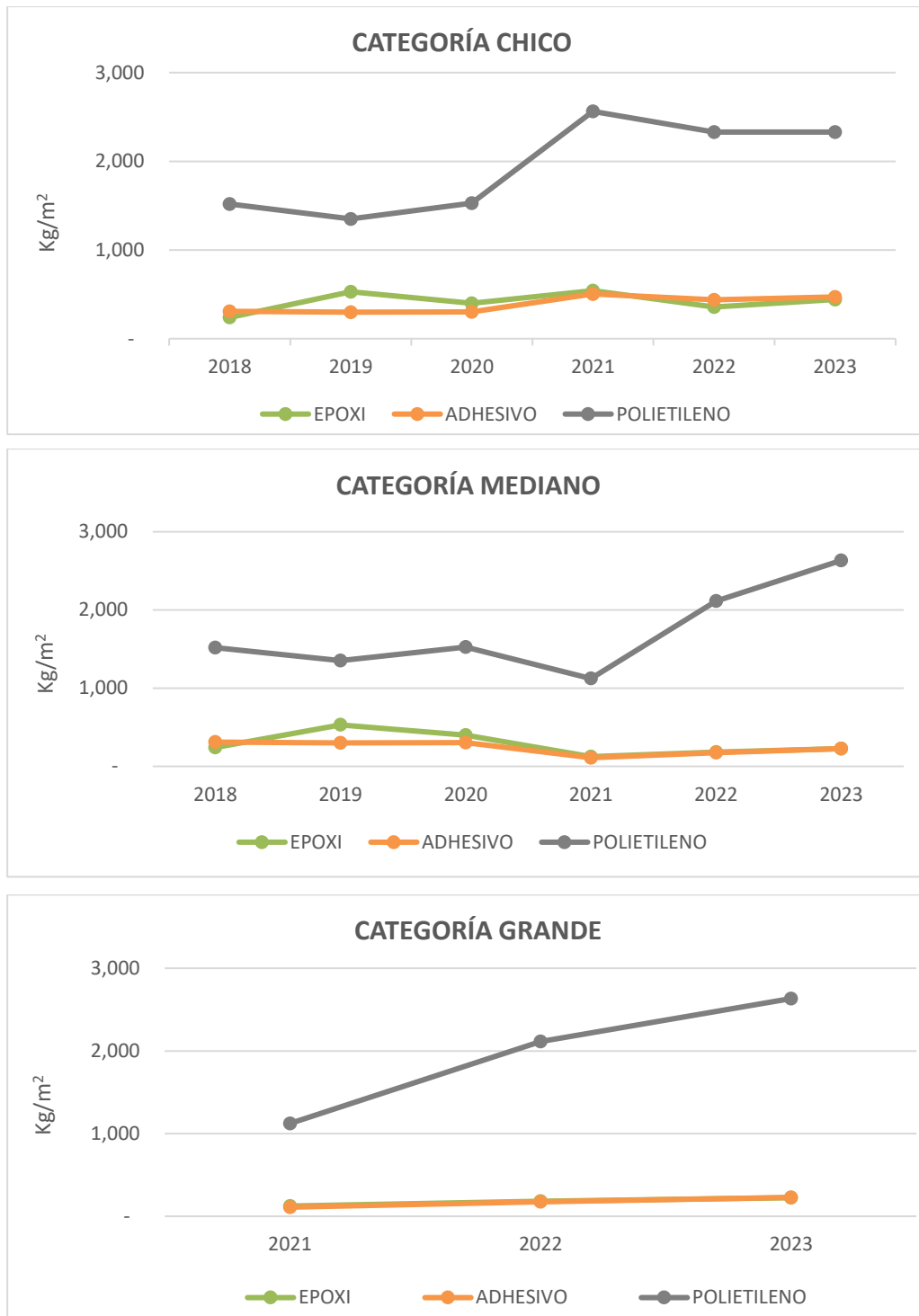
$$\text{Coeficiente de relación lineal} = \frac{\text{Kilogramos de componente consumido}}{\text{Metros cuadrados de superficie revestida}} \quad (1)$$

Al aplicar la fórmula (1) a las bases de datos, se obtienen los coeficientes de relación lineal correspondientes a cada componente según la categoría de diámetros. Se calculan sus promedios correspondientes presentados en la Tabla 8.

**Tabla 8.** *Coefficientes de relación lineal*

	RELACIÓN [KG] / [M2]		
	Epoxi	Adhesivo	PEAD
<b>Chico</b>	0,418	0,388	1,937
<b>Mediano</b>	0,283	0,237	1,711
<b>Grande</b>	0,177	0,171	1,957

Al representarlos gráficamente por año en la Figura 13, se observa principalmente que la relación entre el consumo de cada componente y la superficie revestida es mayor en el polietileno y menor en el epoxi y el adhesivo. Esto se explica por los espesores mínimos requeridos para el revestimiento tricapa, conforme a las normas analizadas en el capítulo 3.2.

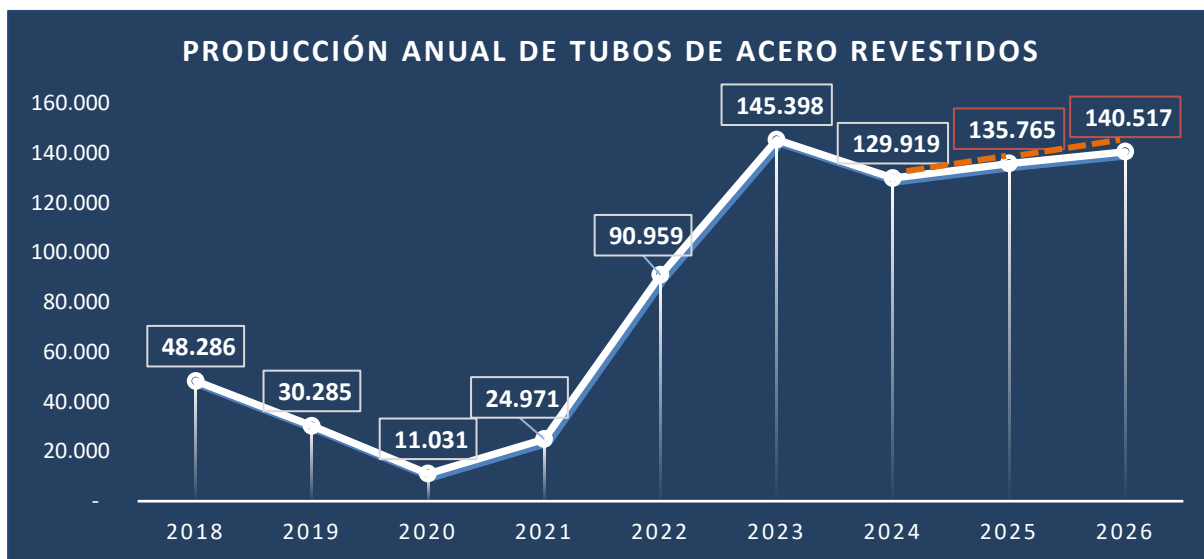


**Figura 13.** Evolución de relación lineal por categoría

Además, se observa que el consumo de epoxi y adhesivo es prácticamente constante y sigue un comportamiento similar en todos los casos. En cambio, el consumo de polietileno varía, ya que su cantidad aplicada depende de los requerimientos específicos de cada cliente, no así para el caso del epoxi y del adhesivo. En particular, en la tercera imagen de la Figura 13, se ve que la curva correspondiente al epoxi y la del adhesivo son prácticamente iguales.

Por otro lado, se observa que la relación varía según cada categoría, lo cual tiene explicación en la práctica: los tubos de menor diámetro se revisten en una planta más antigua, lo que genera mayores descartes y un mayor consumo de componentes debido a las deficiencias en el proceso.

A partir de la estimación de la producción futura de unidades de tubos de acero para los años 2025 y 2026 presentada en la Figura 14, se determina la superficie revestida correspondiente. Luego, utilizando los coeficientes de relación previamente calculados, se estima la cantidad de cada componente requerida para los próximos dos años.



**Figura 14.** Producción y estimación de tubos de acero revestidos

Por lo analizado, se puede afirmar que la cantidad necesaria de cada componente para los próximos dos años es la estimada en la Tabla 9, cumpliendo así el objetivo de estudiar la demanda de estos componentes.

**Tabla 9.** Cantidades necesarias estimadas por componente

Año	Categoría	TON Epoxi	TON Adhesivo	TON PEAD
<b>2025</b>	Chico	80	74	371
	Mediano	77	64	465
	Grande	321	311	3.555
<b>2026</b>	Chico	84	78	388
	Mediano	80	67	486
	Grande	336	325	3.715
<b>TOTALES [TON]</b>		<b>979</b>	<b>919</b>	<b>8.980</b>

### 3.4 Análisis de Factibilidad Técnica

Para analizar la factibilidad técnica de este proyecto, se estudian las etapas del proceso productivo de los componentes epoxi y polietileno de alta densidad. Este análisis permite identificar la infraestructura, los recursos tecnológicos y las condiciones operativas para llevar a cabo el proceso.

Con el objetivo de optimizar el alcance del estudio y enfocar los recursos analíticos en los componentes de mayor complejidad, se decidió centrar el análisis exclusivamente en el epoxi y el PEAD, excluyendo el adhesivo como insumo clave a desarrollar localmente. Esta decisión también se debe a que actualmente se produce en Argentina un adhesivo para revestimiento externo tricapa, ya homologado por la empresa en estudio, el cual puede utilizarse para completar la terna local.

Cabe destacar que la empresa cuenta con una planta propia y dispone del espacio suficiente para la instalación de los procesos productivos y su almacenamiento, lo que representa una ventaja significativa en términos de infraestructura, logística y costos.

#### 3.4.1 Diagramas de Flujo de los Componentes

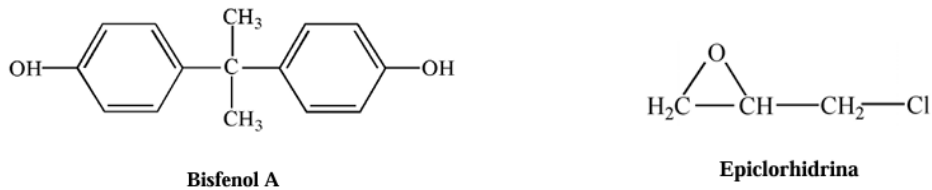
##### 3.4.1.1 Diagrama de Flujo del Epoxi.

Como se explicó en el capítulo 3.1.1, el epoxi o FBE es un polvo compuesto principalmente por los siguientes componentes:

- ✓ Resina epoxi
- ✓ Agente de curado
- ✓ Cargas y pigmentos
- ✓ Aditivos

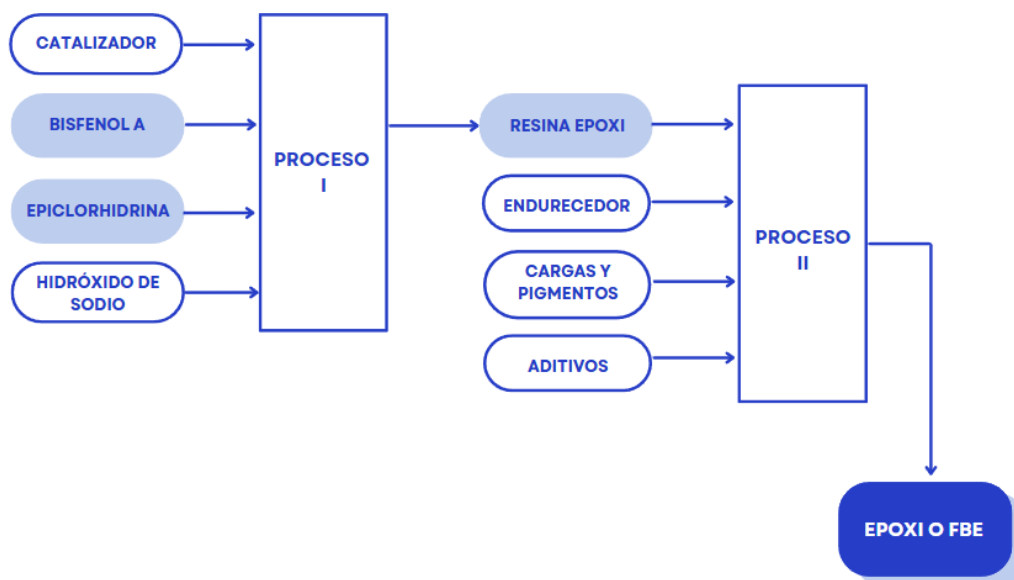
Aunque la mayoría de los proveedores locales de FBE importan la resina epoxi, en este proyecto se plantea la opción de producirla localmente, en función de su síntesis química y procesos industriales.

La producción más común de resina epoxi se obtiene a partir del bisfenol A por reacción con la epiclorhidrina, materias primas presentadas en la Figura 15. Se obtiene así una molécula con grupos funcionales de óxido de etileno generalmente en los extremos (grupos epoxi) y eventualmente grupos hidroxilo.



**Figura 15.** Materias primas empleadas en la elaboración de resina epoxídicas (Giudice & Pereyra, 2009)

Cabe mencionar que estas dos materias primas no están disponibles en Argentina, por lo que habría que importarlas. Además de estos dos componentes básicos para la producción de resina epoxi, se necesita hidróxido de sodio (NaOH), que actúa como reactivo en el proceso de epoxidación. En resumen, todas las materias primas necesarias para la obtención del epoxi o FBE, se representan en la Figura 16.



**Figura 16.** Diagrama de componentes para la obtención de epoxi

Nota: Fuente propia. Diagrama adaptado para representar el flujo de insumos siguiendo criterios visuales propios, complementados con principios establecidos por la norma ISO 10628.

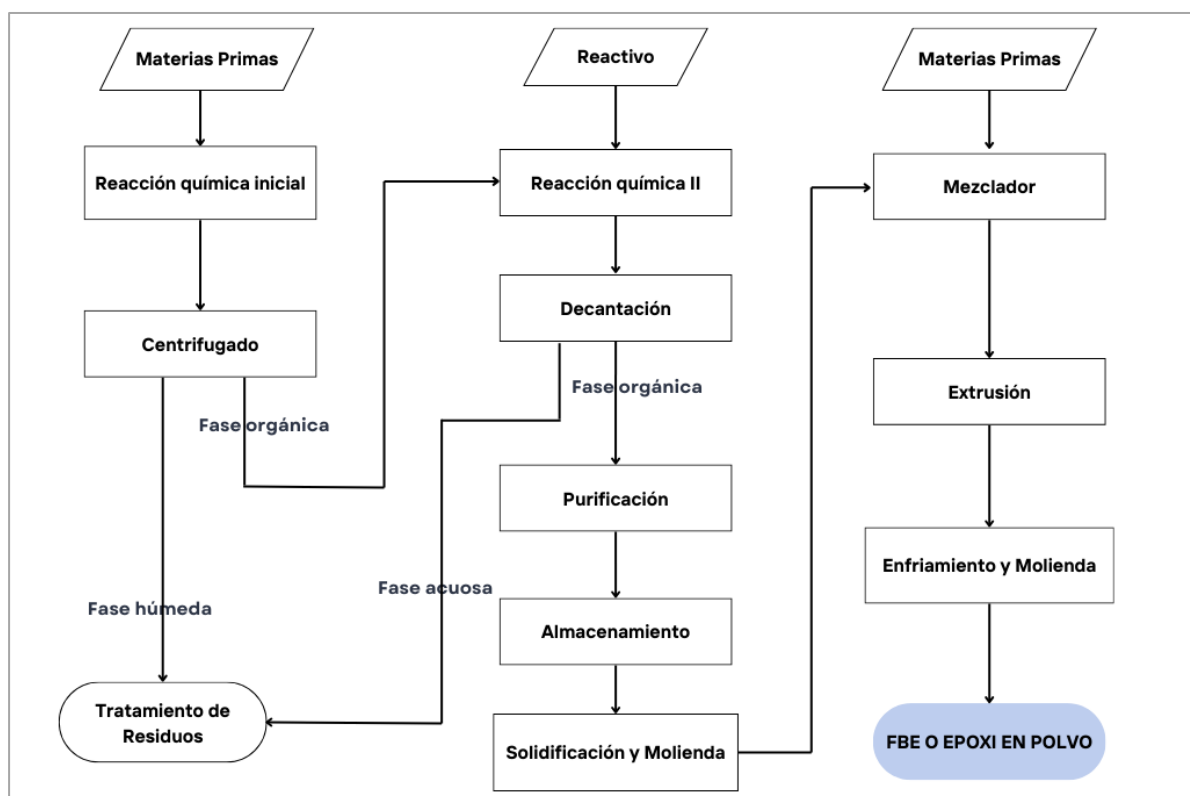
El siguiente proceso de producción se basa en el estudio del procedimiento para fabricar resinas epoxi líquidas. El mismo está representado en la Figura 17.

En la etapa inicial, se mezclan bisfenol A y epichlorhidrina en un reactor con agitación y temperatura controlada, en presencia de un catalizador aniónico, lo que da como resultado un intermedio halohidrina. Luego, se agrega hidróxido de sodio en una cantidad menor a la estequiométrica, lo que permite la eliminación de cloruro de sodio y la formación de los grupos epoxi en la molécula. El reactor opera a baja presión (vacío) y temperatura controlada, lo que permite la evaporación del agua y la epihalohidrina remanente.

Durante la reacción con hidróxido de sodio, se forma una sal sólida suspendida en la mezcla líquida, la cual, tras la evaporación, se dirige a una centrifuga o filtro prensa, donde se separan una corriente de sal húmeda, por un lado, y se filtra la fase orgánica líquida que contiene la resina epoxi en proceso.

En la siguiente etapa, se añade una mayor cantidad de hidróxido de sodio y agua para impedir la formación de polímeros insolubles y permitir la eliminación de impurezas iónicas, completando la reacción. La mezcla resultante se dirige a un decantador, donde se obtiene una fase acuosa (que contiene sales disueltas) y una fase orgánica, que corresponde a la resina epoxi con epihalohidrina remanente.

Finalizada la etapa anterior, se extrae la epihalohidrina sin reaccionar mediante destilación y la resina se somete a un lavado con agua para eliminar impurezas. Por último, el producto purificado, con un bajo contenido de impurezas y haluros hidrolizables, se almacena en un tanque listo para su uso.



**Figura 17.** Diagrama de flujo del proceso de fabricación de FBE

Nota: Fuente propia. Diagrama elaborado conforme a la norma ISO 5807.

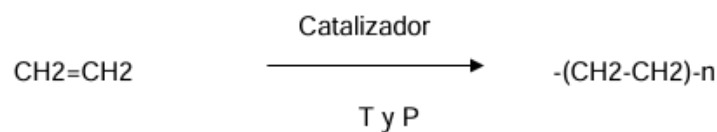
Como se observa en la Figura 17, tras obtener la resina epoxi líquida, el siguiente paso es solidificarla, ya que en la fabricación del FBE en polvo es importante que tanto la resina epoxi como el agente de curado sean sólidos a temperatura ambiente.

Una vez en estado sólido, la resina se muele hasta obtener un polvo fino, que luego se mezcla con los demás componentes que le otorgarán las propiedades necesarias para su uso como revestimiento: endurecedor en polvo, cargas, pigmentos y aditivos. Esta mezcla homogénea se introduce en un extrusor, donde se calienta para fundir todos los componentes y asegurar una dispersión uniforme.

Luego, la mezcla extruida se enfría rápidamente en rodillos enfriadores para evitar la formación de grumos, lo que permite mantener una granulometría uniforme. Finalmente, el material se muele hasta obtener un polvo fino listo para su aplicación electrostática sobre los tubos de acero.

### 3.4.1.2 Diagrama de Flujo del Polietileno.

El polietileno de alta densidad (PEAD) es un polímero que se forma mediante la polimerización del monómero de etileno. La polimerización del etileno da lugar a la formación de una cadena larga de unidades repetitivas de etileno, lo que resulta en la estructura del polietileno. Dependiendo de las condiciones de polimerización y de otros factores, se obtienen diferentes tipos de polietileno, entre ellos el polietileno de alta densidad. La reacción general de polimerización del polietileno es la siguiente:



En ésta, como en cualquier reacción química, intervienen las variables de reacción como lo son la temperatura, presión y tipo de catalizador, el cual es una sustancia que acelera la velocidad de la reacción química sin sufrir en sí ningún cambio químico. Los catalizadores utilizados para la obtención de PEAD tienen en común que trabajan a temperaturas y presiones relativamente bajas, y producen un material de bajo nivel de derivación y alta densidad. Uno de los catalizadores más utilizados para la producción de polietileno de alta densidad es el Ziegler-Natta, el cual se emplea en este proceso.

Según García (2009), se utilizan dos tipos principales de procesos para fabricar polietileno de alta densidad:

- Proceso en suspensión («slurry»): permite fabricar PEAD de distribución amplia del peso molecular.
- Proceso en fase gaseosa: permite fabricar PEAD de distribución reducida del peso molecular.

En este caso se analiza el proceso en suspensión ya que se destaca por su control preciso del peso molecular, su distribución y por minimizar las impurezas, lo que asegura un PEAD

con excelente resistencia mecánica y propiedades térmicas óptimas para los revestimientos de tuberías en condiciones exigentes.

En la Figura 18 se muestra un diagrama de flujo de un proceso típico moderno en suspensión con un reactor de agitación continua. La temperatura de reacción varía entre 80 y 90 °C, y se emplea hexano como diluyente.

Cabe destacar que la materia prima principal para este proceso, el etileno, es un gas derivado del petróleo, cuya disponibilidad depende de la proximidad a gasoductos conectados a yacimientos petrolíferos. En Argentina, existe una única empresa productora de polietileno de alta densidad, que además se autoabastece al producir también su propio etileno. Esta empresa opera en cuatro plantas industriales ubicadas en la provincia de Buenos Aires. Por lo tanto, a los fines de este proyecto, se considera que dicha empresa provee el etileno necesario para el proceso.

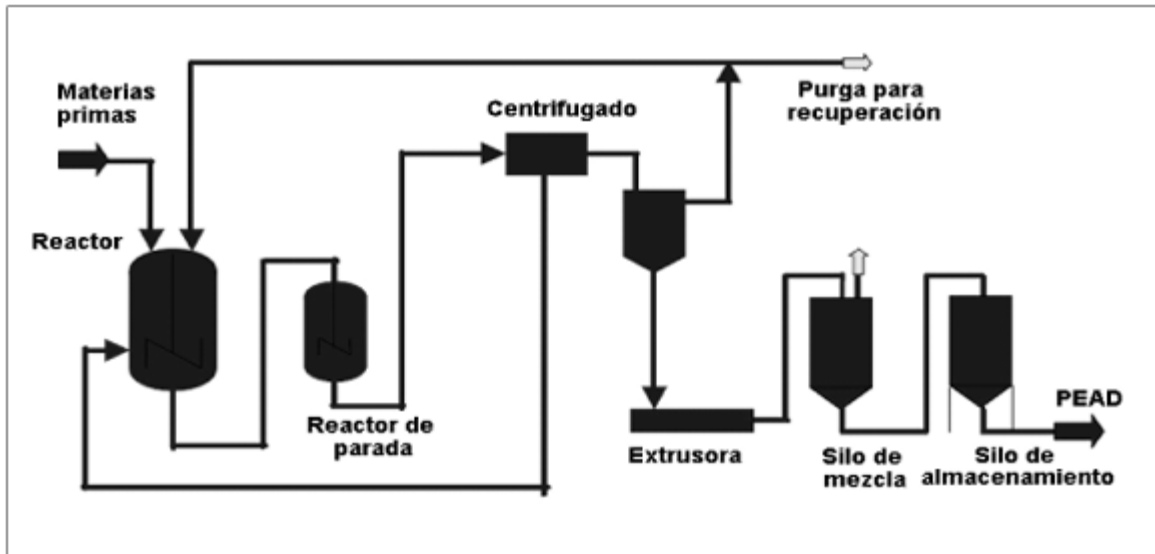
La polimerización se efectúa por la mezcla de etileno e hidrocarburos disolventes en un catalizador de lecho fijo, para después separar el polímero del hidrocarburo disolvente. El polietileno obtenido se caracteriza por una estructura lineal y de gran densidad.

Se añade al reactor una cantidad controlada de monómero de etileno, un comonómero e hidrógeno, así como la suspensión de una mezcla de catalizador/cocatalizador. Otro suministro al reactor es diluyente reciclado.

En el reactor de parada, el etileno disuelto ya se ha consumido casi completamente. El etileno restante se puede recuperar y volver a enviar a un fraccionador cercano. Después de abandonar el reactor, el slurry\* de polímero pasa a un proceso de centrifugado que elimina la mayor parte del disolvente. El disolvente separado se vuelve a introducir en el reactor.

En un secador de lecho fluidizado, el polímero se seca en un flujo de nitrógeno caliente y se libera del disolvente restante. El disolvente se puede condensar del gas de salida del secador de lecho fluidizado para reciclarlo posteriormente. Luego, se extrae un pequeño flujo de purga, que contiene principalmente nitrógeno, del flujo de reciclaje del lecho fluidizado para controlar la acumulación de material inerte ligero y venenos para el catalizador. Por último, este gas de purga se suele enviar a un quemador. (García, 2009)

\*Slurry: mezcla de polímero (PEAD) en suspensión dentro del diluyente en el reactor.



**Figura 18.** Diagrama de flujo de un proceso de PEAD con reactor de agitación continua (García, 2009)

Finalmente, el proceso incluye una extrusora para el moldeado del polímero y silos destinados a la mezcla y almacenamiento del producto final.

### 3.4.2 Matriz de Leopold

La aplicación de los conocimientos en ingeniería ambiental resulta esencial para la protección del medio ambiente y la adecuada gestión de los recursos. Dentro de las herramientas de evaluación de impacto ambiental (EIA), se encuentra la Matriz de Leopold que permite identificar y analizar los efectos que un proyecto puede generar en el entorno.

Se implementa una matriz basada en el análisis cualitativo de las relaciones causa-efecto. En la misma se podrá encontrar la siguiente información:

- Las columnas representan las acciones del hombre que se deben llevar a cabo para realizar el proyecto y que son capaces de alterar al medio ambiente.
- Las filas representan las características o factores ambientales que pueden verse alterados por tales acciones humanas.

Los factores ambientales que se evalúan en la matriz son los que se describen en la siguiente Tabla 10.

**Tabla 10. Factores ambientales para la Matriz de Leopold**

<b>Medio Natural</b>	Aire	Olor
		Materiales en suspensión
		Ruidos
	Agua	Calidad de agua subterránea
		Calidad de agua superficial
	Suelo	Calidad del suelo
	Biología	Fauna
Flora		
Geografía Urbana	Paisaje	
<b>Medio Socioeconómico</b>	Aspectos de Salud	Riesgos de accidentes
	Aspectos Económicos	Generación de empleos

Estos factores se analizan en las etapas y sus correspondientes acciones asociadas, detalladas en la Tabla 11.

**Tabla 11. Acciones asociadas a cada etapa productiva**

PROCESO	ETAPAS	ACCIONES ASOCIADAS
<b>Producción de Epoxi</b>	Preparación de la materia prima	Manipulación de sustancias peligrosas.
	Reacciones químicas	Generación de residuos químicos líquidos y residuos sólidos. Emisiones volátiles.
	Purificación y almacenamiento	Generación de residuos líquidos. Manejo de residuos peligrosos.
	Solidificación y molienda de la resina epoxi	Emisión de partículas finas. Consumo energético alto.
	Mezclado y extrusión	Emisión de compuestos orgánicos volátiles (COV). Consumo energético alto. Generación de restos de resina endurecida.
	Enfriamiento y molienda del FBE	Generación de polvo fino. Consumo energético alto.
<b>Producción de PEAD</b>	Preparación de la materia prima	Emisiones de vapores de etileno e hidrocarburos. Generación de residuos de catalizadores y estabilizadores.
	Polimerización del PEAD	Emisión de vapores residuales y compuestos orgánicos volátiles (COV). Generación de

	residuos de catalizadores y efluentes líquidos con restos de polímero y solventes.
Separación y purificación	Generación de aguas residuales con compuestos orgánicos. Emisiones de gases residuales. Posibles pérdidas de solventes recuperables.
Secado y acondicionamiento del PEAD	Emisión de vapores de solventes y partículas de PEAD en suspensión.
Extrusión y pelletizado	Emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV). Generación de residuos de purga de extrusión y alto consumo energético.

Para determinar la importancia del impacto, se realiza un análisis cualitativo de los factores con cada una de las acciones mencionadas anteriormente. Algunos factores afectarán más que otros en cuanto a magnitud, por lo que se propone una escala de colores en función de la valoración determinada en la Tabla 12.

**Tabla 12.** Valorización

IMPACTO	CATEGORÍA	VALOR
<b>Negativo</b>	Irrelevante	1
	Moderado	2
	Severo	3
	Crítico	4
<b>Neutro</b>	Neutro	5
<b>Positivo</b>	Beneficioso	6
	Muy beneficioso	7
	Sumamente beneficioso	8

A continuación, la Tabla 13 presenta la matriz resultante del análisis antes mencionado.

**Tabla 13. Matriz de Leopold**

			PRODUCCION DE EPOXI						PRODUCCION DE PEAD				
			Preparación de MP	Reacciones químicas	Purificación y almacenamiento	Solidificación y molienda	Mezclado y extrusión	Enfriamiento y molienda	Preparación de MP	Polimerización	Separación y purificación	Secado y acondicionamiento	Extrusión y pelletizado
Medio Natural	Aire	Olor	2	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
		Materiales en suspensión	1	2	1	3	3	3	1	1	2	2	3
		Ruidos	1	1	1	3	2	3	1	1	2	1	3
	Agua	Calidad de agua subterránea	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1
		Calidad de agua superficial	1	3	2	1	1	2	2	1	1	2	2
	Suelo	Calidad del suelo	2	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1
	Biología	Fauna	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		Flora	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Geografía Urbana	Paisaje	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Medio Socioeconómico	Aspectos de Salud	Riesgos de accidentes	4	3	1	1	3	1	2	3	1	2	1
	Aspectos	Generación de empleos	7	8	6	7	8	7	8	7	6	6	8

Con el estudio del impacto ambiental realizado mediante la matriz previamente expuesta, se identifica que los factores más afectados por impactos negativos están relacionados con el proceso productivo del epoxi. Esto se debe a que la epiclohidrina, un compuesto tóxico y peligroso, presenta riesgos durante su manipulación y operación. También el hidróxido de sodio, por sus características corrosivas y tóxicas, representa un riesgo en el proceso. Además, una gestión inadecuada de los residuos podría provocar una contaminación tanto en el agua como en el aire.

Luego de este análisis, se propone plantear medidas para garantizar una gestión adecuada y responsable de los residuos líquidos y sólidos, definiendo un correcto tratamiento de residuos para cada caso. También se propone tener en cuenta la implementación de sistemas de ventilación eficientes que prevengan la acumulación de vapor de solventes.

Por otro lado, entre los impactos positivos se destaca la generación de empleo en la zona de la planta y alrededores. Dado que el proceso productivo involucra diversas etapas, se requerirá tanto personal técnico especializado como operarios generales, contribuyendo al desempleo.

## 4. METODOLOGÍA DE COSTEO POR PROCESO

En esta segunda parte del proyecto, se aplica la metodología de costeo por procesos, lo que permite asignar de manera estimada los costos asociados a la producción de cada componente. Para las distintas etapas de producción, se clasifican los costos en:

- Materiales directos (MD): Materias primas principales como resinas, etileno, solventes, catalizadores, etc.
- Mano de obra directa (MOD): Costos salariales del personal.
- Costos indirectos de fabricación (CIF): Energía eléctrica, agua, mantenimiento, controles de calidad, depreciación de maquinaria y equipos.

Cada etapa acumula costos y el costo unitario se obtiene dividiendo el costo total del proceso entre la cantidad de unidades producidas, como se observa en la fórmula (2). Se toma como período de tiempo un mes, lo que permite establecer una base uniforme para la asignación de costos en los distintos procesos.

$$\text{Costo Unitario (USD/Kg)} = \frac{\text{Costo total del proceso}}{\text{Cantidad de unidades producidas}} \quad (2)$$

Dónde:

- Costo total del proceso = MD + MOD + CIF
- Cantidad de unidades producidas = Kilogramos de FBE o PEAD obtenidos

Estos costos se encuentran clasificados a continuación en las Tablas 14 y 15, para cada componente, según sus etapas.

**Tabla 14.** Costos asociados a cada etapa productiva del epoxi

Etapas	Equipamiento	EPOXI		
		MD	Costos MOD	CIF
<b>Reacción química inicial</b>	- Reactor químico con agitación - Centrifuga o filtro prensa	- Bisfenol A - Epiclorhidrina - Catalizador aniónico - Hidróxido de sodio	Personal especializado	- Energía eléctrica - Agua - Depreciación - Mantenimiento - Calidad
<b>Reacción química II</b>	- Reactor químico con agitación - Decantador	- Hidróxido de sodio	Personal especializado	- Energía eléctrica - Depreciación - Mantenimiento - Calidad
<b>Purificación y almacenamiento</b>	- Destilador - Tanque de almacenamiento		Personal	- Energía eléctrica - Agua - Depreciación - Mantenimiento - Calidad
<b>Solidificación y molienda</b>	- Horno de curado - Molino		Personal	- Energía eléctrica - Depreciación - Mantenimiento - Calidad
<b>Mezclado y extrusión</b>	- Mezclador - Extrusora	- Aminas - Cargas y pigmentos - Aditivos	Personal especializado	- Energía eléctrica - Depreciación - Mantenimiento - Calidad
<b>Enfriamiento y molienda del FBE</b>	- Rodillos enfriadores - Molino		Personal	- Energía eléctrica - Agua - Depreciación - Mantenimiento - Calidad

**Tabla 15.** Costos asociados a cada etapa productiva del PEAD

POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD				
Etapas	Equipamiento	Costos		
		MD	MOD	CIF
<b>Polimerización</b>	- Reactor químico con agitación - Reactor de parada	- Etileno - Comonomero - Hidrógeno - Diluyente	Personal especializado	- Energía eléctrica - Agua - Depreciación - Mantenimiento - Calidad
<b>Separación y purificación</b>	- Centrifuga		Personal especializado	- Energía eléctrica - Depreciación - Mantenimiento - Calidad
<b>Secado y acondicionamiento</b>	- Secador de lecho fluidizado		Personal especializado	- Energía eléctrica - Depreciación - Mantenimiento - Calidad
<b>Extrusión y pelletizado</b>	- Extrusora - Silo de mezcla - Silo de almacenamiento		Personal	- Energía eléctrica - Depreciación - Mantenimiento - Calidad

## 4.1 Materiales Directos

Con el objetivo de estimar las cantidades necesarias de cada uno de los materiales directos (MD) requeridos en los procesos productivos, se realizan balances de masa en cada etapa.

Para cualquier sistema, la ecuación general de balance de masa puede escribirse como:

$$\text{Entradas} = \text{Salidas} + \text{Acumulación}$$

Dado que se considera un proceso continuo y en estado estacionario, la acumulación es cero, por lo que la ecuación se reduce a:

$$\text{Entradas} = \text{Salidas}$$

En este análisis, se asume que, aunque existen reacciones químicas dentro del sistema, no se consideran los efectos específicos de la generación o consumo de materiales por dichas reacciones. A fines prácticos, se realiza un balance de masa de forma simplificada, donde sólo se consideran los flujos de entrada y salida, y se tienen en cuenta los porcentajes de pérdidas o desperdicios sin profundizar en las transformaciones químicas exactas.

Los porcentajes de rendimientos se estiman utilizando un criterio basado en las condiciones operativas normales, tomando como referencia los promedios de desempeños de cada tipo de equipo en la industria. Estos valores ayudan a reflejar de manera realista cómo se comporta el proceso en condiciones industriales, garantizando que el balance de masa sea coherente con una operación viable desde el punto de vista técnico.

#### **4.1.1 Balance de Masa del Epoxi**

Para el caso del epoxi, se lleva a cabo un balance de masa tomando como referencia el proceso productivo de una empresa argentina productora de resina epoxi. Se toma como punto de partida el flujo de salida del proceso, representado en la Figura 17. Con el objetivo de alcanzar la producción total estimada en la Tabla 9, se define el siguiente flujo para lograr una producción mensual de 40,8 toneladas. A partir de este valor, los cálculos se realizan en sentido inverso, desde el final del diagrama hacia el inicio.

Se asume que en la etapa de enfriamiento y molienda se pierden polvos demasiados finos y material que se adhiere a la maquinaria, por lo que se considera un 5% de pérdida en esta etapa.

$$\text{Cantidad a la salida de la extrusora} = \frac{40,8}{95\%} = 42,95 \text{ TN}$$

Al considerar la pérdida en la extrusión, se estima un rendimiento aproximado de 98%.

$$\text{Cantidad a la salida del mezclador} = \frac{42,95}{98\%} = 43,82 \text{ TN}$$

Con respecto al mezclador, en general, la formulación de un FBE en polvo se compone aproximadamente de un 60% de resina epoxi, un 10% de endurecedor, un 25% de cargas y aditivos y un 5% de pigmentos. Esta composición es coherente con lo descrito en la patente estadounidense US8679632B2, que detalla rangos típicos de composición para recubrimientos epoxi. Se puede asumir un rendimiento del 99% en el mezclador, por lo que:

$$\text{Cantidad a la entrada del mezclador} = \frac{43,82}{99\%} = 44,27 \text{ TN}$$

A partir de la composición del FBE en el mezclador y el flujo de entrada calculado, las cantidades resultantes son:

$$\text{Resina epoxi sólida} = 44,27 \times 0,60 = 26,56 \text{ TN}$$

$$\text{Endurecedor} = 44,27 \times 0,10 = 4,43 \text{ TN}$$

$$\text{Cargas y aditivos} = 44,27 \times 0,25 = 11,07 \text{ TN}$$

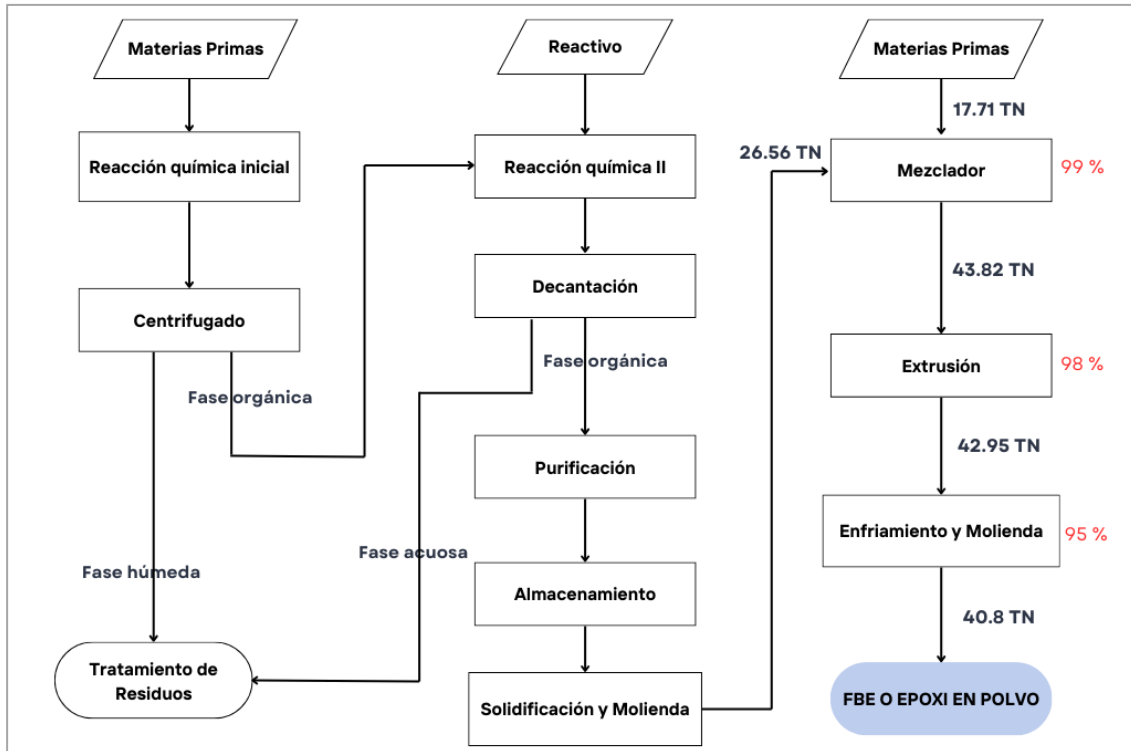
$$\text{Pigmentos} = 44,27 \times 0,05 = 2,21 \text{ TN}$$

La suma de las toneladas de endurecedor, cargas, aditivos y pigmentos da como resultado

el siguiente flujo de entrada de materia prima:

$$\text{Cantidad de materia prima 2} = 4,43 + 11,07 + 2,21 = 17,71 \text{ TN}$$

En la Figura 19, se presentan todos los valores obtenidos hasta este punto.



**Figura 19.** Diagrama de flujo del proceso de FBE con volúmenes parciales estimados

Luego, se considera un rendimiento del 95% en el proceso de solidificación y molienda, dado que normalmente hay pérdidas asociadas a la evaporación de solventes residuales y pérdidas en el proceso de molienda. Por lo tanto, la cantidad de resina epoxi líquida obtenida es:

$$\text{Cantidad de resina epoxi líquida} = \frac{26,56}{95\%} = 27,96 \text{ TN}$$

Las pérdidas en el almacenamiento y en el proceso de purificación suelen ser bajas. Por ello, en este caso se supone una pérdida del 0,5% para el almacenamiento y del 3% para la etapa de purificación.

$$\text{Resina a la entrada del almacenamiento} = \frac{27,96}{99,5\%} = 28,10 \text{ TN}$$

$$\text{Resina antes de la purificación} = \frac{28,10}{97\%} = 28,97 \text{ TN}$$

Además, se estima una pérdida del 2% en el decantador, correspondiente a la fase acuosa descartada.

$$\text{Resina antes de la decantación} = \frac{28,97}{98 \%} = 29,56 \text{ TN}$$

$$\text{Fase acuosa} = 29,56 - 28,97 = 0,59 \text{ TN}$$

La cantidad de NaOH se determina a partir de la reacción de deshidrohalogenación en proporción 1:1 con el intermedio halodrina. Dado que la salida del reactor es 29,56 TN, y con una masa molar de 340 g/mol para la resina epoxi, se calcula la cantidad estequiométrica de NaOH, lo que da como resultado 3,48 TN.

Según Young (2013), se añade NaOH en 80-95% de la cantidad estequiométrica en la primera fase y un exceso en la segunda. Por lo tanto, a modo estimado, se calculan las cantidades de NaOH en ambos reactores.

$$\text{Cantidad de NaOH en la primera reacción} = 3,48 \times 0,85 = 2,96 \text{ TN}$$

$$\text{Cantidad de NaOH en la segunda reacción} = 3,48 \times 0,15 = 0,52 \text{ TN}$$

Esto significa que la cantidad de reactivo que ingresa a la segunda reacción química es de 0,52 toneladas.

Dado que las pérdidas en ambos reactores están tenidas en cuenta en el decantador y centrifugador correspondiente, el flujo de fase orgánica que ingresa al segundo reactor es la diferencia entre el flujo de salida y la cantidad de reactivo que ingresa. Esto da un resultado de 29,04 TN.

$$\text{Cantidad que ingresa en la segunda reacción} = 29,56 - 0,52 = 29,04 \text{ TN}$$

En la etapa de centrifugado, se asume un 96% de rendimiento para la fase orgánica que reacciona con el catalizador y, por lo tanto, un 4% de descarte en la fase húmeda.

$$\text{Resina antes del centrifugado} = \frac{29,04}{96 \%} = 30,25 \text{ TN}$$

$$\text{Fase húmeda} = 30,25 - 29,04 = 1,21 \text{ TN}$$

Young (2013) sostiene que, para la obtención de la resina epoxi líquida, la alimentación al primer reactor se compone por:

- Bisfenol A (BPA) → 21,5% en peso
- Epiclorhidrina (ECH) → Relación molar de 5:1 a 10:1 con BPA
- Catalizador → 0,214% en peso

De acuerdo con los porcentajes en peso de bisfenol A y catalizador, las cantidades resultantes son:

$$\text{Cantidad de Bisfenol A} = 30,25 \times 0,215 = 6,50 \text{ TN}$$

$$\text{Cantidad de Catalizador} = 30,25 \times 0,00214 = 0,064 \text{ TN}$$

Para determinar la cantidad de epiclorhidrina (ECH) requerida, se calcula la diferencia entre el flujo de salida y la suma de las tres materias primas previamente estimadas. Luego, se verifica si la relación molar se encuentra dentro del rango establecido. La cantidad de ECH que debe ingresar al reactor es:

$$\text{Cantidad de Epiclorhidrina} = 30,25 - 2,96 - 6,50 - 0,064 = 20,73 \text{ TN}$$

Dado que no toda la ECH reacciona, se estima que el 85% de la epiclorhidrina reacciona y el 15% queda como exceso.

$$\text{Cantidad de ECH que reacciona} = 20,73 \times 0,85 = 17,62 \text{ TN}$$

Por otro lado, la masa molar del ECH es 92,52 g/mol. Por lo tanto:

$$\text{Moles de ECH} = \frac{1,7 \times 10^7}{92,52} = 1,9 \times 10^5 \text{ moles}$$

La masa molar del BPA es 228,29 g/mol. Dado que la cantidad necesaria de BPA es 6,50 TN ( $6,5 \times 10^6$  g), entonces:

$$\text{Moles de BPA} = \frac{6,5 \times 10^6}{228,29} = 2,8 \times 10^4 \text{ moles}$$

Para calcular la relación molar entre ECH y BPA, se obtiene el cociente entre ambos moles, resultando en un valor de 6,7. Esto indica que la relación molar en este caso se encuentra dentro del rango de 6:1 a 7:1, lo que significa que por cada mol de BPA se requieren entre 6 y 7 moles de ECH.

Luego de esta verificación, se puede concluir que la cantidad de materias primas que ingresan al primer reactor es la suma de los componentes calculados.

$$\text{Cantidad de materia prima 1} = 2,96 + 6,50 + 0,064 + 20,73 = 30,25 \text{ TN}$$

Finalmente, en la Figura 20 se representan los flujos recientemente calculados, con sus respectivos volúmenes estimados.

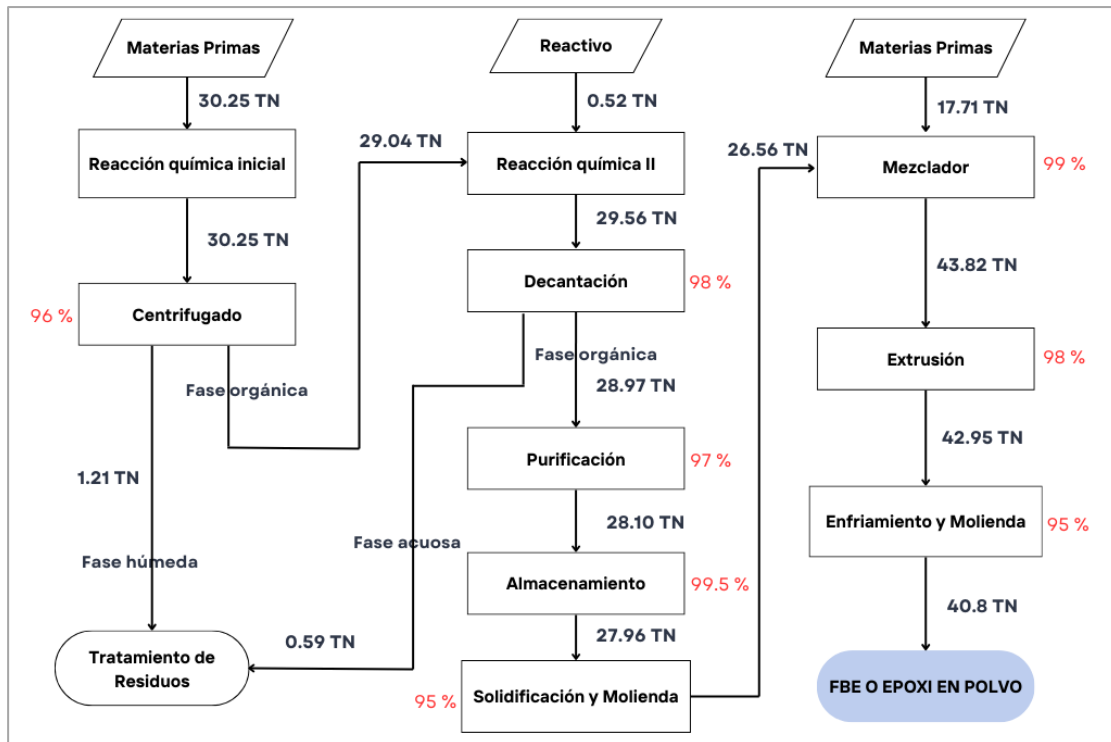


Figura 20. Diagrama de flujo del proceso de FBE con volúmenes estimados

Por último, en la Tabla 16 se presentan los costos asignados a los materiales requeridos para dicho proceso. Los mismos fueron extraídos de cotizaciones de diferentes empresas.

Tabla 16. Costos de materias primas para FBE

Concepto	Cantidad	Costo Total
Bisfenol A	6,5 TN/mes	USD 10.140
Epiclorhidrina	20,73 TN/mes	USD 36.899
Catalizador aniónico	0,064 TN/mes	USD 14.246
Hidróxido de sodio	3,48 TN/mes	USD 4.002
Endurecedor	4,43 TN/mes	USD 26.190
Cargas y aditivos	11,07 TN/mes	USD 2.768
Pigmentos	2,21 TN/mes	USD 7.183
<b>TOTAL</b>		<b>USD 101.428</b>

#### 4.1.2 Balance de Masa del Polietileno

Para realizar el balance de masa del proceso de fabricación del polietileno de alta densidad, se considera como producción esperada la cantidad estimada en la Tabla 9, que son 374,2 toneladas. Los cálculos se realizan de forma regresiva, partiendo de la masa final y estimando lo necesario en cada etapa previa, según se ilustra en la Figura 18.

Se asume una pequeña pérdida en el silo de almacenamiento, correspondiente al 0,5%.

$$\text{Cantidad de mezcla antes del almacenamiento} = \frac{374,2}{99,5\%} = 376,1 \text{ TN}$$

En el silo de mezcla, se puede considerar un porcentaje de eliminación de finos o material fuera de especificación, lo que indica una posible pérdida o purga de material. En este caso, se toma un 99% de rendimiento.

$$\text{Cantidad de mezcla a la salida de la extrusora} = \frac{376,1}{99\%} = 379,9 \text{ TN}$$

Se considera un rendimiento del 98% en la extrusora, por lo que:

$$\text{Cantidad de mezcla antes de la extrusora} = \frac{379,9}{98\%} = 387,6 \text{ TN}$$

Luego, se asume una pérdida del 1% en el secador de lecho fluidizado debido al diluyente residual eliminado.

$$\text{Cantidad de mezcla a la salida del centrifugado} = \frac{387,6}{99\%} = 391,5 \text{ TN}$$

En el centrifugador se separa la mayor parte del disolvente y se recupera para ser realimentado en el proceso. Se considera un 98% de rendimiento en el centrifugador.

$$\text{Cantidad de mezcla antes del centrifugado} = \frac{391,5}{98\%} = 399,5 \text{ TN}$$

$$\text{Cantidad de retroalimentación 1} = 399,5 - 391,5 = 8 \text{ TN}$$

En la Figura 21, se presentan todos los valores obtenidos hasta este punto.

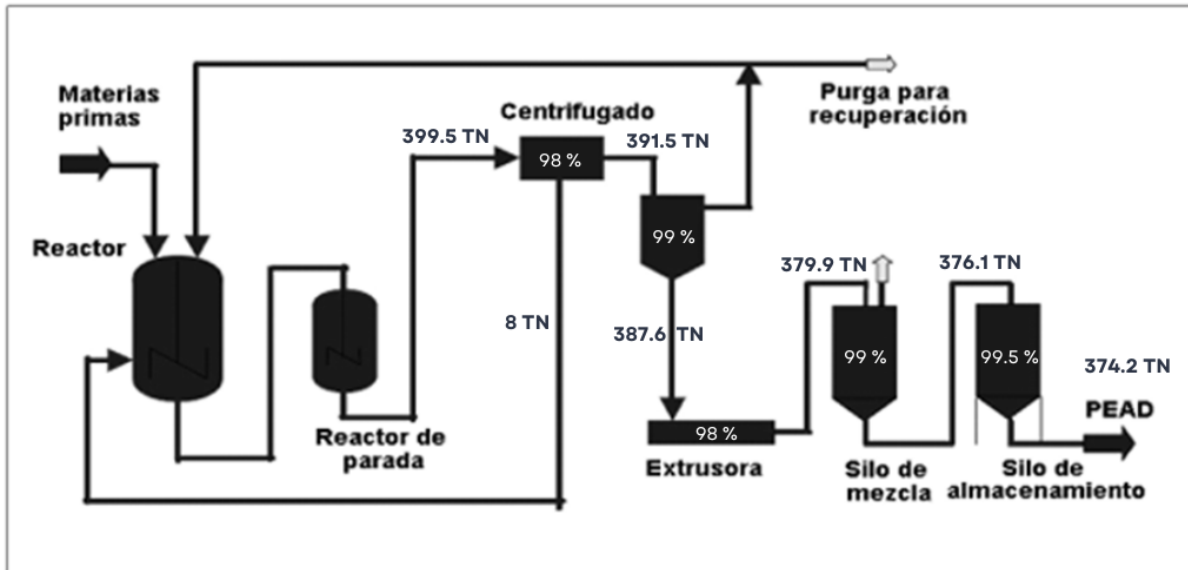


Figura 21. Diagrama de flujo del proceso del PEAD con volúmenes parciales estimados

Una vez finalizada la polimerización, la mezcla se dirige a un reactor de parada donde se completa la conversión del etileno y se eliminan los monómeros residuales. Por ello, se estima un rendimiento del 98% en dicho equipo.

$$\text{Cantidad a la entrada del reactor de parada} = \frac{399,5}{98\%} = 407,7 \text{ TN}$$

Durante el proceso, se recupera monómero y disolvente, que se purifican y reintroducen en el reactor primario. Por lo tanto, el flujo de entrada al reactor primario, incluyendo las dos retroalimentaciones, se define:

$$\text{Cantidad que ingresa al reactor primario} = m_{MP} + m_{recupero\ 1} + m_{recupero\ 2}$$

Una planta moderna de polimerización en suspensión con hexano como diluyente, logra recuperar 95% del diluyente en el sistema de reciclaje y la purga puede representar un 5% del flujo total. Por ello, se asume que un 95% del flujo de salida del secador de lecho fluidizado se recupera, entonces:

$$m_{recupero\ 2} = 0,95 \times 3,9 \text{ TN} = 3,7 \text{ TN}$$

Para calcular la composición de la alimentación al reactor en un proceso en suspensión, se definen las siguientes variables:

- $m_E$  = Masa de etileno alimentado al reactor
- $m_{com}$  = Masa de comonomero alimentado al reactor
- $m_{H_2}$  = Masa de hidrógeno alimentado al reactor
- $m_{dil}$  = Masa del diluyente hexano alimentado al reactor
- $\eta$  = Conversión del etileno en el reactor

El catalizador, junto con un cocatalizador, se introduce en el reactor como una suspensión en el diluyente y en cantidades muy bajas, por lo que no se lo incluye como un elemento independiente, sino dentro de las cantidades de  $m_{dil}$ .

Por lo tanto, la ecuación general del balance de masa en el reactor principal se define como:

$$m_E + m_{com} + m_{H_2} + m_{dil} + m_{recupero\ 1} + m_{recupero\ 2} = m_{salida\ reactor}$$

$$m_E + m_{com} + m_{H_2} + m_{dil} + 8\ \text{TN} + 3,7\ \text{TN} = 407,7\ \text{TN}$$

$$m_E + m_{com} + m_{H_2} + m_{dil} = 396\ \text{TN}$$

$$\text{Cantidad de materias primas} = 396\ \text{TN}$$

Dado que la conversión de etileno a polietileno no es completa, en este caso se asume un 95%.

$$m_{polímero} = 0,95 \times m_E$$

Según García (2009), la concentración de slurry de polímero puede variar entre 15 % y 45 % en peso, aunque se suele situar entre un 30 % y un 35 %. Es por ello que, se considera una concentración del polímero en el slurry del 30% en peso; esto significa que el 30 % de la masa total del slurry es polímero, y el 70 % restante es diluyente, hexano en este caso.

$$m_{polímero} = 0,30 \times m_{slurry}$$

$$m_{dil} = 0,70 \times m_{slurry}$$

Por lo tanto:

$$m_E + m_{com} + m_{H_2} + 0,70 \times \frac{0,95 \times m_E}{0,30} = 396\ \text{TN}$$

Normalmente, la proporción del comonomero en la alimentación de etileno es entre el 1% y el 5% en peso. En este ejemplo, se estima un 2% en peso respecto al etileno. Por otro lado, el hidrógeno se usa como agente regulador de peso molecular y se aplica en cantidades muy bajas, por lo que se considera que representa un 0,1% de la masa del etileno.

A partir de las suposiciones anteriores, se obtiene la siguiente ecuación:

$$m_E + 0,02 \times m_E + 0,001 \times m_E + 0,70 \times \frac{0,95 \times m_E}{0,30} = 396\ \text{TN}$$

Al despejar la masa de etileno y calcular los valores restantes, se obtienen las siguientes cantidades de materias primas ingresadas al reactor primario.

$$\text{Masa de etileno} = 122,35\ \text{TN}$$

$$\text{Masa de comonomero} = 2,45\ \text{TN}$$

$$\text{Masa de hidrógeno} = 0,12\ \text{TN}$$

$$\text{Masa del diluyente hexano} = 271,08\ \text{TN}$$

Finalmente, todos los flujos del proceso, junto con sus volúmenes estimados, quedan representados en la Figura 22.

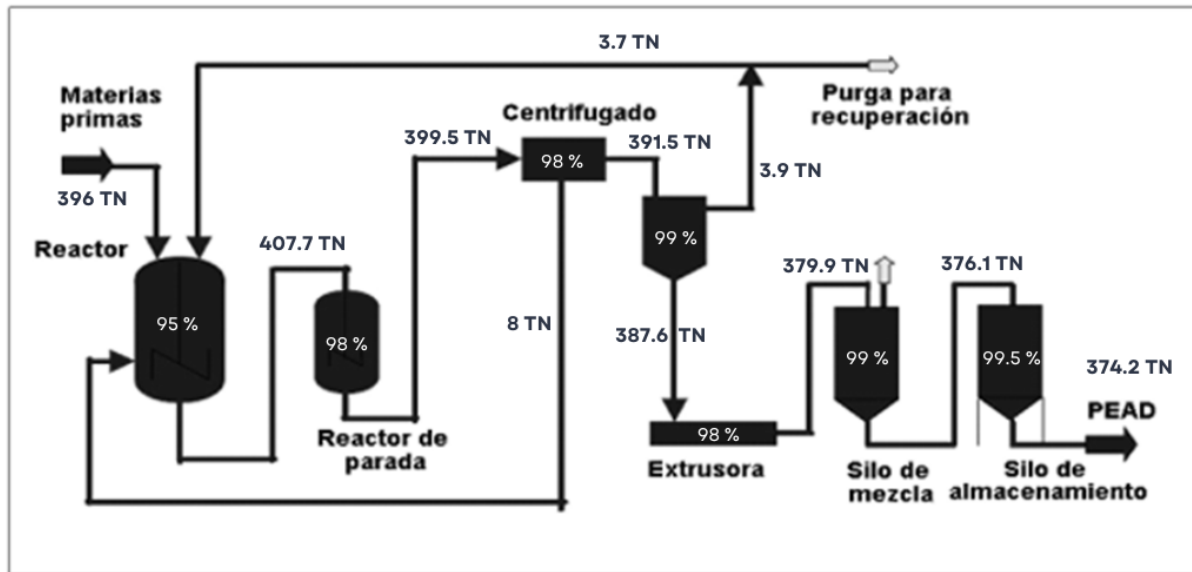


Figura 22. Diagrama de flujo del proceso del PEAD con volúmenes estimados

Seguidamente, en la Tabla 17 se presentan los costos asignados a las materias primas consideradas. Dado que gran parte de estos insumos son derivados del petróleo, su disponibilidad y adquisición resulta compleja, lo cual requeriría un análisis más exhaustivo en futuros estudios.

Sin embargo, para los fines de este proyecto, se toma como referencia el contrato de precios estadounidense denominado "Mont Belvieu Ethylene (OPIS PCW) Futures". Este contrato representa los valores de mercado del etileno en Texas (Mont Belvieu) una ubicación clave para el comercio de productos petroquímicos y sirve como referencia para estimar precios de commodities en mercados globales. Por su parte, el hexano es un componente de productos refinados del petróleo, y sus precios también están correlacionados con dichos contratos.

Tabla 17. Costos de materias primas para PEAD

Concepto	Cantidad	Costo Total
Etileno	122,35 TN/mes	USD 98.614
Diluyente Hexano	265,66 TN/mes	USD 342.168
Catalizador Natta Ziegler	5,42 TN/mes	USD 453.728
Comonomero	2,45 TN/mes	USD 3.327
Hidrógeno	0,12 TN/mes	USD 352
<b>TOTAL</b>		<b>USD 898.189</b>

## 4.2 Mano de Obra Directa

En cuanto a los costos de mano de obra directa, se detalla en la Tabla 18 un listado del personal necesario por proceso productivo. Se considera una jornada laboral de 48 horas semanales, con tres turnos rotativos y personal altamente calificado.

Para determinar el valor de sus salarios brutos, se consideró el Convenio Colectivo de Trabajo N°797/22 de la UOYEP “Unión Obreros y Empleados Plásticos”. También se consideran los costos laborales, estimados en un 60% del salario bruto, los cuales incluyen cargas patronales, ART, aportes jubilatorios, sindicales, obra social, ropa, transporte, bonos por turnos, refrigerio, entre otros conceptos.

**Tabla 18. Salarios del personal**

Proceso Productivo	Tipo de Personal	N° por Turno	Total en el Cargo	Salario Bruto	Costos Laborales	Total
<b>EPOXI</b>	Ingeniero Químico	2	2	USD 2.809	USD 1.685	USD 8.989
	Supervisor de Planta	1	3	USD 2.022	USD 1.213	USD 9.708
	Técnico de Calidad	1	3	USD 1.910	USD 1.146	USD 9.169
	Oficial de Mantenimiento	1	3	USD 1.427	USD 856	USD 6.851
	Operador Especializado	6	18	USD 1.286	USD 771	USD 37.026
	Operario	5	15	USD 1.181	USD 709	USD 28.349
	Encargado de Laboratorio	1	1	USD 1.685	USD 1.011	USD 5.393
	Técnico en Seguridad e Higiene	1	1	USD 1.685	USD 1.011	USD 2.697
	<b>TOTAL</b>			<b>47</b>		
<b>POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD</b>	Ingeniero Químico	1	1	USD 2.809	USD 1.685	USD 4.494
	Supervisor de Planta	1	3	USD 2.022	USD 1.213	USD 9.708
	Técnico de Calidad	1	3	USD 1.910	USD 1.146	USD 9.169
	Oficial de Mantenimiento	2	2	USD 1.427	USD 856	USD 4.567
	Operador Especializado	4	12	USD 1.286	USD 771	USD 24.684
	Operario	3	9	USD 1.181	USD 709	USD 17.009
	Encargado de Laboratorio	1	1	USD 1.685	USD 1.011	USD 2.697
	Técnico en Seguridad e Higiene	1	1	USD 1.685	USD 1.011	USD 2.697
<b>TOTAL</b>			<b>32</b>			<b>USD 75.024</b>

### 4.3 Costos Indirectos de Fabricación

En la metodología de costeo por procesos, se tiene en cuenta la inversión en equipos y maquinaria como un costo indirecto de fabricación distribuido en el tiempo a través de la depreciación. La Tabla 19 detalla los años de vida útil asignados a cada equipo para su amortización, y también el valor total de la cuota mensual correspondiente.

**Tabla 19. Depreciaciones**

Componente	Concepto	Monto	Años	Valor cuota anual	
<b>EPOXI</b>	Reactor químico (2)	USD 78.000	10	USD 7.800	
	Centrifuga o filtro prensa	USD 60.000	8	USD 7.500	
	Decantador	USD 46.000	10	USD 4.600	
	Destilador	USD 53.000	10	USD 5.300	
	Tanque de almacenamiento	USD 37.000	15	USD 2.467	
	Horno de curado	USD 45.000	10	USD 4.500	
	Molinos (2)	USD 55.000	8	USD 6.875	
	Mezclador	USD 49.500	10	USD 4.950	
	Extrusora	USD 57.900	8	USD 7.238	
	Rodillos enfriadores	USD 40.000	10	USD 4.000	
	Equipos de seguridad	USD 70.000	10	USD 7.000	
	Equipos de laboratorio	USD 40.000	8	USD 5.000	
	Estructura de equipos	USD 400.000	20	USD 20.000	
<b>Total Valor cuota anual</b>				<b>USD 87.229</b>	
<b>Total Valor cuota mensual</b>				<b>USD 7.269</b>	
<b>POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD</b>	Reactor químico	USD 56.500	10	USD 5.650	
	Reactor de parada	USD 59.000	10	USD 5.900	
	Centrifuga	USD 51.800	8	USD 6.475	
	Secador de lecho fluidizado	USD 45.000	10	USD 4.500	
	Extrusora	USD 70.000	8	USD 8.750	
	Mezclador	USD 48.500	10	USD 4.850	
	Tanque de almacenamiento	USD 54.750	15	USD 3.650	
	Sistema de recuperación/purga	USD 55.000	10	USD 5.500	
	Equipos de seguridad	USD 50.000	10	USD 5.000	
	Equipos de laboratorio	USD 40.000	8	USD 5.000	
	Estructura de equipos	USD 750.000	20	USD 37.500	
	<b>Total Valor cuota anual</b>				<b>USD 92.775</b>
	<b>Total Valor cuota mensual</b>				<b>USD 7.731</b>

En cuanto al consumo eléctrico, dado que se trata de una planta de operación continua las 24 horas del día, los 7 días de la semana, que emplea equipos de consumo energético alto, se estima un costo aproximado de USD 80.000 mensuales para el proceso del epoxi y USD 50.000 mensuales para el PEAD.

Con respecto al consumo de agua, requerida para procesos de enfriamiento, lavado, reciclaje y sistemas cerrados como torres de enfriamiento, se estima un costo mensual de aproximadamente USD 10.000 por cada proceso.

En concepto de control de calidad, que contempla ensayos, consumibles, calibración de instrumentos, auditorías, y también certificados o ensayos fuera del laboratorio, se estima un costo mensual de USD 25.000 para el proceso del epoxi y USD 20.000 para el proceso del PEAD.

En cuanto al mantenimiento, al tratarse de una planta industrial de operación continua con equipos complejos y debido al elevado costo de repuestos importados y la frecuencia mensual de tareas técnicas (lubricación, calibración y ajustes), se estima un costo mensual de USD 25.000 para el mantenimiento de los equipos del proceso de epoxi y USD 12.000 para el proceso de PEAD.

Por último, se contempla en cada proceso, un total de 60.000 USD mensuales en concepto de la gestión ambiental y residuos industriales, capacitaciones, seguros de maquinaria y otros gastos operativos asociados.

## 4.5 Análisis Comparativo

Una vez obtenidos los datos de costos asociados a cada etapa del proceso productivo, se recurre a la fórmula (2) para calcular los costos unitarios de producir cada componente en Argentina.

$$\text{Costo Unitario del Epoxi} = \frac{101.428 + 108.180 + 207.269}{40.800} = 10,22 \text{ USD/Kg}$$

$$\text{Costo Unitario del PEAD} = \frac{898.189 + 75.024 + 159.731}{374.200} = 3,03 \text{ USD/Kg}$$

Para realizar una comparación adecuada entre el costo unitario de producción local y el costo de importar los componentes, es fundamental que ambos se encuentren bajo la misma condición de venta. Dado que el costo unitario local calculado en el capítulo 4.4 corresponde a un costo de producción interna puesto en planta, lo más apropiado es compararlo con un valor CIF (*Cost, Insurance and Freight*), que incluye el precio del producto más el flete y el seguro hasta el puerto de destino. A ese valor se le agrega un flete interno desde la aduana hasta la planta.

Para el costo promedio de importar cada producto, se tomó el valor promedio ponderado de las importaciones durante el período enero 2025 a marzo 2025.

**Tabla 20.** Comparación de costos

Componente	Costo de Importar (USD/Kg)	Costo de producir en Argentina (USD/Kg)
<b>EPOXI</b>	5,92	10,22
<b>PEAD</b>	2,34	3,03

Como se observa en la Tabla 20, el costo de producir estos componentes en Argentina resulta significativamente más alto en ambos casos.

En el caso del epoxi, el costo de producción local es mucho mayor, alcanzando casi el doble en comparación con su importación. Esto se debe principalmente a la complejidad del proceso y a las exigencias técnicas necesarias para cumplir con los altos estándares de calidad requeridos. Dado que el epoxi actúa como la principal barrera anticorrosiva que protege al tubo de acero, sus especificaciones técnicas son sumamente estrictas, lo que impacta directamente en los costos de producción. A esto se suma la limitada disponibilidad local de las materias primas, muchas de las cuales no se producen en el país y deben ser importadas.

En cuanto al polietileno de alta densidad, el principal insumo requerido para su producción es una materia prima derivada del petróleo, cuya obtención en Argentina presenta dificultades tanto en disponibilidad como en competitividad de costos. Si bien el PEAD es un componente ampliamente utilizado en la industria, la capacidad nacional para producirla es reducida. Esto hace que, en muchos casos, producir polietileno de alta densidad en Argentina resulte más costoso que importarlo, debido a la necesidad de importar buena parte de los insumos base.

## 5. CONCLUSIONES

El análisis técnico y económico de desarrollar en Argentina los componentes requeridos para revestir tubos de acero es un proceso complejo que involucra diversas áreas del conocimiento, desde la ingeniería de procesos y materiales hasta la gestión logística y financiera.

En primer lugar, se abordó la metodología de ingeniería inversa para estudiar en profundidad los componentes, lo que permitió concluir tres aspectos. Primero, se determinó que para superar el proceso de homologación de las ternas locales, sería útil realizar inversiones en mejoras en las plantas de revestimiento actualmente operadas por la empresa. En segundo término, se identificó que la alta exigencia de los clientes en cuanto a los estándares de calidad representa una barrera de entrada significativa, por lo que será necesario implementar estrategias que impliquen realizar pruebas en proyectos piloto de los clientes, gestionados por la empresa. Por último, se concluyó que la inestabilidad económica del país y la eliminación de aranceles a la importación de polímeros, hicieron aún más desafiantes el desarrollo local de estos componentes.

Posteriormente, se llevó a cabo un análisis de costos basado en los distintos procesos productivos involucrados, incluyendo la maquinaria y los equipos requeridos, el personal y los servicios necesarios. Esto permitió comparar el costo unitario de fabricación local con el costo de importación. Si bien el resultado indica que la producción local es más costosa, el análisis cumple con el objetivo de explorar la posibilidad de expandir la línea productiva de la empresa.

A partir de los resultados de este proyecto, se plantea la posibilidad de evaluar distintos planes alternativos, y se invita a otros investigadores a tomar este trabajo como punto de partida para continuar desarrollando propuestas en esta línea.

### 5.1 Planes Alternativos

Si bien la producción local resulta más costosa que la importación, los resultados obtenidos en este proyecto permiten identificar oportunidades estratégicas que podrían hacer viable el desarrollo nacional de estos insumos.

- ✓ Convertirse en proveedores de otras empresas del sector

Una opción es convertirse en proveedor de otras empresas del rubro revestimientos o incluso de sectores industriales que requieran materiales similares. Esto incrementaría la demanda local y podría generar una mejora en los costos.

- ✓ Crear una alianza con empresa productora plástica de Argentina

También se podría explorar una asociación con empresas plásticas locales, compartiendo infraestructura y capacidades para reducir costos y tiempos de desarrollo. Una opción podría ser la empresa Dow, que se conoce que está desarrollando proyectos similares.

- ✓ Importar la resina propiamente dicha y producir FBE en Argentina

En el caso del epoxi, una alternativa intermedia sería importar la resina líquida y realizar únicamente la transformación local a epoxi en polvo (FBE), lo que reduciría la complejidad y el costo del proceso.

Estas alternativas permiten pensar el proyecto más allá de su aplicación interna, abriendo nuevas posibilidades de negocio y vínculos estratégicos con empresas del sector. Así, se concluye que, aunque sea altamente desafiante, el desarrollo local de estos componentes es un camino posible, y este trabajo puede servir de base para futuras iniciativas en el sector.

## 6. REFERENCIAS Y ANEXOS

- [1] Cheng, Y., & Norsworthy, R. (2016). *Pipeline Coatings*. Houston, TX: NACE International.
- [2] Coniglio, S., & Carzoglio, E. (2021). Degradación anticipada de revestimientos tricapa. *Petrotecnia*, 52-61.
- [3] CSA Group. (2022). CSA S245.20 Series: 22. En *Plant-applied external coatings for steel pipe*. Toronto, Ontario, Canada: Canadian Standards Association.
- [4] ENARGAS. (2009). Sistema tricapa con adhesivos duros y polietileno de alta densidad . En B. O. Argentina, *NAG-108. Revestimientos anticorrosivos de cañerías y accesorios* (págs. 68-72). Argentina: Ente Nacional Regulador del Gas.
- [5] García, A. C. (2009). *Producción de Polímeros*. España: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Comisión Europea.
- [6] Giudice, C. A., & Pereyra, A. M. (2009). *Tecnología de Pinturas y Recubrimientos: Componentes, formulación, manufactura y control de calidad*. Universidad Tecnológica Nacional.
- [7] *HDPE & Propylene Materials*. (2023). Texas: Plastics Pipe Institute.
- [8] Hernández-Lalinde, J. (2019). Sobre el uso adecuado de la regresión lineal: conceptualización básica mediante un ejemplo aplicado a las ciencias de la salud. *AVFT Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica Volumen 38*.
- [9] Munger, C., & Vincent , L. (1999). *Corrosion Prevention by Protective Coatings*. Houston, TX: NACE International.
- [10] Porter, M. (2015). *Ventaja competitiva: creación y sostenimiento de un desempeño superior: (2 ed.)*. México D.F.: Grupo Editorial Patria.
- [11] Roca Girón, I. (2005). *Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del Polietileno de alta densidad (PEAD)*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- [12] Thompson, I., & Saithala, J. (2015). Review of pipeline coating systems from an operator's perspective. *Corrosion Engineering Science and Technology*.
- [13] Young, T. C. (2013). Procedimiento para fabricar resinas epoxi líquidas. *Oficina Española de Patentes y Marcas*.

## Anexo I - Norma NAG

**Tabla A1.** *Propiedades físicas del polietileno de alta densidad (ENARGAS, 2009)*

Propiedad	Unidad	Min.	Max.	Método de Ensayo
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	0,94	0,96	ASTM D 1505
Índice de fluencia (190 °C, 2,16 kg)	g/10min	0,15	0,80	ASTM D 1238
Elongación a la rotura	%	600	-	ASTM D 638 probeta tipo IV longitudinal 50 mm/min
Tensión de fluencia	MPa	18,5	-	ASTM D 638
Dureza	Shore D	60	-	ASTM D 2240
Punto de ablandamiento	°C	120	-	ASTM D 1525
Temperatura de fragilización	°C	-	-70	ASTM D 746
Tiempo de Inducción oxidativa (oxígeno, 220°C, Cápsula aluminio)	min	10	-	STM D 3895
Tiempo de inducción oxidativa (oxígeno, 220°C, c. Alum., s/tamiz)	min	10	-	STM D 3895

En cuanto a las propiedades del adhesivo, se establece que el aplicador debe recibir del fabricante del adhesivo una ficha técnica que incluya, como mínimo, la siguiente información:

- a) Fecha de fabricación y número de partida.
- b) Nombre del fabricante y lugar de origen del material.
- c) Nombre y tipo del adhesivo.
- d) Tamaño de partículas y su distribución.
- e) Densidad.
- f) Condiciones de estabilidad durante el almacenamiento.
- g) Rango de temperaturas de aplicación.
- h) Rango y límites de temperaturas de operación del caño revestido.
- i) Contenido de humedad.
- j) Espectrograma infrarrojo.

## Anexo II - Norma Canadiense

**Tabla A2.** *Propiedades del epoxi (CSA Group, 2022)*

Propiedades	Unidad	Criterio de Aceptación	Método de prueba	N° de muestras de prueba
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	Dentro del 1% del valor nominal especificado en la ficha técnica del fabricante	ASTM D792 o ASTM D1505	3
Contenido de Humedad	%	Máximo 0.25%	ASTM D2216 o ISO 15512	1
Tiempo de curado	s	Dentro de las especificaciones del fabricante	ASTM D4217	1
Tiempo de Gel	s	Dentro del 20% del valor nominal especificado	ASTM D2471	1
Tamaño de partícula	µm	Dentro de las especificaciones del fabricante	ASTM E29 o ISO 13320	1
Características térmicas	°C	Vicat: al menos 10 °C por encima de la temperatura de diseño máxima	ASTM D3418 o ASTM D1525	3

**Tabla A3.** *Propiedades del adhesivo (CSA Group, 2022)*

Propiedades	Unidad	Criterio de Aceptación	Método de prueba	N° de muestras de prueba
Flujo	g/10 min	Debe estar dentro del 20% de la especificación nominal del fabricante	ASTM D1238; 190 °C/2.16 kg	3
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	Debe estar dentro del 1% de la especificación nominal del fabricante	ASTM D792 o ASTM D1505	3
Punto de ablandamiento Vicat	°C	Debe ser al menos 10 °C por encima de la temperatura máxima de diseño	ASTM D1525	3
Temperatura de fragilidad	°C	Debe ser -50 °C o inferior	ASTM D746	10

**Tabla A4.** Propiedades del polietileno de alta densidad (CSA Group, 2022)

Propiedades	Unidad	Criterio de Aceptación	Método de prueba	N° de muestras de prueba
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	>0.940	ASTM D792 o ASTM D1505	3*
Elongación a la rotura	%	600 mínimo	ASTM D638	5*
Flujo	g/10 min	Dentro del 20% del valor nominal especificado	ASTM D1238, 190 °C/2,16 kg	3
Dureza	Shore D	60 mínimo	ASTM D2240	5
Esfuerzo de tracción en el límite elástico	Mpa	>18,5	ASTM D638	S*
Temperatura de fragilidad	°C	-70 o menor	ASTM D746	10*
Resistencia al agrietamiento por tensión ambiental	h	300 mínimo	ASTM D1693	10*
Envejecimiento térmico	Mpa, %	Al menos el 65% de la resistencia a la tracción original antes del envejecimiento térmico	ASTM D638	S*
Tiempo de inducción a la oxidación	min	Mínimo 10 minutos en oxígeno a 220 °C, utilizando recipiente de aluminio y sin malla	ASTM D3895	3
Punto de ablandamiento Vicat	°C	120 mínimo	ASTM D1525	3*

t Esta prueba se requiere al menos cada 12 meses.

\* El número de muestras también se define en el método de prueba.

S: Esta prueba se requiere al menos una vez cada cuatro años y siempre que haya un cambio en uno o más de los siguientes: a) fabricante; b) lugar de fabricación; y c) tipo de catalizador.