



**Universidad de Granada**  
Facultad de Ciencias

**ESTUDIO DE VIABILIDAD**

José León Barranco.

Granada, septiembre de 2013



**Universidad  
de Granada**  
· · ·  
**Facultad de  
Ciencias**

Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de  
pantallas LCD.

ESTUDIO DE  
VIABILIDAD

 <b>Universidad</b> <b>de Granada</b>  <b>Facultad de</b> <b>Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

Capítulo 1.	Estudio de mercado .....	1
1.1	Justificación .....	1
1.2	Antecedentes .....	3
1.2.1	Recorrido histórico.....	3
1.2.2	Reciclado de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEEs).....	3
1.2.3	Situación actual de la gestión en España .....	9
1.2.4	Previsión de generación de RAEEs en España .....	15
1.3	Producto y materia prima .....	19
1.3.1	Producto. Generalidades del indio .....	19
1.3.2	Materia prima. Pantallas de cristal líquido (LCD) .....	24
1.3.3	Análisis de la oferta de indio .....	29
1.3.4	Análisis de la demanda de indio .....	35
Capítulo 2.	Alternativas de proceso.....	40
2.1	PRIMERA ALTERNATIVA: Método para recuperar indio de alta pureza por lixiviación de chatarra de películas de ITO .....	41
2.1.1	Objetivo .....	41
2.1.2	Generalidades.....	41
2.1.3	Descripción del proceso .....	42
2.1.4	Balances de materia y de energía .....	46
2.1.5	Estudio técnico de la primera alternativa .....	54
2.1.6	Estudio económico .....	75
2.1.7	Estudio económico-financiero .....	84
2.1.8	Cuenta de resultados .....	91
2.1.9	Plan de tesorería .....	94
2.1.10	Balance .....	97
2.1.11	TIR .....	99
2.1.12	Análisis de sensibilidad.....	101
2.2	SEGUNDA ALTERNATIVA: Método para recuperar indio de alta pureza mediante vaporización de cloruros a baja temperatura.....	103
2.2.1	Objetivo .....	103
2.2.2	Generalidades.....	103
2.2.3	Descripción del proceso .....	109

 <b>Universidad de Granada</b>  <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	---	----------------------------------

2.2.4	Balances de materia y de energía .....	111
2.2.5	Estudio técnico de la segunda alternativa.....	116
2.2.6	Estudio económico.....	136
2.2.7	Estudio económico-financiero.....	145
2.2.8	Cuenta de resultados .....	151
2.2.9	Plan de tesorería.....	154
2.2.10	Balance .....	157
2.2.11	TIR .....	159
2.2.12	Análisis de sensibilidad.....	161
2.3	Justificación de la alternativa elegida .....	163
2.3.1	Parámetros de selección .....	163
2.3.2	Matriz de decisión.....	163
2.3.3	Conclusiones.....	164

## Lista de figuras

Ilustración 1:	Costes a repercutir sobre el consumidor en cada grupo de RAEEs. ....	6
Ilustración 2:	Correlación entre PIB per cápita y kg de RAEEs / hab año. ....	10
Ilustración 3:	Esquema de la distribución de RAEEs en la Península .....	12
Ilustración 4:	Evolución de la cuota de mercado de ECOTIC.....	13
Ilustración 5:	Previsión de las cantidades de RAEEs generados en España anualmente ...	15
Ilustración 6:	Proyección de tratamiento de chatarra de pantallas por ECOTIC. ....	16
Ilustración 7:	Proyección de tratamiento de chatarra de pantalla, totalidad de SIGs. ....	17
Ilustración 8:	Distintas tecnologías de pantalla. ....	17
Ilustración 9:	Total acumulado correspondiente al mercado doméstico .....	18
Ilustración 10:	Metal de indio de alta pureza en forma de lingotes.....	19
Ilustración 11:	Composición de LCDs de distintos tamaños.....	25
Ilustración 12:	Estructura de una típica pantalla LCD .....	25
Ilustración 13:	Composición de un teléfono móvil. ....	26
Ilustración 14:	Esquema de reciclado, desensamblado manual. ....	27
Ilustración 15:	Esquema de reciclado, tratamiento mecánico. ....	29
Ilustración 16:	Producción de In por países. ....	31
Ilustración 17:	Producción mundial total de In primario.....	31
Ilustración 18:	Panorama de la demanda mundial de indio por países.....	35
Ilustración 19:	Distribución de la demanda de In por aplicaciones .....	36



Ilustración 20: Precio del kilogramo de In, en euros.....	39
Ilustración 21: Esquema del proceso de obtención de indio, alternativa I. ....	45
Ilustración 22: Diagrama del paso de lixiviación.....	48
Ilustración 23: Diagrama del paso de neutralización.....	49
Ilustración 24: Diagrama del paso de sulfuración .....	50
Ilustración 25: Diagrama del paso de electroobtención.....	51
Ilustración 26: Diagrama del paso de fusión .....	53
Ilustración 27: Relación entre la energía consumida y tamaño de producto .....	55
Ilustración 28: Características del molino cónico de bolas .....	55
Ilustración 29: Dimensiones de un ciclón .....	58
Ilustración 30: Esquema de una bancada de celdas de electroobtención .....	65
Ilustración 31: Representación de un crisol de fusión.....	67
Ilustración 32: Pérdidas en función de la temperatura en crisoles de fusión.....	68
Ilustración 33: Molino cónico de bolas. ....	75
Ilustración 34: Filtro de mangas pulse-jet. ....	76
Ilustración 35: Filtro vertical de hojas.....	78
Ilustración 36. Silo de almacenamiento .....	79
Ilustración 37: Energ. libre Gibbs como función de la temperatura.....	105
Ilustración 38: Diagrama estabilidad In-Cl <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> , 373 K .....	105
Ilustración 39: Diagrama de estabilidad In-Cl <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> , 773 K.....	106
Ilustración 40: Diagrama de estabilidad In-Cl <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> , 973 K.....	106
Ilustración 41: Energ. libre Gibbs hidrocloración de SnO <sub>2</sub> y In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	108
Ilustración 42: Dimensiones de un ciclón .....	120
Ilustración 43: Evaporador de tubos horizontales .....	123

## **Lista de tablas**

Tabla 1: Toneladas de RAEEs producidos por CCAA (dependencia del PIB).....	10
Tabla 2: Kg. RAEEs producidos / hab. año por CCAA (dependiente de RSU) .....	11
Tabla 3: Tasa media de producción de RAEEs por CCAA .....	12
Tabla 4: kg de RAEEs gestionados por CCAA y categoría. ....	12
Tabla 5: Cuota de mercado por categoría.....	14
Tabla 6: Estimación de RAEEs recogidos por CCAA.....	14
Tabla 7: Cantidad de chatarra de TV a tratar.....	16
Tabla 8: Contenido en In de las distintas partes de un teléfono móvil .....	27
Tabla 9: Producción mundial anual de indio. .....	30
Tabla 10: Principales compañías chinas exportadoras de In. ....	32



Tabla 11: Composición de la corriente D (especies atómicas).....	46
Tabla 12: Neutralización. Balance a especies atómicas. ....	48
Tabla 13: Sulfuración. Balance a especies atómicas.....	50
Tabla 14: Electroobtención. Balance a especies atómicas .....	51
Tabla 15: Fusión. Balance a especies atómicas .....	53
Tabla 16: Propiedades físicas de las especies .....	53
Tabla 17: Características del filtro de mangas .....	56
Tabla 18: Características de la soplante.....	57
Tabla 19: Dimensiones del ciclón. ....	58
Tabla 20: Características del lixiviador. ....	60
Tabla 21: Características del filtro de placas .....	61
Tabla 22: Características del neutralizador. ....	61
Tabla 23: Características del filtro de placas.....	62
Tabla 24: Características del tanque de sulfuración .....	63
Tabla 25: Características del filtro de hojas.....	63
Tabla 26: Características de la celda de electroobtención.....	65
Tabla 27: Características del secador de tornillo.....	66
Tabla 28: Características del horno de crisol.....	68
Tabla 29: Caudales mínimos de agua para aparatos sanitarios.....	70
Tabla 30: Consumo energético por equipos. Fuente: Elaboración propia. ....	72
Tabla 31: Relación de luminarias, alumbrado interior. Fuente: Elaboración propia.....	73
Tabla 32: Relación de luminarias, alumbrado exterior.....	73
Tabla 33: Relación de equipos fundamentales. ....	80
Tabla 34: Costes de personal .....	81
Tabla 35: Relación de equipos y consumo energético. ....	82
Tabla 36: Consumo de agua de saneamiento. ....	83
Tabla 37: Consumo de agua por equipos proceso. ....	83
Tabla 38: Consumo de reactivos. ....	84
Tabla 39: Capital fijo. ....	87
Tabla 40: Capital circulante. ....	89
Tabla 41: Balance a especies atómicas. ....	111
Tabla 42: Características molino cónico de bolas. ....	117
Tabla 43: Características Filtro de mangas. ....	118
Tabla 44: Características soplante.....	119
Tabla 45: Características del ciclón Lapple .....	120
Tabla 46: Características lixiviadores.....	122
Tabla 47: Características filtro de placas .....	122
Tabla 48 : Características del evaporador. ....	124
Tabla 49: Características del vaporizador. ....	125
Tabla 50: Características del neutralizador. ....	125
Tabla 51: Características del filtro de hojas. ....	125
Tabla 52: Características del acidificador. ....	126



Tabla 53: Características celda de electroobtención.....	128
Tabla 54: Características secador de tornillo. ....	128
Tabla 55. Características horno de crisol.. .....	130

 <b>Universidad</b> <b>de Granada</b>  <b>Facultad de</b> <b>Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE</b> <b>VIABILIDAD</b>
---	---	--

## Capítulo 1. Estudio de mercado

### 1.1 Justificación

Se llevan tratando los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEEs) desde hace veinticinco años. Los equipos de entonces eran voluminosos y contenían una cantidad importante de cobre, metales preciosos y otros metales. Esto permitía afrontar los costes de desmontaje y reciclado ofreciendo un margen económico adicional.

La modernización de los equipos ha llevado asociada una reducción en su tamaño y un aumento de las prestaciones, siendo la presencia de metales mucho menor desde el punto de vista cuantitativo y cualitativo. Esto ha supuesto un encarecimiento significativo de cualquier tipo de reciclaje.

Desde otro punto de vista, el ininterrumpido avance tecnológico de las últimas décadas conlleva una rápida renovación de los equipos, con una mejora de las prestaciones a menor precio, y como consecuencia un aumento en la cantidad de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. El marketing, los cambios en el diseño y el aumento de la riqueza ejercen influencia en el crecimiento de estos residuos.

Los destinos posibles para los aparatos eléctricos y electrónicos que llegan al final de su vida útil son:

- Reutilización del propio equipo y/o sus componentes.
- Reciclado de los materiales para fabricar nuevos productos iguales o diferentes a aquellos a partir de los cuales se han separado y recuperado.
- Valorización con recuperación de energía contenida en los residuos.
- Incineración sin recuperación de energía para destrucción definitiva.
- Vertido controlado del residuo.

Aún hoy, parte de los RAEEs se depositan en vertederos, donde no son tratados. Sin embargo ya muchos aparatos usados son recogidos por las mismas compañías suministradoras o administraciones locales mediante programas de recogida selectiva y cedidos a recuperadores profesionales.

Una proporción importante de los contaminantes que aparecen en los residuos sólidos urbanos proceden de los RAEEs no sometidos a un tratamiento adecuado. Las sustancias y componentes tóxicos y peligrosos que contienen los RAEEs pueden llegar a contaminar la atmósfera y el agua de forma importante.

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

Los aparatos eléctricos y electrónicos son productos muy complejos que generalmente, incluyen numerosas partes y componentes fabricados en materiales muy diversos (metales, polímeros o vidrios) que requieren esquemas de tratamiento muy específicos. También es muy habitual encontrar sustancias o componentes potencialmente peligrosos que deben ser retirados en una etapa de descontaminación previa a cualquier iniciativa de reciclado de los RAEE.

Forman parte de la composición de algunos de los RAEEs ciertos metales que integran una categoría de metales conocida como *metales estratégicos*. Dicha categoría la forman aquellos que no se pueden producir en el país, o cuya producción no logra satisfacer la demanda nacional, bien sea ésta causada por necesidades militares o industriales.

El motivo de su cotización se encuentra en sus particulares propiedades intrínsecas. En un sentido restringido, son aquellos minerales que en tiempo de guerra la oferta no alcanza a satisfacer las necesidades mínimas de la industria de un país. Cada país tiene su propia lista de minerales estratégicos y una política de restricción en el uso civil de aquellos que no se encuentran en cantidades suficientes para cubrir las necesidades domésticas en tiempo de guerra.

¿Cómo será posible resolver el problema de la escasez de estos materiales tan codiciados en el futuro? El camino consistirá en:

- El diseño de materiales eficientes. Muchos diseños actuales emplean más materiales de los que realmente son necesarios, o usan materiales que pueden escasear cuando algunos de los más abundantes podrían servir.
- La sustitución. La propiedad, y no el material en sí mismo, es lo que busca el diseñador. A veces un material disponible puede sustituir a uno escaso, aunque esto normalmente implica desembolsos considerables (nuevas técnicas de procesado, nuevos métodos de unión, etc.)

Sin embargo, la sustitución presenta limitaciones técnicas. Algunos materiales son difíciles de sustituir (realizan una función única). En otros casos requeriría el desarrollo de una tecnología nueva, y esto podría llevar muchos años. Finalmente, la sustitución eleva la demanda del material que reemplaza, que a su vez puede tener existencias limitadas.

- El reciclado. No es nuevo, reciclar es una labor costosa y ahí está el problema para expandir su aplicación. Durante los últimos treinta años, el elevado precio de la mano de obra hace que el reciclado no sea tan económico.

En el presente estudio de viabilidad se procede a caracterizar la materia a reciclar (chatarra de pantalla de cristal líquido LCD) y el producto recuperado, metal de indio de alta pureza (99,999%).

En el estudio de mercado se analizan la oferta y la demanda para fijar la ubicación y la capacidad de producción de la planta.

El objetivo final es analizar la rentabilidad de una serie de alternativas desde un punto técnico y económico-financiero para seleccionar la más adecuada para llevar a cabo la implantación del proyecto.

 <b>Universidad</b> <b>de Granada</b>  <b>Facultad de</b> <b>Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

## 1.2 *Antecedentes*

### 1.2.1 Recorrido histórico

En 1863, los químicos alemanes Ferdinand Reich y Hieronymous Theodor Richter analizaron minerales procedentes de las minas de los alrededores de Freiberg, Sajonia.

Sus experimentos consistieron en disolver en ácido clorhídrico los minerales de pirita, arsenopirita, galena y esfalerita (o blenda) y destilar el cloruro de zinc bruto. Como era un hecho conocido que los minerales de esa región habitualmente contienen talio, buscaron las líneas de emisión verde mediante espectroscopia. Éstas no estaban presentes pero en su lugar se encontró una línea azul en el espectro.

Como no se conocía elemento con emisión azul brillante se concluyó la presencia de un nuevo elemento en los minerales. Nombraron el elemento como indio (del color índigo) por la línea azul del espectro. Richter aisló el metal en 1864 y en la Exposición Internacional de 1867 se presentó un lingote de medio kilogramo.

En 1924, se descubrió una propiedad valiosa del indio como estabilizador de metales no ferrosos, esta propiedad dio al elemento su primer uso significativo.

En 1936 la U.S. Bureau of Mines (USBM) incluye el indio dentro de la lista de materias primas, y hasta principios de los años 50 solo eran conocidas un número muy limitado de aplicaciones para este metal, la más importante de las cuales era la fabricación de diodos de emisión de luz y el recubrimiento de los motores de los aviones durante la Segunda Guerra Mundial.

El comienzo en la producción de semiconductores con contenido en indio está fechado en 1952. El desarrollo y proliferación de su uso como barras de control con contenido en indio en la industria nuclear incrementó su demanda durante los años 70. Y a partir de 1992 el uso del óxido de indio y estaño (ITO) en las pantallas de cristal líquido se convirtió en su aplicación mayoritaria.

### 1.2.2 Reciclado de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEEs)

La generación y gestión de los residuos constituye un problema ambiental en la sociedad actual, esto se refleja en las políticas europeas en materia de residuos. El abandono o una gestión inadecuada de los residuos producen un impacto negativo en los medios receptores, como pueden ser problemas de contaminación de agua, suelo, aire y afectar a los ecosistemas y a la salud pública.

Por el contrario, un tratamiento adecuado supone un ahorro en materias primas lo que contribuye a un desarrollo sostenible y a la conservación de los recursos y del hábitat.

Los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEEs) no han sido objeto hasta hace poco tiempo de una legislación específica en el marco de la Unión Europea. Anteriormente, la mayoría de los países catalogaban muchos de los RAEEs dentro del concepto de “residuos voluminosos”.

Si nos remitimos al **Real Decreto 208/2005**, de 25 de febrero, sobre aparatos eléctricos y electrónicos, y la gestión de sus residuos, tenemos las siguientes definiciones:

**Aparatos eléctricos y electrónicos:** “Aparatos que necesitan para funcionar corriente eléctrica o campos electromagnéticos, destinados a ser utilizados con una tensión nominal no superior a 1000

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

*V en corriente alterna y 1500 V en corriente continua, y los aparatos necesarios para generar, transmitir y medir tales corrientes y campos”.*

**Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos:** “Aparatos eléctricos y electrónicos, sus materiales, componentes, consumibles y subconjuntos que los componen, procedentes tanto de hogares particulares como de usos profesionales, a partir del momento en que pasan a ser residuos”.

El Real Decreto 208/2005 establece las siguientes categorías de RAEEs:

1. Grandes electrodomésticos.
2. Pequeños electrodomésticos.
3. Equipos de informática y telecomunicaciones.
4. Aparatos electrónicos de consumo.
5. Aparatos de alumbrado.
6. Herramientas eléctricas o electrónicas (excepto las herramientas industriales fijas permanentemente, de gran envergadura e instaladas por profesionales).
7. Juguetes y equipos deportivos o de tiempo libre.
8. Aparatos médicos (excepto todos los productos implantados e infectados).
9. Instrumentos de vigilancia y control.
10. Máquinas expendedoras.

Los sectores donde se produce una mayor generación de RAEEs son los grandes electrodomésticos, comunicación/transmisión, audiovisual y telefonía.

La causa más habitual por las que un aparato eléctrico y electrónico (AEE) se transforma en residuo es la obsolescencia. Otras causas son roturas, cambios en la normativa, necesidades de destrucción por razones contables o comerciales, etc. En cuanto a la rotura, los bajos precios de estos productos repercuten en que ante una avería en lugar de repararlos se compre uno nuevo.

El contenido y diversidad en sustancias peligrosas implica una posible división entre los RAEEs:

- Aquellos con contenido en sustancias peligrosas y sobre los que debe primarse la retirada y tratamiento adecuado de éstas sobre el reciclado, a fin de proteger la salud humana y los ecosistemas.
- Aquellos que no contienen sustancias peligrosas y por tanto puede incidirse más en su reciclado.

En la actualidad la normativa no distingue entre ambos tipos y los objetivos de recogida y reciclado son únicos para cada categoría a pesar de encontrarse en algunas de ellas RAEEs de las dos tipologías. De hecho, se sabe que en España no en todos los casos se procede a la descontaminación de los aparatos que contienen componentes peligrosos antes de proceder a su valorización (frigoríficos y aparatos de frío, tubos de rayos catódicos y lámparas fluorescentes).

Cada vez más gobiernos están imponiendo objetivos en el reciclado de materiales para una serie muy amplia de bienes de consumo de producción masiva. Ahora, al diseñar un producto, los fabricantes deben pensar en su ciclo de vida completo: no es suficiente que un teléfono móvil trabaje bien durante dos años y después sea tirado a la basura. Debe ser diseñado para que se pueda desmontar fácilmente y que sus materiales sean reciclados en los teléfonos móviles de la siguiente generación.

 <b>Universidad</b> <b>de Granada</b>  <b>Facultad de</b> <b>Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

En la actualidad, conforme a lo establecido en la normativa, los fabricantes ya introducen en el diseño y fabricación de los aparatos eléctricos y electrónicos (a partir de ahora AEEs) modificaciones para reducir el contenido en sustancias peligrosas, hacer su desensamblado y tratamiento más sencillo, etc. No obstante, habitualmente las plantas de tratamiento reciben residuos de más de 10 años de antigüedad, en cuya fabricación no se tuvieron en cuenta esas medidas.

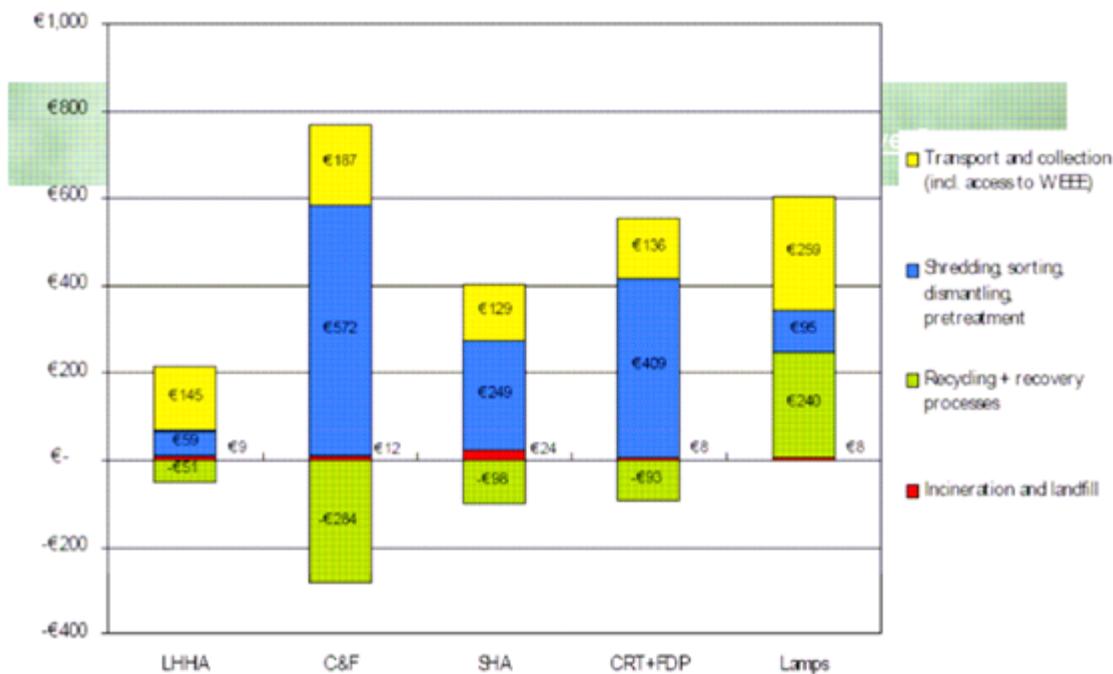
#### 1.2.2.1 Problemas ocasionados por los RAEEs

Los RAEEs son un flujo de residuos complejo en los aspectos de: variedad de productos, asociación de diferentes materiales y compuestos, contenido en sustancias peligrosas, no cumplimiento de criterios ambientales (por haber sido desarrollados con tecnologías de fabricación obsoletas).

La actual división en categorías no se corresponde con los flujos de residuos reales. En la práctica, la recogida y tratamiento está basada en la composición del residuo y en las economías de escala, siendo las agrupaciones las siguientes:

- Grandes electrodomésticos (dentro de las categorías 1 y 10).
- Aparatos de refrigeración (dentro de la categoría 1).
- Pequeños electrodomésticos (categorías 2, 3, 4, 5A, 6, 7, la pequeña fracción de origen doméstico de la 8 y la 9).
- Tubos de rayos catódicos o CRT (categorías 3 y 4).
- Luminarias (categoría 5B).

 <b>Universidad de Granada</b> <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------



*Ilustración 1: Costes a repercutir sobre el consumidor en cada grupo de RAEEs.*

Fuente: United Nations University.

Junto con las consecuencias a nivel administrativo, financiero y económico, estas discrepancias en la división de categorías provocan ineficiencia en la recogida y tratamiento de los residuos. En función de lo costosos que sean los procesos de recogida y tratamiento y del mercado disponible para los subproductos, el coste imputable a repercutir sobre el consumidor varía notablemente entre cada tipo de AEE puesto en el mercado.

#### 1.2.2.2 Legislación aplicable

##### **DIRECTIVA 2002/96/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 27 de enero de 2003 sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.**

Dado el impacto que una mala gestión de los RAEEs puede acarrear al medio ambiente y a la salud humana y de la disparidad de políticas nacionales en la UE que reducen la eficacia del reciclado, se hace necesaria una regulación, a nivel de la Unión Europea, de este tipo de residuos.

La Directiva 2002/96/CE establece objetivos prioritarios para los RAEEs con el fin de reducir su eliminación:

- Prevenir la generación de RAEEs.
- Reutilización, reciclado y otras formas de valoración de RAEEs.

Además de estos objetivos prioritarios, la Directiva busca mejorar el comportamiento medioambiental de todos los agentes implicados en el ciclo de vida de los aparatos eléctricos y electrónicos.

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

Hace una distinción de AEEs en 10 categorías, excluyendo aquellos aparatos relacionados con la protección de la seguridad del Estado. Todas las categorías son desarrolladas con un mayor detalle en el Anexo I B de la Directiva.

El diseño del producto es un punto fundamental a la hora del reciclado y reutilización de los RAEEs, por ello se especifica que los Estados miembros deben adoptar medidas para que los productores diseñen estos aparatos favoreciendo la futura valoración y reutilización de los RAEEs.

La Directiva hace mucho hincapié en la recogida selectiva de los RAEEs, que se considera condición previa para asegurar el tratamiento de estos residuos, necesaria para alcanzar el nivel deseado de protección de la salud humana y medioambiental de la Comunidad Europea.

Un alto porcentaje de RAEEs son eliminados como residuos urbanos no seleccionados, de modo que la Directiva delega a cada Estado miembro la responsabilidad de establecer medidas adecuadas para reducir al mínimo la eliminación no selectiva de estos residuos. Entre otras medidas, se incluyen para los RAEEs procedentes de hogares particulares, la instalación de puntos de recogida de estos residuos así como la creación, por parte de los productores, de sistemas de recogida individual o colectiva. Para RAEEs que no procedan de hogares particulares, los productores deberán disponer de la recogida de dichos residuos.

Todos los RAEEs deben ser recogidos y transportados a instalaciones de tratamiento autorizadas en el caso de que no se reutilicen íntegramente. El objetivo mínimo impuesto por la Directiva son 4 kg por habitante y año de RAEEs procedentes de hogares particulares recogidos por medios selectivos.

El artículo 6 de la Directiva establece las obligaciones de tratamiento de RAEEs. Los productores (o terceros que actúen por cuenta de ellos) han de organizar sistemas de tratamiento disponiendo de las mejores técnicas disponibles de tratamiento, valorización y reciclado. Como mínimo, deberán retirarse todos los fluidos y realizar un tratamiento selectivo según lo estipulado en el anexo II de la Directiva. La empresa que lleve a cabo el tratamiento deberá obtener un permiso de las autoridades competentes. Este tratamiento también podrá realizarse fuera del Estado miembro respectivo o de la Comunidad, siempre que el transporte de los RAEEs cumpla las disposiciones del **Reglamento (CEE) nº259/93 del Consejo** relativo a la vigilancia y control de residuos en el interior, a la entrada y a la salida de la Comunidad Europea. La Directiva establece también unos requisitos técnicos específicos para estas plantas, relativos al almacenamiento y tratamiento de RAEEs.

En el aspecto de la valorización, los Estados miembros deben priorizar la reutilización de aparatos enteros. Los productores (o terceros que actúen por su cuenta) deben organizar sistemas para la valorización de RAEEs recogidos selectivamente. La Directiva establece una serie de objetivos de valorización, reutilización y reciclaje para los RAEEs enviados a tratamiento, según la categoría a la que pertenezcan. Los productores (o terceros) deben mantener registros sobre cantidad de RAEEs, componentes, materiales o sustancias que entran y salen de las instalaciones de tratamiento y de las que entran en las de valorización o reciclado.

Los objetivos de valorización y reutilización/reciclado se actualizarán teniendo en cuenta los beneficios ambientales de los AEEs en uso y el progreso técnico.

En cuanto a la financiación, cabe destacar que los productores deben encargarse al menos, basándose en el Principio de Responsabilidad del Productor, del coste la recogida, tratamiento, valorización y eliminación respetuosa con el medio ambiente de RAEEs.

Los usuarios de AEEs deben recibir la información necesaria respecto a la eliminación selectiva de los RAEEs, sistemas de devolución y recogida de que disponen, efectos potenciales sobre el medio ambiente y la salud de las sustancias presentes en estos residuos, etc.

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

Los productores deben aportar información sobre reutilización y tratamiento de cada tipo de AEEs puesto en el mercado, identificando los distintos componentes y materiales así como su localización en dichos aparatos. El productor ha de ser identificado claramente en cualquier AEE puesto en el mercado después del 13 de agosto de 2005 mediante una marca en el mismo.

Cada Estado miembro debe elaborar un registro de productores, recabando anualmente información con previsiones fundamentadas de cantidades y categorías de AEEs puestos en su mercado, vía de recogida y cantidad reutilizados, reciclados, valorizados así como exportados.

### **REAL DECRETO 208/2005, de 25 de febrero, sobre aparatos eléctricos y electrónicos y la gestión de sus residuos.**

La normativa aplicable sobre AEEs y la gestión de sus residuos a nivel estatal es la establecida en el **Real Decreto 208/2005**, de 25 de febrero. En ella se trasponen las obligaciones establecidas en la **Directiva 2002/96/CE** para la fabricación del producto y la correcta gestión cuando este se convierta en un residuo. Así mismo, se cumplen las especificaciones establecidas en la **Ley 10/1998**, de 21 de abril, de Residuos, en la que se aboga por la reutilización, reciclado y valoración de las distintas tipologías de residuos.

Este Real Decreto, también contempla la necesidad de ajustar las operaciones de tratamiento de este tipo de residuos a las mejores técnicas disponibles (MTDs), como las define la **Ley 16/2002**, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación (IPPC).

Los productores de aparatos eléctricos y electrónicos deben inscribirse o estar inscritos en el Registro de Establecimientos Industriales (REI) como marca la **Ley 21/1992**, de 16 de julio, de Industria y del Reglamento del REI, aprobado por el **Real Decreto 697/1995**, de 28 de abril. Los productores deben declarar los tipos y cantidades de AEEs que comercializan cada año en España, con el fin de facilitar la exacta y justa distribución de la carga financiera en la gestión de los RAEEs. También permite obtener datos estadísticos fiables para el cálculo de los objetivos ecológicos que se vayan alcanzando.

Siguiendo las pautas marcadas por la Directiva 2002/96, los principales contenidos del real decreto son:

- La obligación a los productores de que los aparatos puestos en el mercado a partir del 13 de agosto de 2005, sean recogidos y gestionados adecuadamente cuando estos se conviertan en residuo.
- Obligación de recogida de los RAEEs generados antes de la entrada en vigor del RD el 13 de agosto de 2005 (los llamados RAEEs históricos) y su gestión en las mismas condiciones ecológicas. El costo de esa operación de tratamiento y gestión se asumirá por todos los responsables de la puesta en el mercado de estos aparatos, en proporción de sus respectivas cuotas de mercado.
- Distinguir en la recogida y entrega entre RAEEs de origen doméstico y los de origen industrial.
- Objetivo mínimo de recogida y tratamiento, de 4 kg de RAEE/habitante/año.

Junto con las obligaciones y objetivos descritos anteriormente, otros aspectos importantes que se desarrollan en el articulado de la norma son:

- Las medidas de prevención en la fase de diseño y producción de AEEs.
- Metodología a seguir para proceder a la entrega de los RAEEs.

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

- Tratamiento que se les debe dar a los residuos así como los requisitos técnicos de las instalaciones de recogida y tratamiento de RAEEs (desarrollado en los Anexos III y IV).
- Obligaciones de los productores.
- Definición de las características de los sistemas integrados de gestión (SIG) de los RAEEs.
- Establecimiento de los objetivos de recogida, valorización, reutilización y reciclado.
- Identificación y marcaje de los AEEs (simbología desarrollada en el Anexo V).
- Información que debe suministrarse tanto a las comunidades autónomas como al Ministerio de Medio Ambiente.
- Régimen sancionador.

Las disposiciones adicionales y transitorias de esta norma, hacen referencia a la inscripción en el REI y a la financiación de la gestión de los residuos, entre otros.

El Real Decreto establece las 10 categorías de AEEs identificadas en la Directiva, así como las excepciones a las prohibiciones de utilizar plomo, mercurio, cadmio y cromo hexavalente en los materiales y componentes de AEEs.

### 1.2.3 Situación actual de la gestión en España

Conocer la situación actual de la gestión de los RAEEs en España es imprescindible para escoger la localización más idónea de la planta y dimensionarla. Sin embargo, describir y analizar esta situación es complicado.

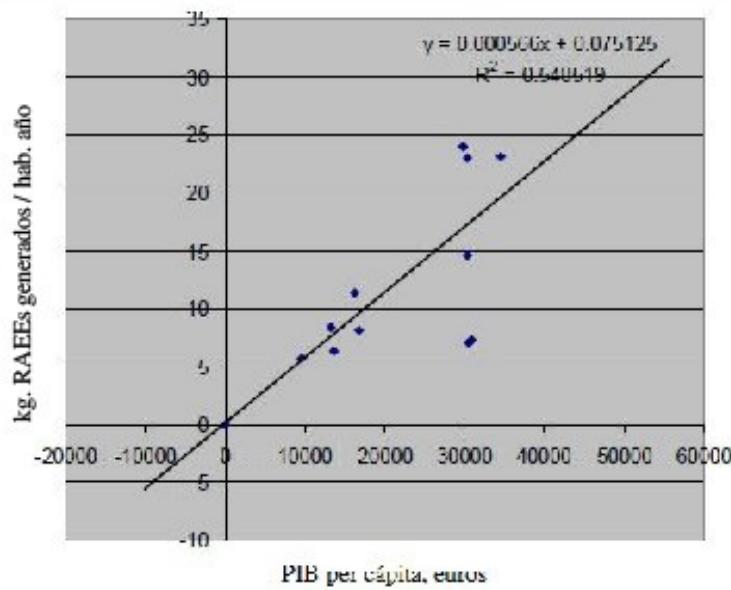
La aplicación de una legislación muy reciente (la Directiva de RAEEs se traspuso en 2005), con diferentes grados de implantación y resultados todavía parciales, unido a la complejidad intrínseca de este grupo de residuos que se divide en 10 categorías, heterogéneas a su vez, dificultan en gran medida la obtención de datos completos, detallados y fiables, tanto en lo que respecta a la producción de estos residuos como a su recogida y tratamiento.

Para poder situar la planta de tratamiento en el territorio nacional y dimensionarla correctamente, lo idóneo sería disponer de datos de producción, recogida y tratamiento de RAEEs por cada categoría y por Comunidad Autónoma. Ya que los datos disponibles no permiten el conocimiento preciso de estas magnitudes, se opta por métodos de estimación.

Para estimar la cantidad de RAEEs producidos, se ha calculado la tasa de producción por habitante y año en cada Comunidad Autónoma por dos vías diferentes. Por cuestiones de logística centraremos el estudio en el ámbito del territorio nacional.

La primera vía de estimación se basa en la correlación entre PIB per cápita y kilogramo de RAEEs producidos por habitante y año, para países de la Unión Europea, recogida en el informe de la United Nations University (de ahora en adelante UNU): *2008 Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)*, y que se muestra en la Ilustración 2.

 <b>Universidad</b> <b>de Granada</b>  <b>Facultad de</b> <b>Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------



*Ilustración 2: Correlación entre PIB per cápita y kg de RAEEs / hab año. Fuente: United Nations University*

El PIB per cápita para cada Comunidad Autónoma se calcula a partir de los datos del INE. Los resultados se muestran en la Tabla 1:

COMUNIDAD AUTÓNOMA	PIB (mill. de €)	Población	PIB per cápita	Kg RAEEs hab · año	Total RAEEs (t)
Andalucía	145.452	8.270.427	17.587	10,0	82.947
Aragón	34.098	1.315.509	25.920	14,7	19.398
Asturias	23.175	1.054.560	21.976	12,5	13.196
Cantabria	13.290	578.304	22.981	13,1	7.566
Castilla y León	57.491	2.483.842	23.146	13,2	32.727
C. La Mancha	37.979	2.045.401	18.568	10,6	21.650
Cataluña	200.323	7.303.062	27.430	15,6	113.931
C. Valenciana	102.942	5.001.312	20.583	11,7	58.641
Extremadura	17.491	1.083.101	16.149	9,2	9.981
Galicia	57.678	2.732.001	21.112	12,0	32.851
Madrid	189.432	6.371.531	29.731	16,9	107.697
Murcia	28.169	1.471.427	19.144	10,9	16.054
Navarra	18.726	622.788	30.068	17,1	10.646
País Vasco	66.575	2.127.813	31.288	17,8	37.841
La Rioja	8.171	312.718	26.129	14,9	4.648

*Tabla 1: Toneladas de RAEEs producidos por CCAA (dependencia del PIB).*

*Fuente: Elaboración propia.*

 <b>Universidad de Granada</b> <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

El segundo método para el cálculo de la tasa de producción de RAEEs considera que ésta es fuertemente dependiente del volumen total de residuos generados.

La Unión Europea estima que los RAEEs son un 5% del total en peso de residuos sólidos urbanos (RSU), sin embargo, dentro de la Unión Europea estos porcentajes varían considerablemente entre los distintos países, con tasas que van desde los 14 a los 24 kg/hab·año.

En España este porcentaje es menor. En este caso, se ha seleccionado para el cálculo un valor conservador del 3%. Los datos del total de RSU se obtienen del INE y solo están disponibles hasta el año 2010. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

<b>COMUNIDAD AUTÓNOMA</b>	<b>Total RSU (t)</b>	<b>Total RAEEs (t)</b>	<b>Kg RAEEs hab · año</b>
Andalucía	4.974.948	149.248	18,0
Aragón	602.239	18.067	13,7
Asturias	617.707	18.531	17,6
Cantabria	356.284	10.689	18,5
Castilla y León	1.182.214	35.466	14,3
C. La Mancha	1.130.863	33.926	16,6
Cataluña	3.998.833	119.965	16,4
C. Valenciana	2.304.815	69.144	13,8
Extremadura	565.836	16.975	15,7
Galicia	1.217.833	36.535	13,4
Madrid	2.705.211	81.156	12,7
Murcia	907.503	27.225	18,5
Navarra	317.144	9.514	15,3
País Vasco	1.076.053	32.282	15,2
La Rioja	134.523	4.036	12,9

Tabla 2: Kg. RAEEs producidos / hab. año por CCAA (dependiente de RSU).

Fuente: Elaboración propia.

Para propósitos de cálculo de la tasa de producción de RAEEs por habitantes y día para cada Comunidad Autónoma se obtiene una media aritmética de ambas tasas. Los datos se tabulan en la Tabla 3.

<b>COMUNIDAD AUTÓNOMA</b>	<b>Tasa media (Kg RAEEs/hab·año)</b>	<b>Total RAEEs (t)</b>	<b>% sobre el total</b>
Andalucía	14,0	116.098	18,84
Aragón	14,2	18.733	3,04
Asturias	15,0	15.864	2,57
Cantabria	15,8	9.127	1,48
Castilla y León	13,7	34.096	5,53
C. La Mancha	13,6	27.788	4,51

 <b>Universidad</b> <b>de Granada</b>  <b>Facultad de</b> <b>Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

Cataluña	16,0	116.948	18,98
C. Valenciana	12,8	63.893	10,37
Extremadura	12,4	13.478	2,19
Galicia	12,7	34.693	5,63
Madrid	14,8	94.427	15,32
Murcia	14,7	21.640	3,51
Navarra	16,2	10.080	1,64
País Vasco	16,5	35.061	5,69
La Rioja	13,9	4.342	0,70

Tabla 3: Tasa media de producción de RAEEs por CCAA, en toneladas.

Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 3: Esquema de la distribución de RAEEs en la Península. Fuente: Elaboración propia.

A continuación se estiman las cantidades de RAEEs recogidas por Comunidad Autónoma. La *Memoria de la Fundación Ecotic* (año 2011) contiene datos de los RAEEs que ha gestionado este SIG clasificados por categoría en cada Comunidad Autónoma (a excepción de la categoría 5), Tabla 4, y de su cuota de mercado en cada categoría, Tabla 5. Asumiendo, como hipótesis de cálculo la misma cuota de mercado en cada Comunidad, se estiman las cantidades de RAEEs recogidas por categoría y Comunidad Autónoma, Tabla 6.

 <b>Universidad de Granada</b> <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

### ORIGEN DOMÉSTICO (kilogramos)

CCAA ORIGEN	CAT01	CAT02	CAT03	CAT04	CAT06	CAT07	CAT08	CAT09	TOTAL
Andalucía	2.116.883	141.504	286.057	1.363.307	40.453	2.858			3.951.063
Aragón	604.671	39.208	44.524	288.893	16.377	9.044			1.002.717
Asturias (Principado de)	338.285	7.626	78.658	314.275	3.216	15.117	2.280	245	759.701
Baleares (Islas)	701.154	54.869	132.129	483.457	20.241	6.469	97	846	1.399.261
Canarias	1.307.759	5.407	163.034	512.798	15.327	8.901	1.435	106	2.014.767
Cantabria	198.753	286	5.473	26.664	601	853	56	3	232.688
Castilla - La Mancha	229.200	26.154	51.680	181.494	4.036	794			493.358
Castilla y León	496.331	18.813	187.642	582.866	1.932	9.137	1.318	202	1.298.240
Cataluña	2.262.339	33.437	628.603	3.116.275	13.630	34.402	872	9.480	6.099.038
Comunidad Valenciana	599.176	24.426	62.029	740.771	4.931	1.086			1.432.419
Extremadura	49.363	1.944	31.388	34.858	424				117.976
Galicia	262.057	52.196	104.687	612.264	710	15.203	2.171	254	1.049.543
Madrid (Comunidad de)	2.452.523	88.220	266.143	1.170.981	52.506	57.511	2.671	560	4.091.115
Murcia (Región de)	405.186	3.182	9.116	36.602	262				454.348
Navarra (Comunidad Foral de)	674.883	29.606	112.635	585.823	3.656	15.118	30		1.421.752
País Vasco	1.469.463	18.200	175.129	998.611	2.975	40.049	5.973	648	2.711.048
Rioja (La)	15.005	263	30.311	47.164					92.743
Ciudad Autónoma de Ceuta	5.358	11	4.491	551					10.410
Ciudad Autónoma de Melilla	4.598		3.753	1.723			267		10.361
Total Doméstico	14.192.987	545.349	2.377.483	11.099.377	181.276	216.544	17.171	12.343	28.642.550

Tabla 4: Cantidad de RAEEs gestionados por CCAA, en Kg. Fuente: ECOTIC.



Ilustración 4: Evolución de la cuota de mercado de ECOTIC. Fuente: Fundación ECOTIC.

 <b>Universidad de Granada</b>  <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	ESTUDIO DE VIABILIDAD
---	--	-----------------------

Categoría	€	REI-RAEE	Cuota Mercado
1/ Grandes electrodomésticos	70.993	386.714	18,4%
2/ Pequeños electrodomésticos	3.190	49.177	6,5%
3/ Equipos informáticos y de telecomunicaciones	8.554	38.791	22,1%
4/ Aparatos electrónicos de consumo	39.456	55.367	71,3%
5/ Aparatos de alumbrado	83	11.428	0,7%
6/ Herramientas eléctricas y electrónicas	3.687	13.637	27%
7/ Juguetes y equipos de ocio y tiempo libre	9.202	11.611	79,3%
8/ Aparatos médicos	128	489	26,2%
9/ Instrumentos de medida y control	303	691	43,9%
<b>TOTAL</b>	<b>135.602</b>	<b>567.909</b>	<b>24%</b>

Cuota de mercado de ECOTIC por categoría de producto en valores absolutos y en porcentaje.  
Magnitudes expresadas en toneladas.

Tabla 5: Cuota de mercado por categoría (t. y porcentaje). Fuente: ECOTIC.

Comunidad Autónoma	Residuos recogidos (kg)	% recogido	Estimación recogido SIG(t)	Total recogido (t)
Andalucía	1.363.307	13,50	2.117,1	2.969,3
Aragón	288.893	2,86	448,6	629,2
Asturias	314.275	3,11	488,1	684,5
Cantabria	26.664	0,26	41,4	58,1
C. y León	582.866	5,77	905,2	1.269,5
C. La Mancha	181.494	1,80	281,8	395,3
Cataluña	3.116.275	30,85	4.839,4	6.787,4
C. Valenciana	740.771	7,33	1.150,4	1.613,4
Extremadura	34.858	0,35	54,1	75,9
Galicia	612.264	6,06	950,8	1.333,5
Madrid	1.170.981	11,59	1.818,5	2.550,4
Murcia	36.602	0,36	56,8	79,7
Navarra	585.823	5,80	909,7	1.275,9
País Vasco	998.611	9,89	1.550,8	2.175,0
La Rioja	47.164	0,47	73,2	102,7
<b>Total</b>	<b>10.100.848</b>	<b>100</b>	<b>15.686</b>	<b>22.000</b>

Tabla 6: Estimación de RAEEs recogidos por CCAA, en toneladas.

Fuente: Elaboración propia.

En la elección del emplazamiento donde situar la planta se tendrán en cuenta una serie de factores adicionales a los generalmente utilizados para esta tarea. Estos factores son los siguientes:

- **Estimación de RAEEs producidos y recogidos.** Se considera el factor más importante a la hora de situar la planta. Los ingresos de una planta de tratamiento de RAEEs dependen

 <b>Universidad de Granada</b> <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

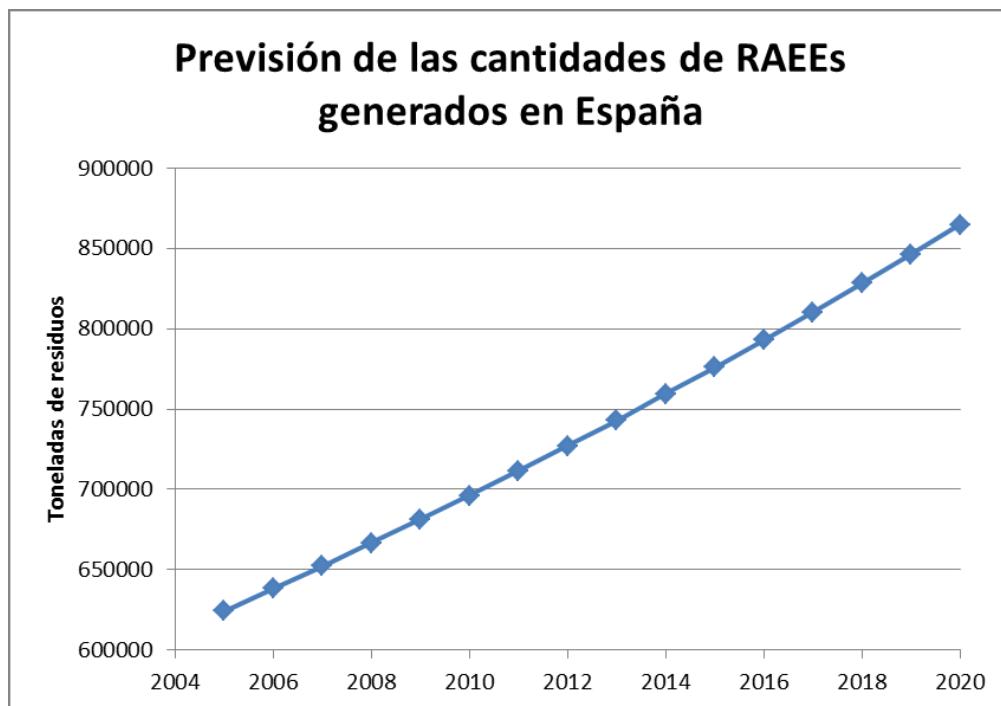
directamente del tonelaje de residuos gestionados. Los residuos recogidos representan aquellos que son susceptibles de ser tratados por la planta a día de hoy, mientras que los producidos son el máximo que puede llegar a tratarse conforme la recogida de RAEEs se hace más efectiva.

- **Proximidad geográfica** a las zonas o comunidades donde se recogen la mayor cantidad de residuos adecuados para ser tratados.
- **PIB per cápita.** Pues la riqueza de una población influye directamente en el consumo y velocidad de reposición de los aparatos eléctricos y electrónicos.

#### 1.2.4 Previsión de generación de RAEEs en España

Plantear unas previsiones de crecimiento de los RAEEs a corto plazo es complicado debido a los efectos de la actual crisis económica. Anteriormente a ésta, la UNU estimaba un **crecimiento anual del 2%**. Desde un punto de vista conservador nos atenemos a este valor para la tasa de crecimiento.

La capacidad de los SIGs en cuanto al tratamiento de RAEEs supera ampliamente las cantidades generadas, en el caso de que la recogida alcanzara la totalidad de los residuos estimados.



*Ilustración 5: Previsión de las cantidades de RAEEs generados en España anualmente, en toneladas. Fuente: Elaboración propia.*

Año	t chatarra TV/monitor (ECOTIC)	t chatarra TV/monitor (NACIONAL)
2009	9.898	13.882
2010	15.913	22.318



2011	15.686	22.000
2012	16.000	22.440
2013	16.320	22.889
2014	16.646	23.347
2015	16.979	23.814
2016	17.319	24.290
2017	17.665	24.776
2018	18.018	25.271
2019	18.379	25.777
2020	18.746	26.292
2021	19.121	26.818
2022	19.504	27.354
2023	19.894	27.901
2024	20.292	28.459
2025	20.697	29.029

Tabla 7: Cantidad de chatarra de TV a tratar, en toneladas. Fuente: Elaboración propia.

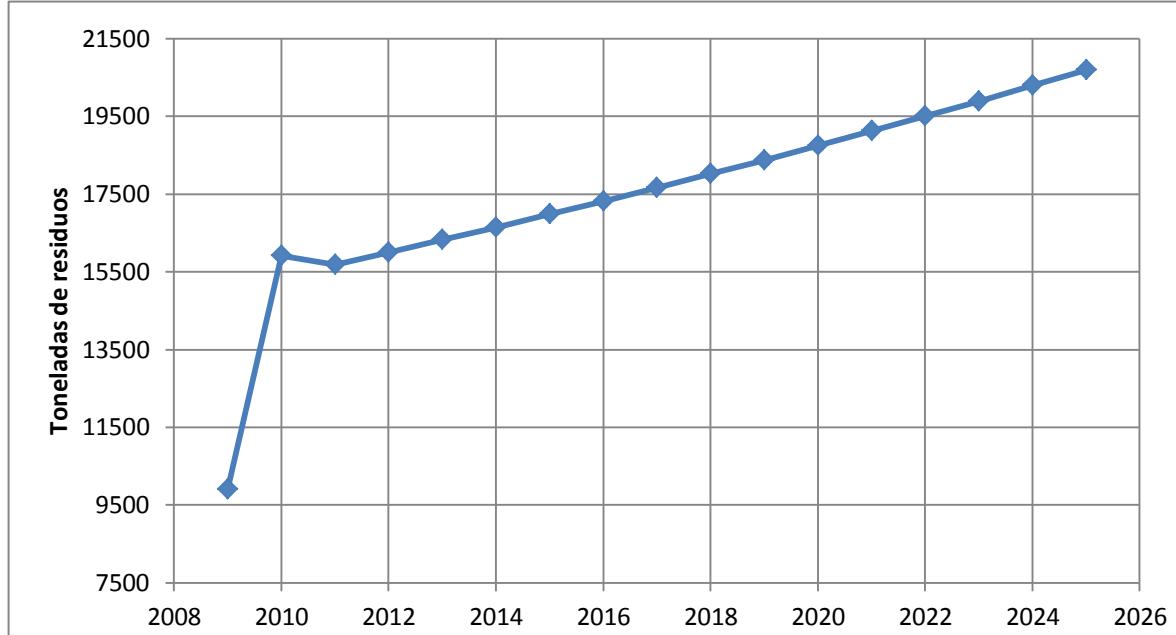


Ilustración 6: Proyección de tratamiento de chatarra de pantallas por ECOTIC.  
Fuente: Elaboración propia.

Y teniendo en cuenta que la cuota de mercado de ECOTIC, según los datos publicados por dicho SIG, es de 71,3% para aparatos electrónicos de consumo (ver Tabla 5), podemos estimar la cantidad de esta chatarra procesada en todo el territorio nacional, Ilustración 7.

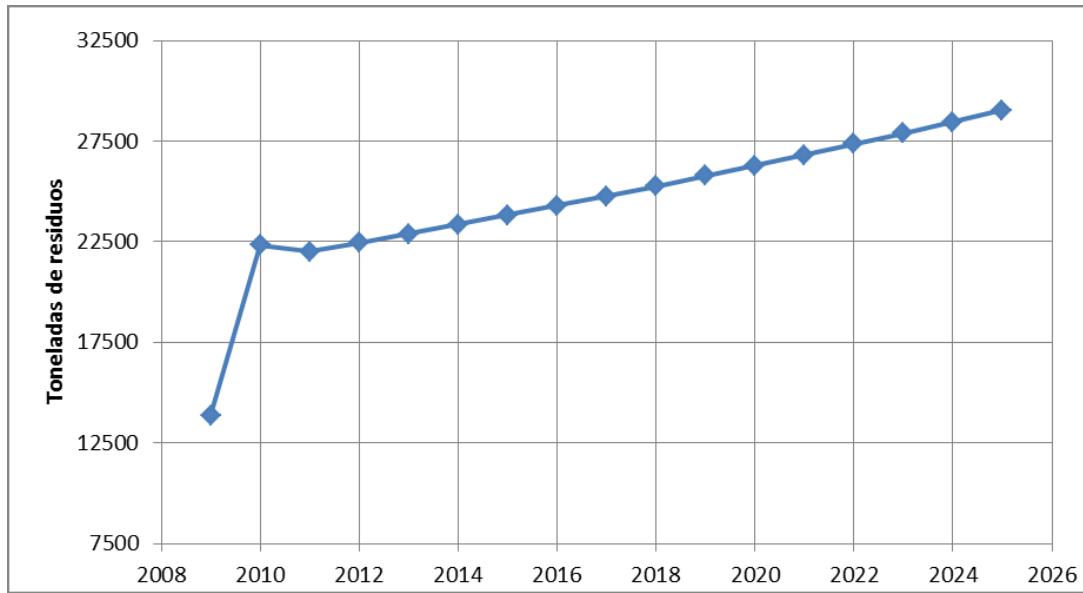


Ilustración 7: Proyección de tratamiento de chatarra de pantalla, totalidad de SIGs.

Fuente: Elaboración propia.

Atendiendo a una cantidad de procesamiento máximo de aproximadamente 29000 t en el año 2025. Considerando una capacidad para tratar el 65% de esta cantidad y que la fracción de vidrio presente en dichos residuos es del 54%, es posible obtener un valor para la cantidad de chatarra de pantalla de cristal líquido (LCD) que será susceptible de ser tratada por una industria estratégicamente situada, ver Ilustración 12.

Para obtener unas previsiones certeras, acerca de los residuos que serán útiles es preciso considerar el porcentaje de la tecnología LCD en el total de los residuos de pantalla, este porcentaje según el *Informe 2010 del macrosector TIC en España (Asimelec)*, es del 95% (Ilustración 8).

En base a estos parámetros la cantidad de residuos de pantalla de cristal líquido susceptibles de ser tratados por una nueva industria es de 10000 t/año, en el año 2025.

Por tanto se decide dimensionar la planta para una capacidad de tratamiento de 10000 toneladas de chatarra de LCD al año, lo cual supondría una producción de 14 t de In anuales: 10000 t chatarra

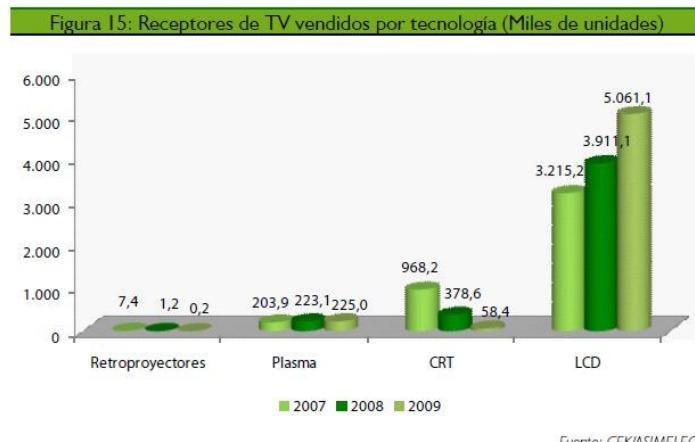


Ilustración 8: Distintas tecnologías de pantalla. Fuente: Asimelec



LCD\*(1,4 kg In/1 t LCD), ver Tabla 8.

La planta ha sido dimensionada por encima de la cantidad de residuos generados anualmente para compensar el hecho de que es necesario tratar el residuo acumulado de años anteriores, ver Ilustración 9. De este modo, por lo general, la planta trabajará cerca del máximo de su capacidad de tratamiento.

Suponiendo que la planta se mantiene activa 330 días al año tenemos que la cantidad de chatarra tratada al día es 35 t/día (ligeramente sobredimensionado) y la cantidad de indio obtenido es 31 kg diarios.

Categorías	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Frigoríficos	483	4.070	8.055	10.699	15.509	22.141
Aires acondicionados	20	379	952	1.448	3.096	4.459
Grandes electrodomésticos	833	16.410	42.348	53.400	65.023	81.047
TV y monitores	2.972	9.800	19.588	29.486	45.399	61.085
Luminarias					24	41
Resto de RAEE	2.627	7.333	12.982	17.534	22.984	29.650
<b>TOTAL ACUMULADO</b>	<b>6.937</b>	<b>37.994</b>	<b>83.927</b>	<b>112.570</b>	<b>152.038</b>	<b>198.426</b>

Total acumulado correspondiente al mercado doméstico expresado en toneladas métricas.

Ilustración 9: Total acumulado correspondiente al mercado doméstico, en t.

Fuente: Fundación ECOTIC.

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

## 1.3 *Producto y materia prima*

### 1.3.1 **Producto. Generalidades del indio**

Elemento químico del grupo 13 de la tabla periódica, de número atómico 49 y peso atómico 114,81. Ocupa la posición 63º en la clasificación por abundancia en la corteza terrestre, siendo tres veces más abundante que la plata y el mercurio. Es uno de los metales más demandados del planeta. Es de color blanco plateado y presenta un lustre muy brillante.

El indio se presenta en la Tierra de forma natural únicamente en formas de dos núclidos principales,  $^{113}\text{In}$  y  $^{115}\text{In}$ . A parte de estos dos, el  $^{115}\text{In}$  genera más del 95,7% de todo el indio pero es radioactivo, desintegrandose a  $^{115}\text{Sn}$  por medio de decaimiento beta con una vida media de  $4,41 \cdot 10^{14}$  años, cuatro órdenes de magnitud mayor que la edad del Universo y cercano a 50000 veces mayor que la vida media del torio natural. Esta situación es poco común entre los elementos estables de la tabla periódica; solo el indio, teluro, y renio han demostrado tener isótopos radioactivos más abundantes. El menos común isótopo natural del indio, el  $^{113}\text{In}$ , es estable.

El indio tiene 39 isótopos conocidos, cuyas masas están en el intervalo entre 97 y 135. Únicamente uno de ellos es estable y uno tiene una vida media que sobrepasa los  $10^{14}$  años, el otro isótopo de indio más estable es  $^{111}\text{In}$ , cuya media es aproximadamente de 2,8 días. Todos los demás isótopos tienen vidas medias menores a 5 horas.

El indio se comercializa como metal en grados de pureza diferentes y en formas diversas como: lingotes, láminas, polvo, cinta y alambre entre otras.



*Ilustración 10: Metal de indio de alta pureza en forma de lingotes. Fuente: Wikipedia.*

El mineral más importante en la minería del indio (0,1% de In) es el sulfuro de zinc (ZnS), también conocido bajo el nombre de blenda o esfalerita, que se presenta en mezcla isomorfa con



indio. El indio puede ser también obtenido a partir de residuos generados durante el procesado de minas de hierro, plomo y cobre.

Su éxito industrial se debe a la mezcla de óxido de indio ( $In_2O_3$ ) y óxido de estaño ( $SnO_2$ ), típicamente formada en un 90 por ciento de óxido de indio y en un 10 por ciento de óxido de estaño (en peso). Esta mezcla se conoce como ITO (del inglés, Indium Tin Oxide), y en capa fina es transparente e incolora. Su importancia radica en el compromiso entre conductividad eléctrica y transparencia óptica, vital para su uso como electrodos de las pantallas de cristal líquido LCD.

- Propiedades físicas.

Parecido al zinc, es maleable, fácilmente fundible, con estructura cristalina tetragonal, dureza Mohs de 1,2. Se obtiene por electrólisis de la solución acuosa de sus sales.

Tiene un bajo punto de fusión, 156,60°C; mayor que el de su homólogo más ligero, el galio, pero más bajo que el del talio, su homólogo más pesado.

Su punto de ebullición es, sin embargo, moderado, siendo 2072°C, mayor que el del talio, pero menor que el del galio, mostrando una oposición a la tendencia de puntos de fusión. La densidad del indio,  $7,31\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , es también mayor que la del galio, pero menor que la del talio.

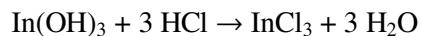
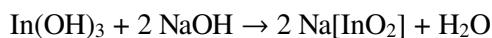
Un átomo de indio tiene 49 electrones, y muestra una configuración electrónica:  $[Kr]4d105s25p1$ . En sus compuestos, comúnmente el indio pierde sus electrones exteriores, pasando a ser el ión indio(III),  $In^{3+}$ , pero en algunos casos el par electrónico 5s puede permanecer dentro del átomo, siendo el indio oxidado a indio(I),  $In^+$ .

- Propiedades químicas.

El indio es un metal de pos-transición y químicamente, es el elemento intermedio entre sus compañeros del grupo 13, galio y talio. Presenta dos estados de oxidación principales, +1 y +3, siendo el último más estable, mientras que el único estado de oxidación común del galio es +3 y el talio presenta más frecuentemente +1 que +3. El talio(III) es un agente oxidante moderadamente fuerte, mientras que indio (III) es estable y el indio(I) un poderoso agente reductor.

El indio no reacciona con agua, pero es oxidado por agentes oxidantes fuertes, tales como halógenos o el ácido oxálico, para dar compuestos de indio(III). No reacciona con boro, silicio o carbono, no siendo conocidos los correspondientes boruros, siliciuros o carburos. De forma similar, no se observa reacción alguna entre indio e hidrógeno, pero son conocidos los hidruros de indio(I) e indio(III).

El óxido de indio(III) se forma a altas temperaturas mediante la reacción de indio y oxígeno, con llama azul. Es anfótero, pudiendo reaccionar tanto con ácidos como con bases. De su reacción con agua resulta el insoluble hidróxido de indio(III), también anfótero, reacciona con ácidos para dar sales de indio(III):



A parte de las sales de indio(III) comunes; cloruro, sulfato y nitrato son solubles. En disolución acuosa, los iones  $In^{3+}$  y  $[InO_2]^-$  se hidrolizan para dar  $InOH_2^+$  y  $HInO_2$  debido al carácter generalmente anfótero de los iones de indio(III).

Los compuestos de indio(III), de forma similar a los compuestos de talio(III) no son fácilmente solubles; sin embargo, las sales de indio(III) de ácidos fuertes, tales como cloruro, sulfato y nitrato son solubles, hidrolizando en soluciones acuosas. El ión  $In^{3+}$  es



incoloro en solución debido a la ausencia de electrones desapareados en los orbitales electrónicos d y f.

Los compuestos de indio(I) no son tan comunes como los de indio(III); solo cloruro, bromuro, ioduro, sulfuro y ciclopentadienil han sido adecuadamente caracterizados. El sulfuro de indio(I) es el producto de reacción entre indio y azufre o indio y ácido sulfídrico, y puede ser común a 700-1000°C. El óxido de indio(I) es común a 850°C durante la reacción entre indio y dióxido de carbono o durante la descomposición de óxido de indio(III) a 1200°C.

Con menos frecuencia, el indio muestra el estado de oxidación intermedio +2, más especialmente en haluros,  $\text{In}_2\text{X}_4$  y  $[\text{In}_2\text{X}_6]^{2-}$ . Se conocen algunas otras combinaciones de indio(I) e indio(III), tales como  $\text{In}^{+16}(\text{In}^{+3}\text{Cl}_6)\text{Cl}_3$ ,  $\text{In}^{+15}(\text{In}^{+3}\text{Br}_4)_2(\text{In}^{+3}\text{Br}_6)$ ,  $\text{In}^{+1}\text{In}^{+3}\text{Br}_4$ .

- Efectos sobre la salud.

La mayoría de las fuentes consideran al indio puro en forma metálica como no tóxico. En la soldadura e industrias de semiconductores, donde la exposición a indio es relativamente alta, no existen informes acerca de efectos nocivos. Los compuestos de indio, como los compuestos de aluminio forman complejos con hidroxilos para formar sales insolubles en condiciones de basicidad, siendo entonces mal absorbidas por la comida, de ahí resulta su baja toxicidad por vía oral.

El indio(III) soluble es tóxico cuando es administrado vía parenteral, sin embargo, causa daño principalmente al riñón (interna y externamente), pero también al corazón e hígado, y puede ser agente teratogénico. Otros compuestos de indio son tóxicos cuando son administrados fuera del tracto gastrointestinal: por ejemplo, el tricloruro de indio anhídrido ( $\text{InCl}_3$ ) y fosfuro de indio ( $\text{InP}$ ) son tóxicos cuando son administrados dentro de los pulmones (del último se sospecha que es un agente carcinógeno).

- Minería del indio.

Una instalación típica de tratamiento de mineral para obtener indio está compuesta de un conjunto de fundiciones y refinerías especialmente diseñadas para transformar un mineral polimetálico en varios metales (cobre, zinc, plata, indio, plomo, oro, etc.) y una serie de subproductos (sulfato de zinc, sulfato de cobre, ácido sulfúrico, óleum, bisulfito de sodio, óxido de zinc, polvo de zinc, concentrado Zn-Ag).

Un complejo de este tipo maneja varios circuitos independientes pero totalmente integrados para el procesamiento de cobre, plomo y zinc y un subcircuito para el procesamiento de metales preciosos. Una de sus fortalezas es la gran sinergia que existe entre ellos y que hace que las operaciones sean funcionales y competitivas.

Contando con instalaciones como: planta de procesamiento de material recirculado, planta de tratamiento de aguas industriales, plantas de tratamiento de aguas residuales, depósitos para disposición de residuos sólidos domésticos, precipitadores electrostáticos.

Un circuito del zinc a partir del cual se obtiene indio metálico produce zinc de alta pureza (99,995%) y otros subproductos.

Comprende las plantas de preparación de concentrados, tostación de zinc, lixiviación, electrodeposición, purificación, moldeo, indio, sulfato de zinc y planta de flotación de ferritas. A continuación una breve descripción:

- a) Planta de preparación de concentrados

 <b>Universidad</b> <b>de Granada</b>  <b>Facultad de</b> <b>Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

Los concentrados de zinc procedentes de la mina son transportados por vía férrea y camiones a esta planta, donde se realizan las mezclas apropiadas que luego son alimentadas al tostador de cama turbulenta.

b) Planta de tostación de zinc

La planta de tostación procesa la mezcla de concentrados de zinc en un tostador para la obtención de calcina ( $ZnO$ ) y gases de  $SO_2$  que se envían a la planta de ácido sulfúrico.

c) Planta de lixiviación

En esta planta se procesa la calcina producida en la planta anterior con la finalidad de transformar el óxido de zinc en sulfato de zinc mediante lixiviación con ácido sulfúrico.

d) Planta de flotación de ferritas

Esta planta tiene como finalidad tratar las ferritas que se obtienen en la etapa de lixiviación para producir concentrado de Zn-Ag para su comercialización.

e) Planta Zileret

Las ferritas obtenidas en la etapa de separación de sólidos, son tratadas en un horno en el que, mediante un proceso de oxidación-reducción, se obtiene óxido de zinc con contenidos de indio (fume) y esponja de fierro. El fume es procesado en la etapa de hidrometalurgia y la esponja es transferida a los circuitos de cobre y plomo.

f) Planta hidrometalurgia

La planta hidrometalurgia tiene como finalidad lixiviar el fume (óxido de zinc con contenido de indio) producido en el horno para recuperar el zinc en solución y obtener concentrados de indio.

g) Planta de sulfato de zinc

A partir de las soluciones de zinc se produce sulfato de zinc sólido monohidratado, para la venta del sector minero.

h) Planta de indio

El concentrado de indio es tratado en esta planta con una serie de procesos selectivos obteniéndose indio metálico refinado de 99,99% de pureza.

i) Planta de purificación

Las impurezas contenidas en la solución de sulfato de zinc proveniente de la etapa de separación de sólidos, son eliminadas precipitándolas con adición controlada de polvo de zinc.

j) Planta de electroobtención

En esta planta, mediante un proceso electroquímico el zinc contenido en la solución purificada de sulfato de zinc se deposita sobre cátodos de aluminio formando láminas, estas láminas son eliminadas y enviadas a la etapa de fusión y moldeo.

l) Planta de fusión y moldeo

Las láminas de zinc catódico que provienen de la planta de electroobtención se funden en un horno eléctrico de inducción y luego se moldea en lingotes, tras lo cual son apilados y embalados.

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

- Evolución y aplicaciones

El indio fue utilizado en la Segunda Guerra Mundial para recubrir los motores de los aviones. Después de esto se utilizó en aleaciones, soldadura y en la industria electrónica.

A partir de la segunda mitad de los años 80 creció el interés en el uso de fosfuros de indio semiconductores y películas delgadas de óxidos de indio y estaño para el desarrollo de pantallas de cristal líquido (LCD), debido a que el uso del indio permitió la obtención del color azul en diodos LED, que se había resistido durante años.

En una sociedad eminentemente tecnológica como la actual, infinidad de objetos de todos los tamaños que utilizan pantallas LCD contienen indio. Por ejemplo: relojes, receptores GPS, teléfonos móviles, pantallas de TV, ordenadores portátiles tipo “Notebook”, computadoras tipo “Tablet” (con pantalla táctil), etc.

Aleaciones y soldaduras son el siguiente campo de aplicación por importancia. Las soldaduras con contenido en indio tienen menor propagación de fractura y mejoras de la resistencia a la fatiga térmica comparado con soldaduras de estaño-plomo. Neutraliza la lixiviación de compuestos de oro en aparatos eléctricos.

En fusibles y enlaces eléctricos. También como herramientas para moler materiales delicados.

En la industria óptica, las aleaciones de bajo punto de fusión (una aleación con un 24% en indio y 76% en galio es líquida a temperatura ambiente) se emplean como superficie en herramientas para el agarre durante el proceso de limpieza de lentes.

Otras aplicaciones son:

- Fabricación de fotoconductores, transistores de germanio, rectificadores y termistores.
- Su óxido se emplea en la fabricación de paneles electroluminiscentes.
- También reduce la transferencia de calor a través de ventanas gracias a sus propiedades reflectantes de rayos infrarrojos.
- Materiales semiconductores con contenido en indio son: antimoníuro de indio ( $InSb$ ), arseníuro de indio ( $InAs$ ), nitrógeno de indio ( $InN$ ) y el anteriormente mencionado fosfuro de indio ( $InP$ ). Utilizados como: detectores de infrarrojos, transistores de alta frecuencia y células fotovoltaicas de alta eficiencia.

En menor medida es utilizado en: fibras ópticas, aleaciones dentales, sustitución de aleaciones de mercurio, barras de control de reactores nucleares, fósforos y aleaciones de oro blanco.

Digno de mención es el auge previsto para el uso de óxido de indio dopado con estaño (ITO) en fabricación de diodos emisores de luz orgánica (OLED), en los próximos años.

 <b>Universidad</b> <b>de Granada</b>  <b>Facultad de</b> <b>Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

### 1.3.2 Materia prima. Pantallas de cristal líquido (LCD)

El rápido desarrollo de las técnicas de cristal líquido, unido al auge de la tecnología en telecomunicaciones móviles de los últimos años, ha disparado la demanda por películas ITO utilizadas como películas conductoras transparentes para cristales líquidos.

La primera generación de LCD es ya un residuo y actualmente, los únicos métodos de eliminación en nuestro país son la incineración y el vertedero.

Por un lado, la incineración genera productos volátiles y residuos tóxicos a la vez que contribuye al calentamiento global mediante la formación de monóxido de carbono por combustiones incompletas.

Por otro lado, la eliminación en vertederos de los LCD no es respetuosa con el medio ambiente, puesto que los LCD de gran tamaño incluyen una lámpara fluorescente (con contenido en mercurio) y que la batería de pequeños LCD puede contener mercurio o cadmio, sustancias clasificadas como tóxicas debido a sus efectos acumulativos en el cuerpo humano y el medio ambiente.

La **Directiva 2002/96/CE** del Parlamento Europeo y del Consejo de 27 de enero de 2003, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, señala que “deberán extraerse las pantallas de cristal líquido” de más de 100 cm<sup>2</sup> de superficie y todas las provistas de lámparas de descarga de gas como iluminación de fondo por medios selectivos”.

#### 1.3.2.1 Estructura de un LCD

Un LCD presenta una estructura tipo sándwich compuesta por dos filtros polarizantes con filas de cristales líquidos alineadas perpendicularmente entre sí. Según la Ilustración 11, una pantalla típica de LCD está compuesta de los siguientes elementos:

- Pantalla de cristal líquido: controla el rendimiento de la luz mediante el empleo de cristal líquido. El cristal líquido es un compuesto orgánico con las propiedades ópticas y estructurales características de los cristales, pero con el comportamiento mecánico de un fluido.
- Controlador interfaz: recibe información externa y la envía al conector de la pantalla más adecuado.
- Sistema de alumbrado: genera una fuente de luz uniforme y constante. Esta luz generada por la lámpara fluorescente se centra a través de la pantalla de cristal líquido gracias a los films difusores y a la placa difusora de la luz.
- Inversor: suministra altos voltajes y la corriente demandada por la lámpara fluorescente.
- Marco metálico: proporciona el soporte mecánico necesario para sujetar el modulo del LCD, los TCP drivers, la electrónica de la interfaz, la lámpara fluorescente y en algunos casos el inversor.

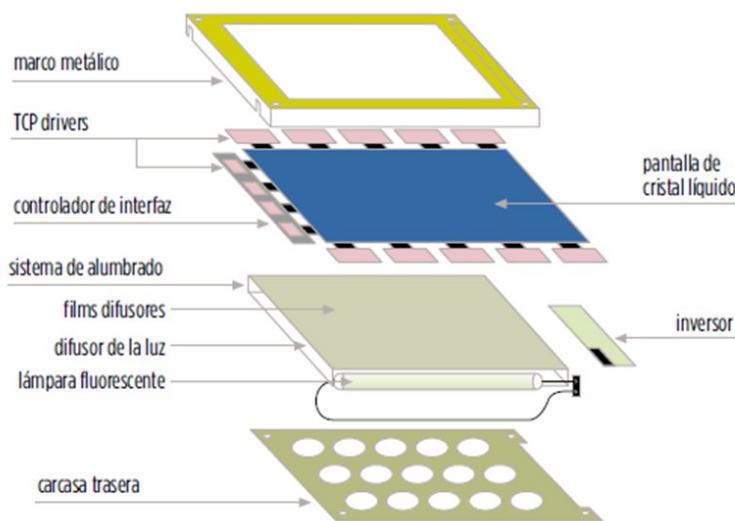


Ilustración 12: Estructura de una típica pantalla LCD.

Fuente: Gaiker Centro Tecnológico.

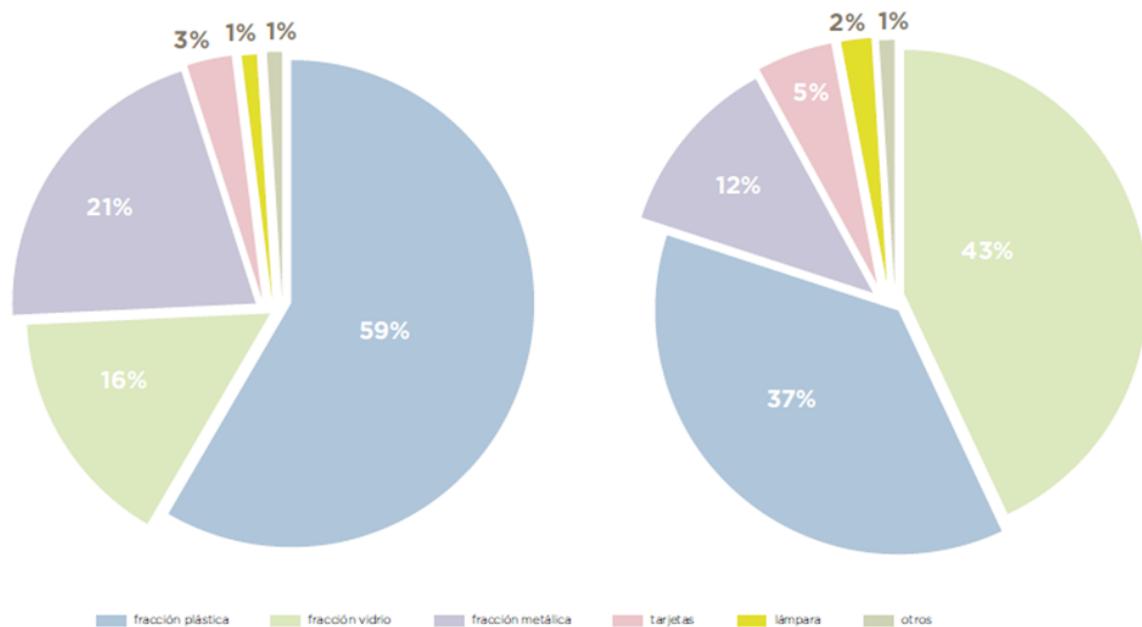


Ilustración 11: Composición de LCDs de distintos tamaños.

Fuente: Gaiker Centro Tecnológico.

Un posible proceso de reciclado de LCD consta de un triturado mecánico de las pantallas, seguido de un tratamiento a bajas presiones para eliminar los cristales líquidos. Mediante el uso de catalizadores, los restos de cristales líquidos son destruidos a altas temperaturas en un sistema cerrado, reciclando de este modo hasta un 70% del vidrio.

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

En la Ilustración 12 se muestra la composición de dos LCD de diferentes tamaños, observándose que a pesar de contener los mismos componentes, su presencia en el LCD varía según el tamaño y, en consecuencia, el peso de los mismos. Los LCD más grandes contienen una mayor fracción plástica mientras que a menores tamaños, el componente mayoritario resulta ser la fracción vidrio.

La Ilustración 13 muestra la composición de un teléfono móvil. Como se observa, la pantalla de cristal líquido representa alrededor del 4,4% del peso total del teléfono, sin los materiales orgánicos (por ejemplo, la película de recubrimiento). Además, el LCD de un celular contiene varios electrodos electroconductores, alojados entre dos superficies cristalinas.

Esos electrodos están formados principalmente de óxido de indio y estaño (ITO), también conocido como óxido de indio dopado con estaño. El ITO es una mezcla de óxido de indio (III) ( $In_2O_3$ ) y óxido de estaño (IV) ( $SnO_2$ ), habitualmente del 80% al 90% de  $In_2O_3$  y 10-20% de  $SnO_2$  en peso.

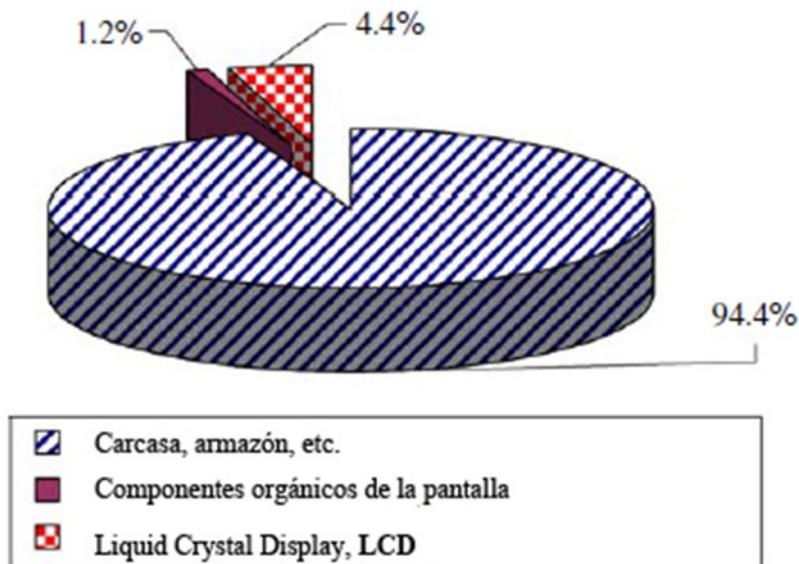


Ilustración 13: Composición de un teléfono móvil.

Fuente: Metallurgical and Materials Transactions.

El LCD contiene aproximadamente 1400 g In/t, si eliminamos previamente las partes hechas de material orgánico. Así, considerando el peso medio de un teléfono móvil, se puede observar que contiene alrededor de 6,2 mg de indio. La Tabla 8 muestra el contenido de indio en varias partes de un dispositivo móvil.

Generalmente, el indio se extrae de forma primaria desde recursos naturales como un subproducto del mineral de zinc. Por ejemplo, el contenido en indio del mineral de zinc varía de 10 a 20 g/t, cantidad mucho menor que el contenido en In de los LCD de teléfonos móviles desechados tras la eliminación de materiales orgánicos.

 <b>Universidad</b> <b>de Granada</b>  <b>Facultad de</b> <b>Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

<b>Parte de un teléfono móvil</b>	<b>Contenido en In (g/t)</b>
Dispositivo telefonía móvil	6,2
Liquid crystal display (LCD)	1102
LCD, tras eliminación de orgánicos	1400

Tabla 8: Contenido en In de las distintas partes de un teléfono móvil.

Fuente: Metallurgical and Materials Transactions.

A la luz de estos datos se comprueba que un teléfono móvil tras su vida útil es un recurso valioso para la extracción de indio, además de necesario, pues reciclar el metal de indio a partir de dispositivos contribuye a la protección de los recursos naturales y del medioambiente.

### 1.3.2.2 Esquema de reciclado del LCD

- Descontaminación

El esquema de reciclado de cualquier LCD vendrá precedido por una etapa de descontaminación previa (las lámparas fluorescentes por el momento contienen mercurio), que puede llevarse a cabo de dos modos diferentes:

Desensamblado manual: al tiempo que se retira la lámpara fluorescente, el resto de componentes del LCD se obtienen por separado.

Sistema de corte: la retirada de la lámpara fluorescente se lleva a cabo mediante una primera identificación de la posición de la lámpara seguida de un sistema de corte que elimine el trozo de LCD que contiene la lámpara.

Tras la etapa de descontaminación, el esquema de reciclado es el que sigue:

- Desensamblado manual/tratamiento mecánico
- a) Desensamblado manual: es necesaria una etapa posterior de clasificación de cada uno de los componentes.

Cada componente será recuperado sin ningún tipo de impureza, evitando cualquier etapa posterior de separación o lavado.



Ilustración 14: Esquema de reciclado, desensamblado manual.

Fuente: Gaiker Centro Tecnológico.

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

- b) Tratamiento mecánico: Tras la retirada de la lámpara fluorescente mediante un sistema de corte, se proponen varias opciones:
- b.1) **operaciones de trituración y molienda** para reducir tamaños y liberar los materiales facilitando el manejo del residuo y posterior separación. Se utilizan equipos como: trituradores, molinos de cuchillas, molinos de martillos.
- b.2) **procesos de separación convencionales**, como un sistema de aspiración, para retirar la fracción más ligera del LCD y sistemas de separación basados en propiedades electromagnéticas, para separar la fracción metálica. Son operaciones tales como:
- separación con imanes de metales magnéticos, como el hierro.
  - separación por corrientes de Foucault para recuperar metales no magnéticos, como el aluminio.
  - separación electrostática corona para la recuperación de metales en mezclas complejas de materiales muy molidos.
- b.3) **técnicas de separación basadas en las propiedades físicas** (densidad, tamaño y forma) de los materiales del LCD, obteniendo por un lado la fracción vidrio, y por otro lado, una fracción plástica formada por el difusor de la luz y los marcos plásticos del LCD. Son operaciones tales como:
- separación por diferencia de peso específico, en equipos como: mesas densimétricas o de sacudidas (con aire o con agua), balsas de flotado, separadores por corriente de aire o neumáticos, hidrociclos.
  - cribado, en equipos como: cribas vibrantes, cribas giratorias (trommel).

**Elección de un esquema de reciclado:** En función del esquema de reciclado que se siga, los materiales plásticos recuperados tendrán diferentes características.

Mientras que tras un desensamblado manual, el difusor de la luz y los marcos de plástico se recuperan sin impurezas y por separado. Facilitando así no solo su reciclado sino incluso hasta su posible reutilización. El estudio de las propiedades físico-mecánicas procedente del difusor de luz, muestra un material con calidad suficiente como para permitir su incorporación en el mercado. Por el contrario, el material de los marcos de plástico no presenta unas propiedades mecánicas óptimas, sin embargo éstas podrían ser suficientes para su uso en aplicaciones que no requieran altas prestaciones técnicas.

El reciclado mecánico de los LCD permite un esquema de tratamiento automatizado, ver Ilustración 15. Con la característica de que no permite una separación de ambos plásticos, sino que son recuperados en una misma fracción conjuntamente con diversas cantidades de material procedente de los marcos. De este modo, la pureza de las fracciones vendría determinada por la optimización de cada una de las etapas y por las limitaciones de éstas. El estudio de las mezclas de los materiales difusor/marco de plástico, muestra en general un material con buenas propiedades mecánicas, resultando en ocasiones necesaria la reformulación del material para mejorar los resultados inadecuados.

La elección de un esquema de reciclado descansa sobre cuestiones tanto técnicas como económicas. Por un lado, el reciclado manual posibilita la obtención de fracciones con alta pureza y alto grado de recuperación, su inconveniente es el elevado coste del proceso asociado al tiempo necesario para el desensamblado de los componentes.

De otro lado, en el caso del reciclado mecánico, la automatización del proceso conduce a un mayor ratio de tratamiento con la obtención de fracciones heterogéneas cuyo valor es inferior al de las fracciones puras.

 <b>Universidad de Granada</b>  <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

- Caracterización de las fracciones de reciclado.

Un conjunto de ensayos recomendados para los materiales recuperados sería el siguiente:

- a) Ensayos físicos:
  - Densidad (UNE 53-020-73).
- b) Ensayos mecánicos:
  - Módulo de tracción (UNE-EN ISO 527).
  - Elongación a la rotura (UNE-EN ISO 527).
  - Resistencia a la tracción (UNE-EN ISO 527).
  - Resistencia al impacto Charpy (UNE-EN ISO 179).
  - Dureza shore A (UNE-EN ISO 2039).

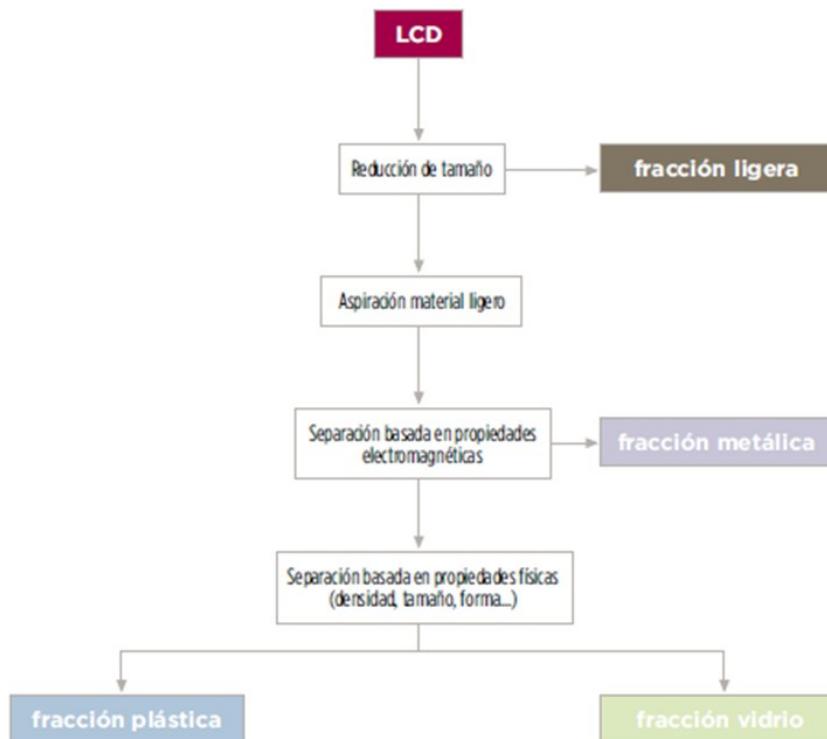


Ilustración 15: Esquema de reciclado, tratamiento mecánico.

Fuente: Gaiker Centro Tecnológico.

### 1.3.3 Análisis de la oferta de indio

Según los informes del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), los seis principales países productores de indio en el mundo en el año 2010 fueron China, Japón, Canadá, República de Corea, Perú y Bélgica. La producción de refino de indio de China fue 340 toneladas en 2010, representando el 55,8% de la producción global anual de 609 toneladas.

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

La producción de indio reciclado supuso 850 toneladas en el año 2008, lo cual representa aproximadamente el 59,7% del global de indio suministrado, tomando como referencia las 573 toneladas de suministro de indio primario publicado por el USGS en el año 2008.

#### 1.3.3.1 Segmentos de mercado

El indio metálico puede ser obtenido como un subproducto de la minería del zinc o del plomo. Un segmento de la industria del indio consiste en la mejora de indio metálico y pulverulento. Es posible refinar indio de baja pureza (99,97%) y de pureza estándar (99,99%) a purezas superiores a 99,9999%.

Una amplia porción del global de la producción de indio secundario procede del reciclaje de películas de ITO. La obtención de películas de ITO se lleva a cabo mediante un proceso de pulverización, mediante el cual el ITO es depositado como una fina película revistiendo un sustrato. Dicho procedimiento es altamente ineficiente pues aproximadamente un 30% de ITO es depositado sobre el sustrato. El 70% restante se pierde por las paredes de la cámara de pulverización. Se ha estimado que se puede recuperar del 60% al 65% del indio en una nueva película de ITO, la investigación persigue mejorar este grado de recuperación.

#### 1.3.3.2 Tendencias en la producción mundial y las reservas

No se encuentran disponibles datos específicos del mercado de reciclaje, pero se estima que la producción global secundaria de indio incrementó significativamente durante los pasados últimos años. Ahora cuenta con una mayor participación en la producción de indio que el primario.

Según el Servicio Geológico de los Estados Unidos, la producción del refinado primario ha sido relativamente uniforme desde 2006. La producción anual mundial se ha mantenido dentro del rango entre 546 y 582 toneladas al año. Ésta decreció desde 582 toneladas en 2006 a 563 toneladas en 2007 y se acercó ligeramente a 573 toneladas en 2008. La producción mundial cayó a 546 toneladas en 2009 y remontó a 638 toneladas en 2010, ver Tabla 9 e Ilustraciones 16, 17 y 18.

País	2007	2008	2009	2010
China	320	310	280	300
Rep. Corea	50	75	70	80
Japón	60	65	67	70
Canadá	50	45	40	35
Bélgica	30	30	30	30
Rusia	12	12	4	4
Francia	10	0	0	0
Peru	6	6	25	25
EEUU	0	0	0	0
Otros países	25	25	30	30
Total	563	573	546	574

Tabla 9: Producción mundial anual de indio. Fuente: USGS.

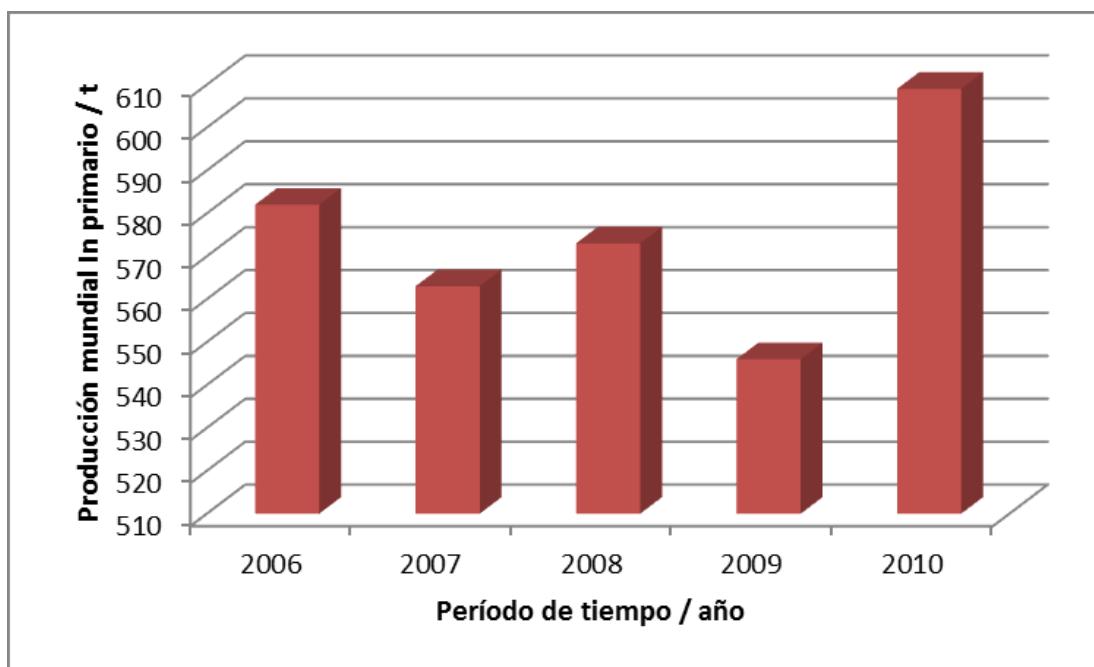


Ilustración 17: Producción mundial total de In primario, en toneladas.

Fuente: Elaboración propia.

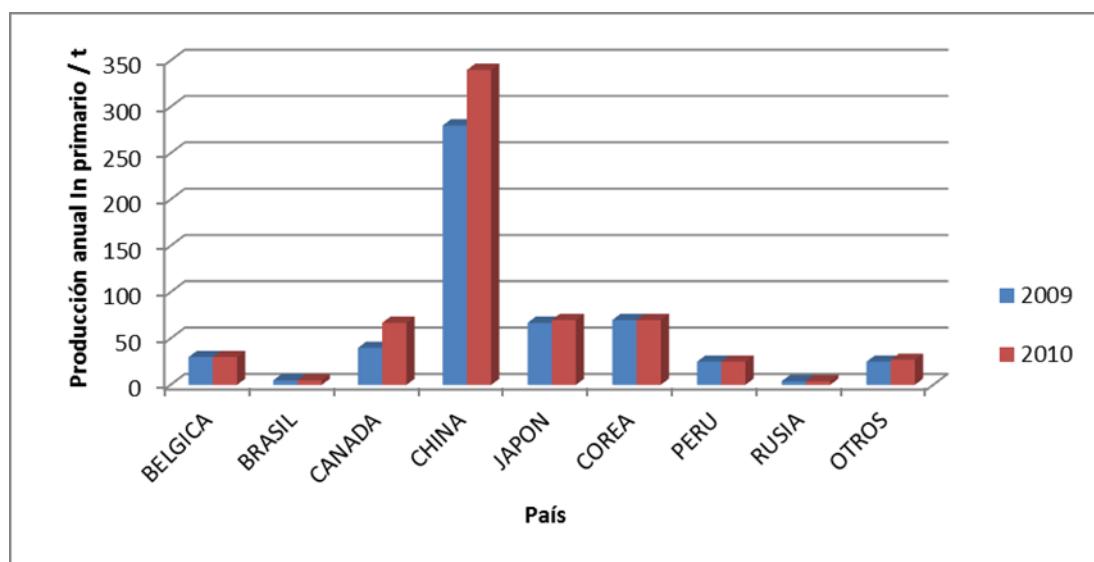


Ilustración 16: Producción de In por países, en toneladas.

Fuente: Elaboración propia.

### 1.3.3.3 Principales empresas productoras de indio

A continuación se analiza la producción por países:

- **China**

China controla alrededor del 50% de la producción de indio refinado mundial. Existen algunos productores mayoritarios en China, pero también numerosos productores

 <b>Universidad</b> <b>de Granada</b>  <b>Facultad de</b> <b>Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

minoritarios que confían en adquirir concentrados a partir de la industria del refinado de metales comunes.

China produce aproximadamente de 300 a 350 toneladas de indio por año. El gobierno Chino restringe la exportación de indio mediante tasas. En diciembre de 2009, China anunció que podría reducir las tasas de exportación de indio bruto, chatarra de indio y polvo de indio del nivel del 10% al 15% en 2009 al 5% en 2010. En diciembre del 2009, el Ministerio de Comercio emite una cuota permitiendo a China exportar 139,8 toneladas de indio en la primera mitad de 2010, el mismo nivel que en 2009. En octubre de 2010, Bloomberg LP publica que el Ministerio de Comercio de China anuncia que la cuota de exportación para el año 2011 podría continuar sin cambios desde los niveles hasta 2010 hasta 233 toneladas.

Las once compañías autorizadas garantizan la gran cuota de exportación para la primera mitad de 2010.

Compañía	Producción (t)
Zhuzhou Smeltery Group Co., Ltd.	29,4
Nanjing Foreign Economic & Trade Development Co., Ltd.	17,6
Guangxi China Tin Group Co.	15,3
Zhuzhou Keneng New Materials Co., Ltd	14,2
Huludao Nonferrous Metals Co., Ltd.	8,7
Guangxi Debang Industry and Trade Co., Ltd.	6,0
Xiangtan Zhengtan Nonferrous Metals Co., Ltd.	6,7
Hunan Jinshi Group	6,2
Nanjing Germanium Co., Ltd.	7,8
Liuzhou Yingge Metals Co., Ltd.	5,9

Tabla 10: Principales compañías chinas exportadoras de In. Fuente: USGS.

Se estima que la mayor parte de la producción China de indio es exportada, al ser la demanda interna actualmente incapaz de sostener la producción.

- **Canadá**

La USGS estimó que en 2008 Canadá produjo 50 toneladas de indio. Según la USGS, la compañía canadiense, Teck Resources Limited, es un antiguo productor de indio como subproducto en sus instalaciones en Trail, British Columbia, Canadá. En 2005, Teck produjo allí 41 toneladas de indio desde concentrados. Teck anunció en 2005 que estaba planeando incrementar la producción de indio a 75 toneladas dentro de dos años. Los datos de USGS referentes al indio no muestran incremento alguno de la producción de indio en Canadá entre 2005 y 2009, pero se cree que el incremento podría mostrarse en los resultados de 2010.

El otro mayor productor de indio en Canadá es Falconbridge Ltd. En 2007, Falconbridge fue adquirida por Xstrata Plc, una compañía minera diversificada. En diciembre de 2009, Xstrata Plc anunció que el 1 de Mayo de 2010 se llevaría a cabo el cese permanente de operación de sus plantas metalúrgicas de cobre y zinc en el Kidd Metallurgical site en Timmins, Ontario. Según Roskill, un proveedor de información de mercados internacionales de metales y minerales, en su informe titulado *The Economics of Indium, 2003*, la Kidd Metallurgical Division era capaz de refinar 40 toneladas por año de indio. Toda la producción de Kidd Creek smelter fue enviada a The Indium Corp. de América para un refino adicional. De acuerdo con la USGS, Xstrata produjo 11 toneladas de indio

 <b>Universidad de Granada</b>  <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	----------------------------------

refinado en Kidd Creek en 2007 y 8 toneladas en 2008. En Mayo de 2010, Xstrata confirmó que el Kidd Creek smelter produjo 11,5 toneladas de indio en 2009.

- **Estados Unidos de América**

Los Estados Unidos no producen indio primario para consumo doméstico y confían en su importación de China, Canadá, Japón, Rusia, y otros países. Toda la producción de indio refinado en los Estados Unidos durante 2007 procedió del refino de indio metálico de baja pureza importado y del refinado de chatarra.

Se recicla muy pequeña cantidad de indio en los Estados Unidos. Se cree que es debido a la ausencia de infraestructuras para la recogida de los productos de desecho con contenido en indio.

- **Japón**

Además de China, Japón cuenta con una producción de indio significativa. Las compañías productoras de indio incluyen Asahi Pretec Corp., Dowa Metals & Mining Co., Ltd., Nikko Metals, Mitsui Mining & Smelting, Sumitomo Metal Mining Co., Ltd., y Toho Zinc Co., Ltd. Dowa Metals & Mining dirige una instalación de reciclaje en la Prefectura de Akita. La capacidad de producción de la instalación es 150 toneladas al año de indio secundario. Dowa también cuenta con la capacidad de producción de 70 toneladas al año de indio primario. La producción de Dowa es destinada al consumo interno de Japón. Asahi Pretec tiene la capacidad de producir 200 toneladas al año de indio secundario procedente de su planta de reciclaje de películas de ITO en Fukuoka.

- **República de Corea**

Korea Zinc Co., Ltd. Produce indio primario y secundario en su refinería de zinc Onsan. Se estima una capacidad de producción de la planta de 200 toneladas al año de indio, de los cuales 100 toneladas al año corresponden a indio primario y la cantidad restante a secundario. La materia prima secundaria fue obtenida de los productores de ITO japoneses.

- **Bélgica**

La refinería de metales preciosos Umicore en Hoboken produce indio metálico (láminas y lingotes). Una planta de metales especiales para el refino de indio recuperado procedente de polvo y residuos generados por la instalación de refinería de plomo. La capacidad de producción es de 30 toneladas por año de indio.

- **Perú**

El complejo metalúrgico La Oroya de Doe Run Peru produce indio refinado al igual que la refinería de zinc Votorantim Metais Cajamarquilla. Votorantim empezó a producir indio en Cajamarquilla en el año 2008. Se pronosticó una capacidad de producción inicial de 38 toneladas al año de indio. Sin embargo, un proyecto de expansión en curso aumentará la capacidad a 76 toneladas al año.

#### 1.3.3.4 Relación con los clientes

Habitualmente, los usuarios finales establecen contratos directamente con las empresas de reciclaje. Según tales contratos, los usuarios finales suministran chatarra de indio a la empresa encargada del reciclaje y tras el proceso de reciclado el indio recuperado es devuelto al usuario final. Las empresas encargadas del reciclaje no pueden vender el indio reciclado a nadie más que al usuario final que suministra la chatarra.

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

Se considera al mercado del reciclaje un círculo cerrado. Actualmente, el ciclo del reciclado de ITO (desde la recogida de la chatarra hasta la producción de materiales secundarios) lleva menos de 30 días.

#### 1.3.3.5 Producción nacional

No existe producción nacional de indio metálico.

#### 1.3.3.6 Análisis de la competencia

A pesar de no existir competencia propiamente dicha en el territorio nacional consideraremos como tal a una importante industria de reciclaje de componentes electrónicos, Reciclado de Componentes Electrónicos, S.A. (RECILEC).

RECILEC es una empresa que ofrece soluciones ambientales a los sectores implicados en la generación de RAEE en Andalucía y con una capacidad de tratamiento capaz de dar cobertura a otras comunidades limítrofes.

- Localización

Actualmente RECILEC está autorizada por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía con el número GRU-150 para las operaciones de recogida, transporte y tratamiento final de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), y con el número AN-0425 como Gestor de Residuos Peligrosos para la recogida, transporte y almacenamiento de Pilas y Acumuladores. También dispone de las autorizaciones de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Extremadura con los números A-91369819/EX/U-61 (Residuos No Peligrosos) y A-91369819/EX/102 (Residuos Peligrosos), para las operaciones de recogida y transporte.

La ubicación de su Planta de Tratamiento Final de RAEE está ubicada en el Parque de Actividades Medioambientales de Andalucía situado en el término municipal de Aznalcóllar (Sevilla). Igualmente cuenta con un nuevo centro ubicado en el Polígono Industrial "Fuente Santa" del municipio de Loja (Granada). La situación de estas instalaciones permite dar un servicio cercano a las provincias de Andalucía Oriental.

La planta de Aznalcóllar única en España con capacidad para gestionar la gama completa de todo tipo de aparatos eléctricos y electrónicos fuera de uso que se generan en Andalucía da empleo directo a más de 50 trabajadores, además de los 100 puestos de trabajo indirecto que generan las tareas de mantenimiento y transporte.

Además, esta instalación, que supuso una inversión superior a los nueve millones de euros, ocupa una superficie de 24.500 metros cuadrados. La empresa RECILEC está participada por la Consejería de Medio Ambiente, a través de la Empresa Pública de Gestión Medioambiental (Egmasa), por Fomento de Construcciones y Contratas (FCC) y por Indumetal Recycling.

- Producción y evolución

La planta de reciclaje y eliminación de residuos eléctricos y electrónicos ubicada en el Parque de Actividades Medio Ambientales de Andalucía (PAMA) del municipio sevillano de Aznalcóllar, recuperó el pasado año más de 21.000 toneladas de este tipo de residuos, lo que supone un aumento del 20% respecto a 2009, año en el que se trajeron 18.000 toneladas, y del 57% respecto de 2008, cuando esta cifra alcanzó las 12.000.



### 1.3.4 Análisis de la demanda de indio

#### 1.3.4.1 Evolución

Aunque se han desarrollado sustitutos para ITO, no se muestran evidencias de un cambio significativo hacia el uso de esos materiales alternativos en fabricación de pantallas planas.

El mercado de los LCD aún cuenta con un espacio significativo para el crecimiento. La penetración de la televisión LCD ha permanecido baja, según Corning Inc. Dicha compañía estimó que solamente el 8% de las televisiones instaladas en todo el mundo eran LCD. Las expectativas de ventas de Toshiba para sus televisiones LCD durante el año fiscal 2011 se han incrementado un 80% comparado con las ventas en el año 2009 debido al incremento de la demanda en los mercados emergentes.

La *Japan Electronics and Information Technology Industries Association* ha previsto que la demanda global de televisiones de pantalla plana se incrementaría a 180 millones de unidades en 2012 desde 86,2 millones de unidades en 2007.

La fuerte inversión en proyectos para células solares CIGS junto con la expansión reciente de plantas de fabricación en Europa, Japón, y los Estados Unidos indicaron que el consumo de indio para células solares apunta a un incremento global.

La demanda de indio metálico se ha incrementado bruscamente desde que se está expandiendo la producción de LCD. En 1999, el consumo mundial de indio primario fue aproximadamente 230 toneladas por año, con 60% de su consumo en Japón.

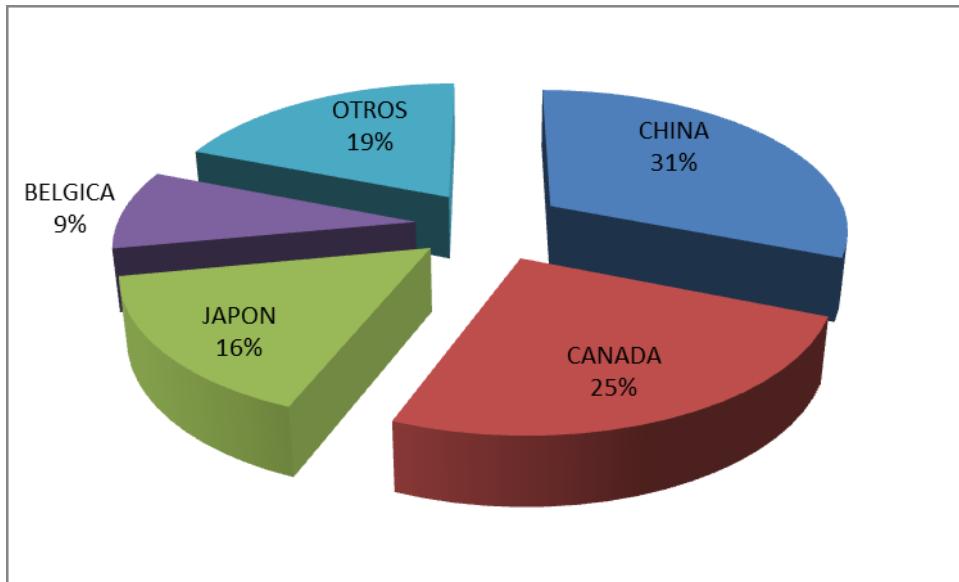


Ilustración 18: Panorama de la demanda mundial de indio por países. Fuente: USGS.

En 2011 el consumo global (primario y secundario) de indio es de más de 1800 toneladas, ver Ilustración 18.

Se han estimado unas reservas mundiales de aproximadamente 10000 toneladas.

La demanda mundial de indio está íntimamente relacionada con la producción de pantallas de cristal líquido (LCD). Se ha estimado una duración para las reservas de indio hasta el año 2050,



cobrando especial relevancia la mejora en la eficiencia de los sistemas de producción y reciclado de indio.

#### 1.3.4.2 Demanda de indio por aplicaciones

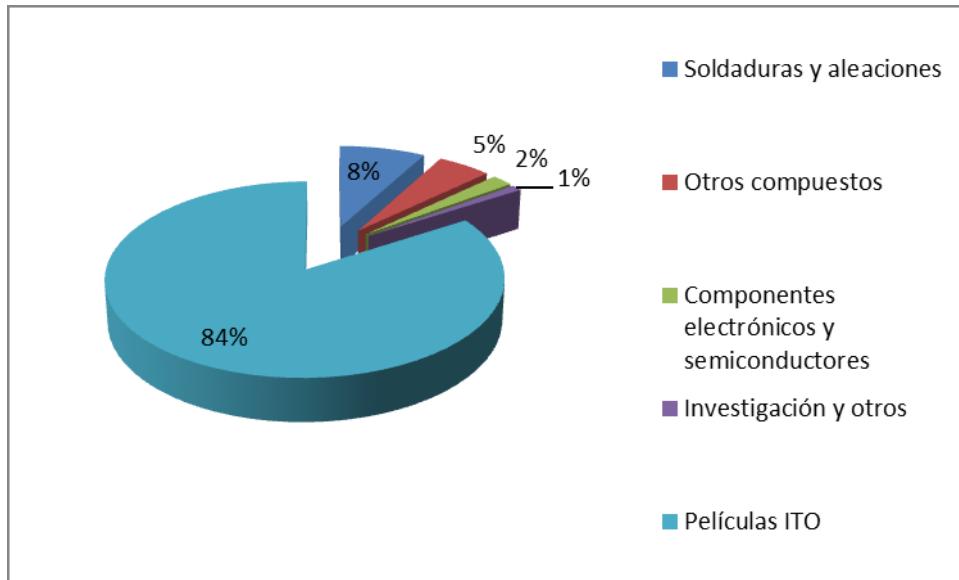


Ilustración 19: Distribución de la demanda de In por aplicaciones, en porcentaje. Fuente: USGS.

Como puede apreciarse en la Ilustración 19, la mayor cantidad de indio consumido en el mundo se destina a la fabricación de películas de ITO, presentes en las pantallas de cristal líquido (LCD).

#### 1.3.4.3 Sustitutivos

Existen sustitutos viables del indio para casi todas sus aplicaciones, no obstante no se alcanza la eficiencia de producción de éste o bien se ven alteradas las características del producto.

Como alternativa a las películas ITO han sido considerado los óxidos de estaño y antimonio (ATO). Es posible la utilización de galio, aunque más caro, en su lugar para celdas fotovoltaicas o como semiconductor. A pesar de ser técnicamente menos efectivo se puede utilizar óxido de zinc y estaño en pantallas LCD (Tosoh Corp.). El hafnio puede sustituir a las aleaciones de indio en las barras de control de los reactores nucleares.

El silicio ha reemplazado a germanio e indio en transistores. En aplicaciones de recubrimiento de cristales se pueden utilizar óxidos de planta-zinc u óxidos de estaño.

En la actualidad el grafeno, una allotropía del carbono, está siendo considerado como un futuro relevo para el óxido de indio y estaño, por ser un material fino, fuerte, conductor eléctrico y flexible. Mediante avances muy recientes se ha conseguido crear una superficie continua de grafeno puro del tamaño de un televisor, utilizando varios rollos que sitúan el material sobre una hoja de poliéster. Ha sido probado en el desarrollo de pantallas táctiles.

Las ventajas del grafeno: más barato, más duro, mejor conductor y más flexible.

#### 1.3.4.4 Principales empresas consumidoras por países

A continuación se expone un análisis de la demanda de indio por países:

- Japón

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

Japón es un destacado consumidor de indio. Los principales consumidores de indio japoneses incluyen los productores de ITO Mitsui Mining & Smelting, Nippon Mining & Metals, Sumitomo Metal Mining, Tosoh Corp., y Ulvac Technologies, Inc.

Nippon Mining & Metals dirige la planta de producción de ITO líder en el mundo (la planta Isohara cerca de Tokio con una producción de 50 toneladas al mes). La compañía confirmó sus planes para incrementar la capacidad de producción de ITO de Isohara debido al incremento de la demanda de pantallas planas en China y los Estados Unidos.

Sin embargo, no ha sido comunicado el tamaño de la ampliación. Mitsui Mining & Smelting opera la segunda planta líder en fabricación de ITO, la planta Omuta en el sur de Japón, con una capacidad de producción alrededor de 25 toneladas al mes de ITO.

Dowa estimó que el consumo de indio japonés en 2009 sumará 602 toneladas, con 525 toneladas (87%) destinadas a la producción de ITO. El consumo de indio primario fue 240 toneladas, con 70 toneladas (29%) procedente de productores nacionales, y el resto será importado. El consumo de indio secundario fue 362 toneladas.

El Gobierno Japonés planeó incluir el galio y el indio en su reserva de metales raros. La reserva japonesa de metales raros fue creada para proporcionar unas condiciones económicas estables para las industrias nacionales que consumen dichos metales. El Ministerio de Economía, Comercio e Industria solicitó un presupuesto adicional de 2 millones de dólares para almacenamiento. Una parte de este presupuesto podría ser asignado a la adquisición de indio y galio. Una vez que el presupuesto fue aprobado, la Japan Oil, Gas, and Metals Corporation (la agencia gubernamental que administra la reserva) podría adquirir el metal para productores y consumidores nacionales. La cantidad de indio almacenado en la reserva podría ser equivalente al valor de 42 días de consumo interno.

- **China**

El consumo anual de indio en China en 2009 resultó ser de 40 toneladas, de los cuales el 65% fue usado en la producción de ITO y el 6% fue usado en aleaciones y soldaduras. Sin embargo, el consumo de indio de China puede aumentar en los próximos años en caso de considerar los productores destacados japoneses la construcción de plantas de ITO aprovechando el incremento en la fabricación de pantallas planas que ha tenido lugar en China.

Nippon Mining & Metals planea la construcción de una unidad de producción de ITO en sus instalaciones en China, ésta se utilizará en el proceso del cobre y otros metales. La decisión se tomó siguiendo el comunicado oficial hecho por los fabricantes de pantallas planas japoneses, surcoreanos y taiwaneses, de incrementar su capacidad de producción o construir nuevas plantas de producción en China.

Mitsui Mining & Smelting Co., Ltd. (Japón) estaba considerando también la construcción de una base de producción de ITO en China. Es dudoso como podría esto afectar al consumo global de indio, al caber la posibilidad de que los pequeños productores de ITO japoneses no continúen operando si la producción de ITO se desplaza cada vez más a China. Sin embargo, fue también anunciado que algunos productores de ITO japoneses habían rechazado colaboraciones chinas para proteger su tecnología exclusiva.

Suzhou GroupSat Solar Co. empezó la construcción de una planta de fabricación de células solares CIGS en Suzhou, Provincia de Jiangsu. Su puesta en marcha fue programada para el año 2010. La planta podría tener la capacidad de producir 25 megavatios por año de células solares CIGS.

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

- Estados Unidos de América

Dos refinerías, una en Nueva York y otra en Rhode Island, produjeron la mayoría del metal de indio y de componentes de indio en 2007. Un número de pequeñas compañías produjeron aleaciones especiales de indio y otros productos del indio.

En 2009, EEUU consume 110 toneladas de indio. El valor estimado de metal primario consumido en 2010 fue de 66 millones de dólares.

- República de Corea

La República de Corea mantiene una reserva de indio. Además de indio, almacena otros metales (como aluminio, cobalto, molibdeno, níquel, silicio y vanadio) en previsión de emergencias.

En 2009, el Gobierno presupuestó 200 billones de dólares para la reserva nacional de metales, de los cuales el 20% fue asignado para la adquisición de metales menores, incluyendo el indio.

En 2008, el Public Procurement Service de la República de Corea informó sobre la adquisición de 5 toneladas de indio procedente de Korea Zinc Co., Ltd para la reserva.

#### **1.3.4.5 Importancia del producto para la política de las empresas**

El indio es extraído de forma primaria desde recursos naturales como un subproducto del mineral de zinc. Por ejemplo, el contenido en indio del mineral de zinc varía de 10 a 20 g/t, lo cual es mucho menor que su contenido en los LCD de celulares desechados tras la eliminación de materiales orgánicos. En otras palabras, un dispositivo de telefonía móvil tras su vida útil es un valioso recurso para la extracción de indio, indicando la necesidad de reciclar el metal de indio a partir de dispositivos para proteger los recursos naturales y proteger el medioambiente.

Se han puesto muchos esfuerzos en recuperar y reciclar el indio a partir de los materiales descartados. Hoy en día, alrededor del 70% del indio es generalmente recuperado desde chatarra de ITO generada durante el proceso de fabricación de LCD. Existen varios informes que describen la recuperación de indio mediante procesos hidrometalúrgicos. El proceso hidrometalúrgico es eficiente en disolver ITO y recuperar indio a partir de pantallas rotas de LCD de gran tamaño usadas en el proceso de fabricación en serie de TV.

#### **1.3.4.6 Repercusiones del sector con las variaciones de la oferta**

Ha quedado de manifiesto la importancia estratégica del metal indio en la aprobación de presupuestos para adquirir partidas de este metal con fin de añadirlo a la reserva de metales raros por parte de varios países.

Es posible encontrar sustitutos para el indio en la mayor parte de sus aplicaciones aunque sin alcanzar su eficiencia. No obstante, se abren líneas de investigación que apuntan principalmente al grafeno.

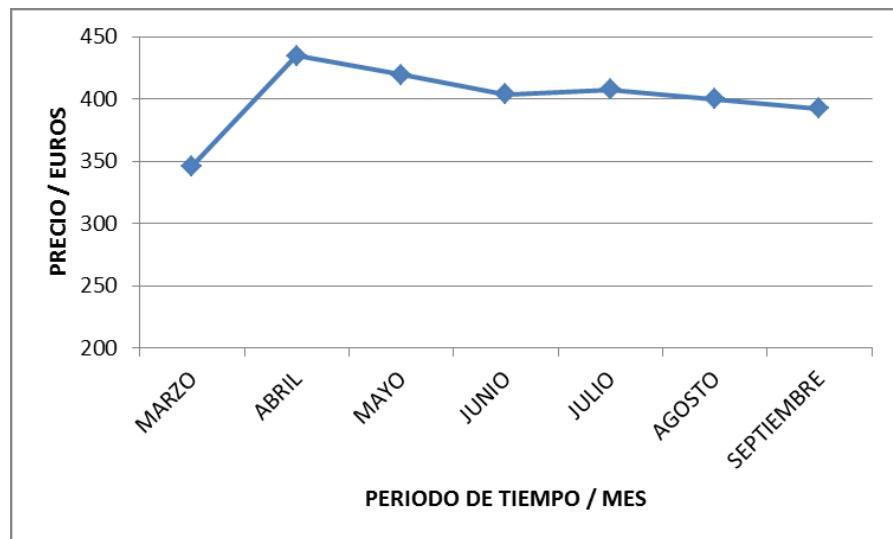
#### **1.3.4.7 Precio**

En 2002 un kilogramo de este metal costaba 100 dólares. Cuatro años más tarde, en 2006, su precio alcanzó los 900 dólares.

 <b>Universidad</b> <b>de Granada</b>  <b>Facultad de</b> <b>Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

El precio del indio se recuperó en 2010 después de descender bruscamente durante 2009. El precio del indio producido en Estados Unidos a comienzos de 2010 fue de 500 dólares por kilogramo. Mantuvo un nivel de 570 dólares hasta la mitad del mes de septiembre.

Actualmente, en 2011 su valor fluctúa alrededor de los 400 euros por kilogramo. Como referencia para la comparación, un kilogramo de plata cuesta 872 euros.



*Ilustración 20: Precio del kilogramo de In, en euros. Fuente:  
Metal Bulletin.*

#### 1.3.4.8 Perspectivas de futuro

De acuerdo con la limitación en las reservas metal y con el auge de las nuevas tecnologías en materia de telefonía móvil y ordenadores de pantalla plana, es necesaria una mejora en la eficiencia de los sistemas de reciclaje de metal indio. De esta manera, su obtención futura se basará principalmente en tecnologías de recuperación a partir de dispositivos desechados.

Se espera que la demanda a largo plazo de indio continúe al alza en tanto que el mercado de pantallas planas continúe en expansión, asumiendo que los fabricantes de pantallas planas continúen confiando en el ITO como material conductor transparente.

La industria de celdas solares está experimentando un crecimiento, y la cantidad de indio consumido por este mercado puede sufrir un incremento sustancial en el futuro. De acuerdo con Indium Corp., la demanda de indio para células solares de capa fina CIGS (Copper indium gallium selenide, CuInGaSe<sub>2</sub>) podría potencialmente incrementarse a 300 toneladas al año durante el 2013. El consumo de indio para células solares CIGS en 2009 fue cercano a las 35 toneladas al año.

 <b>Universidad de Granada</b>  <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	---	----------------------------------

## **Capítulo 2. Alternativas de proceso.**

La recuperación de indio mediante procesos hidrometalúrgicos está ampliamente documentada. El proceso hidrometalúrgico es eficiente en disolver ITO y recuperar indio a partir de pantallas LCD rotas de gran tamaño, utilizadas en el proceso de fabricación en serie de televisores. No obstante, en el caso de LCDs de pequeño tamaño de teléfonos celulares, resulta difícil romper las pantallas de LCD, en consecuencia, se requiere una etapa de triturado como pretratamiento anterior a la recuperación de indio.

Además, se requiere un gran volumen de solución acuosa de HCl para la extracción; decreciendo la cantidad de indio recuperado, esto evidencia la dificultad para recuperar indio procedente de LCD desechadas mediante uso exclusivo de tratamientos hidrometalúrgicos.

Otra línea de investigación apunta al tratamiento pirometalúrgico de LCD a 1473 K para extraer ITO usando plata fundida y posterior recuperación del indio. Sin embargo, la cantidad de producto recuperado por este proceso es relativamente bajo (porcentaje de recuperación sobre el 50%), siendo el consumo de energía relativamente alto.

El cloruro de indio (III) tiene un menor punto de sublimación, que el óxido de indio (III) (573 K y 2273 K, respectivamente). En un intento de incrementar la recuperación a la vez de reducir el consumo energético, se ha experimentado con procesos de vaporización del cloruro. Dichos procesos incluyen un tratamiento con ácido clorhídrico para transformar la estructura del compuesto de indio (III) en un compuesto de cloruro de indio, con el fin de facilitar la vaporización de indio a temperatura relativamente baja (menor a 1473 K). El compuesto de cloruro de indio es después vaporizado. Finalmente, el compuesto vaporizado de indio se recupera mediante condensación.

Es objeto del presente proyecto explorar ambas alternativas y proponer una solución que resuelva el problema de la recuperación de metal indio procedente del reciclado de pantallas LCD.

En las correspondientes decisiones adoptadas se tendrán en consideración los pertinentes factores de índole económica, medioambiental, tecnológica, etc.

A continuación, se describen dos modelos de proceso que ya han sido puestos en práctica con éxito.

 <b>Universidad de Granada</b>  <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	----------------------------------

## 2.1 PRIMERA ALTERNATIVA: *Método para recuperar indio de alta pureza por lixiviación de chatarra de películas de ITO*

### 2.1.1 Objetivo

El objetivo del presente proyecto es la implantación de una industria de obtención de metal indio procedente del reciclaje de chatarra de pantallas de cristal líquido (LCD).

La planta proyectada tratará 10500 t/año de chatarra de pantalla de cristal líquido (LCD) para obtener 10,3 t de metal indio de 99,999% de pureza. Esto supone una capacidad de tratamiento de 35 t/día de chatarra LCD y una producción de 31 kg de metal indio diarios. La totalidad de dicha producción se pondrá en venta en el mercado internacional a 500 euros por kilogramo.

Se trabajará en continuo 24 horas, divididas en turnos de 8 horas, durante 330 días al año; el resto se reservan a tareas de mantenimiento.

Para la elección de su emplazamiento se tendrán en cuenta los siguientes criterios, además de los generalmente utilizados para dicha tarea:

- Estimación de RAEEs producidos y recogidos. Se consideran los factores más importantes a la hora de situar la planta. Los ingresos de una planta de tratamiento de RAEEs dependen directamente del tonelaje de residuos gestionados.
- Los residuos recogidos representan aquellos que son susceptibles de ser tratados por la planta a día de hoy, mientras que los producidos son el máximo que puede llegar a tratarse conforme la recogida de RAEEs se hace más efectiva.
- Proximidad geográfica a las zonas o comunidades donde se recogen la mayor cantidad de residuos adecuados para ser tratados.
- PIB per cápita. Pues la riqueza de una población influye directamente en el consumo y velocidad de reposición de los aparatos eléctricos y electrónicos.

Dos de los factores fundamentales en la elección del emplazamiento es, por un lado, la elevada cantidad de chatarra recogido en la Comunidad Andaluza (ver *apartado 1.2.3, Situación actual de la gestión en España*), y por otro lado la presencia en la misma localidad seleccionada de una Planta de Tratamiento Final de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos. De la empresa RECILEC.

En base a estos factores se proyecta ubicar la planta industrial en calle El Matorral (Parque de Actividades Medioambientales de Andalucía), parcela nº35, Aznalcóllar (Sevilla). Dicha parcela tiene una extensión de 12370 m<sup>2</sup>.

### 2.1.2 Generalidades

Dentro del campo de la hidrometalurgia se han desarrollado métodos convencionales que utilizan la operación de extracción para recuperar indio a partir de sustancias tales como chatarra de películas de ITO.

Sin embargo, estos métodos comprenden pasos complicados debido a la repetición de etapas de extracción y stripping, y tienen coste elevado debido al uso de disolventes caros.

También se han probado métodos que comprenden los pasos de: disolución de una sustancia con contenido en indio en ácido clorhídrico o una mezcla de ácido clorhídrico y ácido sulfúrico;

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

poniendo una chapa de indio metálico en la solución después de la disolución, para reemplazar iones de impurezas a precipitar y eliminar productos de sustitución; y electroobtención de indio metálico usando la solución como solución electrolítica.

Este método consta de pasos simples, pero existe un límite para la concentración de iones de impurezas capaces de ser eliminados por sustitución y precipitación, siendo la pureza del indio metálico obtenible de solo un 99,99%.

Para resolver los problemas de los métodos convencionales de recuperación de indio, se han diseñado métodos que comprenden los pasos de: lixiviación de la sustancia con contenido en indio en ácido clorhídrico; adición de un álcali a la solución tras la disolución con objeto de neutralizar la solución tal que el pH de la solución pase de 0,5 a 4; precipitación y eliminación de hidróxidos de determinados iones metálicos en solución; burbujeo de gas sulfuro de hidrógeno en la solución para precipitar y eliminar sulfuros de iones metálicos nocivos para la electrolisis; y por último electroobtención de indio metálico usando la solución como solución electrolítica inicial. Este método es muy útil para reciclar chatarra de láminas de ITO puesto que es posible recuperar indio que tenga gran pureza, de no menos de 99,999% mediante pasos simples y baratos.

Sin embargo, el contenido en indio, la forma y el tamaño en sustancias tales como chatarra de películas de ITO (y otras con contenido en indio) no son constantes, de tal forma que tales sustancias pueden no ser apropiadas para su uso como materiales de reciclaje.

En particular, en el paso de lixiviación de sustancias con contenido en indio en ácido clorhídrico, la variación de tamaño y forma de los materiales sin tratar, causa el incremento del tiempo de tratamiento y/o el decrecimiento del grado de extracción, entonces tiempo de tratamiento y grado de extracción en el paso de disolución sufren una modificación.

En el caso de que el decrecimiento del tiempo de tratamiento tome precedencia sobre la mejora del grado de extracción en la etapa de lixiviación, disminuye el grado de extracción, esto es, se requiere de forma adicional una línea de recirculación o reprocesamiento para mejorar el grado de extracción. Por otro lado, si la mejora del grado de extracción toma precedencia sobre el decrecimiento del tiempo de tratamiento en el paso de disolución, lleva mucho tiempo obtener un grado de extracción deseable.

Por tanto, se requiere adoptar una solución de compromiso entre ambos, el acortamiento del tiempo de tratamiento y la mejora del grado de extracción en el paso disolución, siendo entonces el indio recuperado en corto espacio de tiempo y con alto grado de recuperación.

Sin embargo, la cantidad de estaño en el indio metálico obtenido por electroobtención es alrededor de 1 ppm, siendo deseable una menor cantidad de estaño.

### 2.1.3 Descripción del proceso

A continuación se detalla el proceso diseñado para eliminar los problemas mencionados anteriormente, dicho método será capaz de recuperar indio de alta pureza mediante pasos simples y económicos en un corto espacio de tiempo. Además posibilita disminuir la cantidad de estaño en el metal indio obtenido por electroobtención.

Se trata de un proceso que opera bajo un régimen semicontinuo. Por un lado, las operaciones de reducción de tamaño y de transporte de partículas, además del paso de electroobtención, transcurren de forma continua, mientras que el resto de etapas tienen lugar por lotes.

Este proceso para recuperar indio comprende los siguientes pasos:

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

- a) **Molienda** de chatarra de pantalla de cristal líquido hasta lograr un tamaño de partícula adecuado. Si se logra la suficiente reducción del tamaño de partícula en este paso, se mejora el contacto de las materias primas con la solución de ácido clorhídrico obteniendo un grado de extracción deseable en corto espacio de tiempo.

Tras el paso de molienda, el tamaño del 95% de las partículas es inferior a 150 µm. El proceso trata al día 35 t de chatarra de cristal líquido.

- b) **Lixiviación**, de las partículas finas resultantes del paso de molienda, en ácido clorhídrico de concentración 6M. Esta etapa de lixiviación, a su vez, tiene lugar alternativamente en dos tanques de lixiviación de forma intermitente, en ciclos de 4 horas de duración.

La solución de lixiviado abandonará este paso tras alcanzarse una concentración de aproximadamente 50 g de indio por litro. Lo que tendrá lugar tras 11 días consecutivos de tratamiento en esta etapa.

Se emplean 6375 L de ácido clorhídrico 6M en esta etapa. Además, se calienta la solución para promover la lixiviación, que tiene lugar a presión atmosférica.

- c) **Neutralización** en un reactor adecuado, mediante adición de hidróxido de sodio en forma de perlas. El objetivo de este paso es lograr un pH comprendido entre 0,5 a 4, con el fin de precipitar y remover hidróxidos de determinados iones metálicos presentes en la solución, en forma de impureza.

La razón por la cual se adiciona álcali hasta que el pH está comprendido entre 0,5 y 4, es que un pH menor de 4 previene la precipitación de hidróxidos de indio mientras que mantener el pH por encima de 0,5 hidroliza determinadas impurezas en forma iónica.

Mediante esta adición de álcali, es posible la eliminación eficiente de la mayor parte del estaño, impureza principal de la chatarra de películas de ITO.

- d) **Envejecimiento** de la solución procedente del paso de neutralización, a una temperatura predeterminada dentro del rango de 60°C a 70°C durante un periodo de tiempo entre 2 y 3 horas.

La razón por la cual se lleva a cabo el envejecimiento después de la neutralización es que el precipitado neutralizado debe ser estabilizado.

- e) **Filtración**, para eliminar los hidróxidos metálicos precipitados.  
f) **Paso de sulfuración**, consistente en el burbujeo de sulfuro de hidrógeno gaseoso dentro de la solución procedente del paso de filtrado. Su objetivo es depositar y eliminar sulfuros de iones metálicos, tales como sulfuros de cobre, plomo y demás compuestos nocivos para el paso siguiente y una cantidad muy reducida de sulfuro de estaño.  
g) **Paso de electroobtención** usando la solución procedente del paso de sulfuración como solución electrolítica inicial, para electrodeposición de indio metálico, en condiciones electrolíticas apropiadas.

El indio metálico así recuperado contiene impurezas de metales alcalinos, tales como el sodio, componente de la solución electrolítica.

Una fracción de la solución electrolítica se mezcla con ácido clorhídrico fresco 6M para ser reutilizada en el paso de lixiviación.

Con el fin de prevenir la acumulación de iones metálicos más básicos que el indio, tales como iones de aluminio y hierro, parte de la solución electrolítica será extraída fuera del sistema.

 <b>Universidad</b> <b>de Granada</b>  <b>Facultad de</b> <b>Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

h) **Fundición y afino.** El indio metálico es calentado junto con hidróxido de sodio sólido, para ser fundido y mezclados, hasta que los metales alcalinos son disueltos en el hidróxido de sodio fundido para ser eliminados, y entonces, la pieza metálica obtenida por separación gravimétrica es arrojada a un molde para ser enfriada y recuperada como indio de alta pureza.

El proceso de afinación hidrometalúrgica consiste en disolver el mineral o el metal impuro en un líquido apropiado, y provocar una precipitación selectiva de las impurezas, de modo que el metal puro quede en la solución; o bien, provocando la precipitación de éste, dejar las impurezas disueltas en el líquido.

Los procesos de afinación hidrometalúrgica son muy importantes en combinación con procesos de obtención por vía electrolítica, para permitir la eliminación de impurezas que pueden ser separadas por electrólisis.

El producto de metal de indio obtenido mediante este proceso tiene una pureza no menor al 99,999% y contiene estaño con un contenido no mayor que 0,1 ppm.

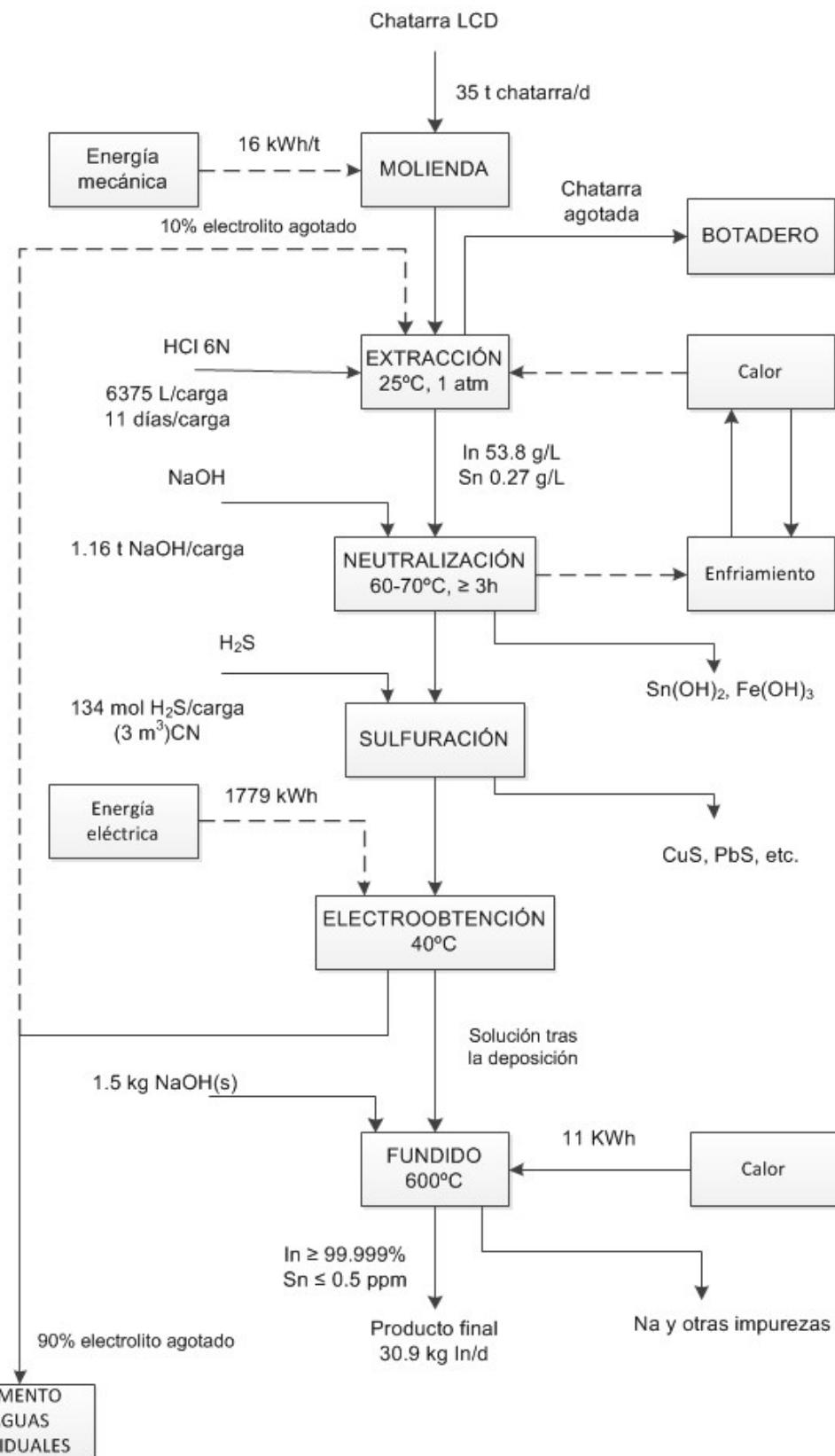


Ilustración 21: Esquema del proceso de obtención de indio, alternativa I. Fuente: Elaboración propia.

 <b>Universidad</b> <b>de Granada</b>  <b>Facultad de</b> <b>Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

## 2.1.4 Balances de materia y de energía

A continuación se procede a la realización de los balances de materia y de energía necesarios para el correcto dimensionamiento de los equipos que intervienen en el proceso.

### 2.1.4.1 Lixiviación

Base de cálculo: 7 t chatarra LCD (1400 g In/t LCD sin org.) = 9,8 kg In alimentado.

Consideramos una concentración disponible 6N (20% peso) para ácido clorhídrico comercial.

$$9,8 \text{ kg In} \cdot \frac{277,64 \text{ kg } In_2O_3}{229,64 \text{ kg In}} = 11,85 \text{ kg } In_2O_3$$

$$11,85 \text{ kg } In_2O_3 \cdot \frac{10 \text{ kg } SnO_2}{90 \text{ kg } In_2O_3} = 1,32 \text{ kg } SnO_2$$

$$11,85 \text{ kg } In_2O_3 \cdot \frac{100 \text{ kg } ITO \text{ (s.org)}}{90 \text{ kg } In_2O_3} \cdot \frac{1400 \text{ kg } ITO \text{ (c.org)}}{1102 \text{ kg } ITO \text{ (s.org)}} = 16,73 \text{ kg } ITO \text{ (c.org)}$$

$$1,32 \text{ kg } SnO_2 \cdot \frac{118,71 \text{ kg } Sn}{150,71 \text{ kg } SnO_2} = 1,04 \text{ kg } Sn$$

Puesto que el grado de extracción de In es 100% los 9,8 kg de In alimentados están presentes en D:

$$In(entrada) = In(sale)$$

Para calcular la cantidad de HCl 6M utilizado en el paso de lixiviación hacemos uso de la relación de tanto por ciento de sólidos:

$$\% \text{ sólidos} = \frac{\text{peso de sólidos}}{\text{peso de sólidos} + \text{peso disolvente}} = \frac{7 \text{ t}}{7 \text{ t} + x} = \frac{1}{2}$$

$$x = 7 \text{ t HCl 6M}$$

$$7 \text{ t HCl 6M} \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{t}} \cdot \frac{1 \text{ L}}{1,098 \text{ kg}} = 6375,23 \text{ L HCl 6M} = 6,375 \text{ m}^3$$

La corriente de 6375,23 L es alimentada durante 11 días a los extractores a razón de 5 cargas al día (4 h/carga).

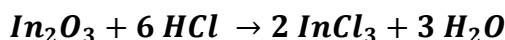
Para D = 6375,23 L las masas de los distintos componentes son:

Corriente D	In	Sn	Cu	Pb	Cr	Ni	Fe
Concen. (g/L)	50	0,2475	0,000625	0,00025	0,00025	<0,00025	0,0495
Masa (g)	318760	1578	3,985	1,594	1,594	<1,594	315,572

Tabla II: Composición de la corriente D (especies atómicas), cantidades en g.

Fuente: Elaboración propia.

Reacción de cloración de indio:



 <b>Universidad</b> <b>de Granada</b>  <b>Facultad de</b> <b>Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

Supuesto que no existe variación de volumen en el paso de lixiviación:

$$A = D = 6375,2 \text{ L} = 6,375 \text{ m}^3$$

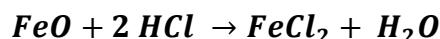
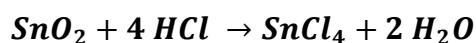
Cálculo de la cantidad de HCl teórico necesario para la lixiviación:

$$11850 \text{ g } In_2O_3 \cdot \frac{1 \text{ mol } In_2O_3}{277,64 \text{ g } In_2O_3} \cdot \frac{6 \text{ mol HCl}}{1 \text{ mol } In_2O_3} = 256,09 \text{ mol HCl}_{teo}$$

Cálculo de la cantidad en moles de ácido clorhídrico contenida en la corriente A:

$$n_{HCl} = 6M \cdot A = 6 \cdot 6375,2 = 38251,2 \text{ mol HCl}$$

Reacciones secundarias de cloración:



Cantidad de H<sup>+</sup> en disolución tras el paso de lixiviación:

$$315,572 \text{ g Fe} \cdot \frac{1 \text{ mol Fe}}{55,845 \text{ g Fe}} \cdot \frac{2 \text{ mol HCl}}{1 \text{ mol Fe}} = 11,30 \text{ mol HCl}$$

$$1578 \text{ g Sn} \cdot \frac{1 \text{ mol Sn}}{118,71 \text{ g Sn}} \cdot \frac{4 \text{ mol HCl}}{1 \text{ mol Sn}} = 53,18 \text{ mol HCl}$$

$$\begin{aligned} 38251,2 \text{ mol HCl} - 256,09 (InCl_3) - 11,30 (FeCl_2) - 53,18(SnCl_4) \\ = 37930,6 \text{ mol HCl} = 37930,6 \text{ mol H}^+ \end{aligned}$$

pH de la corriente tras la lixiviación (D):

$$pH = -\log[H^+] = -\log\left[\frac{37993,1}{6375,2}\right] = -0,77$$

Supuesta la capacidad calorífica del agua pura para la disolución, 4,2 J/g•K.

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T = 6375230 \cdot 4,2 \cdot (25 - 15) = 267760 \text{ kJ} = 74,37 \text{ kWh}$$

Potencia requerida: 267760 kJ / 600 s = 446,3 kW

$$Consumo \text{ vapor} = 74,37 \text{ kWh} \cdot \frac{1}{0,63} \frac{\text{kg vapor}}{\text{kWh}} = 118,05 \text{ kg vapor}$$

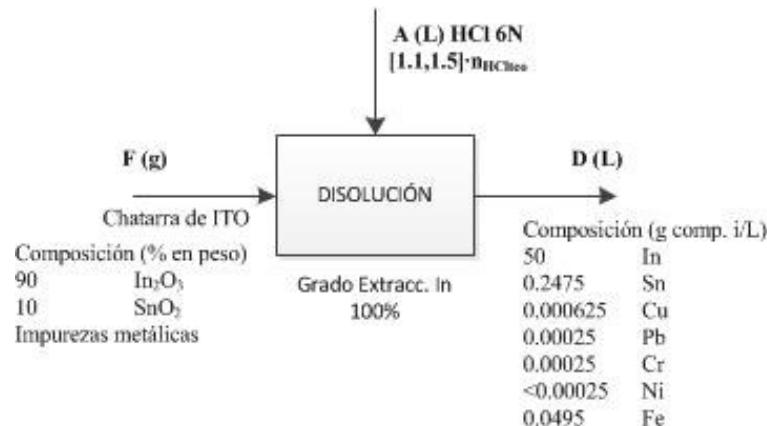


Ilustración 22: Diagrama del paso de lixiviación. Fuente: Elaboración propia.

#### 2.1.4.2 Neutralización

Supuesto volumen constante en la operación:

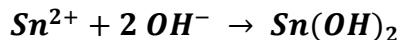
$$D = N = 6375,23 L$$

Balance a especies atómicas (en gramos):

Especie	Entra	Sale	$m_i(g)$
Sn	1578	= $m_1 + <6,375$	>1571,6
Fe	315,572	= $m_2 + 11,48$	304,09

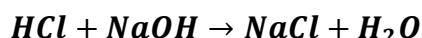
Tabla 12: Neutralización. Balance a especies atómicas, en g.  
Fuente: Elaboración propia.

Reacciones de formación de hidróxidos:



Los iones metálicos existen en soluciones acuosas sólo dentro de ciertos límites de pH. La manera más sencilla de separar un metal de su solución es mediante la alcalinización de la solución, dando lugar a su precipitación como hidróxido.

Cantidad de hidróxido sódico empleado en el ajuste de pH de la solución mediante neutralización:



$\Delta H = -13,68 \text{ kJ/mol}$

Si  $pH=3,5$ , entonces:

$$pH = -\log[H^+] = 3,5$$

$$[H^+] = 10^{-3,5} = 3,1623 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mol } H^+}{L}$$

$$3,1623 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mol } H^+}{L} \cdot 6375,2 L = 2,02 \text{ mol } H^+$$

$$\text{mol } (H^+)_o - \text{mol } (H^+)_f = \text{mol } (H^+)$$



$$37930,6 - (H^+)_{neutralizado} = 2,02$$

$$(H^+)_{neutralizado} = 37928,6$$

$$37928,6 \text{ mol } (H^+) \cdot \frac{1 \text{ mol NaOH}}{1 \text{ mol } (H^+)} \cdot \frac{40 \text{ g NaOH}}{1 \text{ mol NaOH}} = 1517,1 \text{ kg NaOH}$$

Formación de NaCl en la reacción de neutralización:

$$1517144 \text{ g NaOH} \cdot \frac{1 \text{ mol NaOH}}{40 \text{ g NaOH}} \cdot \frac{1 \text{ mol NaCl}}{1 \text{ mol NaOH}} \cdot \frac{58,4 \text{ g NaCl}}{1 \text{ mol NaCl}} \\ = 2215,0 \text{ kg NaCl}$$

$$Q = 37928,6 \text{ mol} \cdot -13,68 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} = -518863,25 \text{ kJ}$$

La capacidad calorífica de la solución es 2,99 kJ/kg·K.

$$\Delta T = \frac{Q}{m \cdot c_p} = \frac{518863,3 \cdot 10^3}{6375230 \cdot 2,99} = 27,13 \text{ K}$$

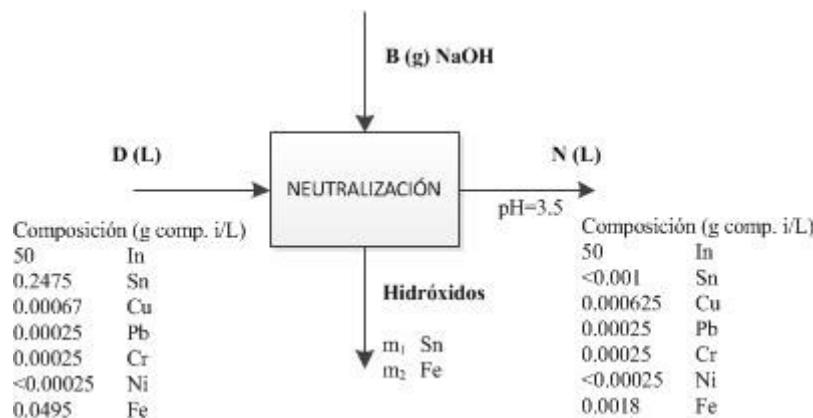


Ilustración 23: Diagrama del paso de neutralización.

Fuente: Elaboración propia.

#### 2.1.4.3 Filtración

Composición de la torta:

$$1571,6 \text{ g Sn} \cdot \frac{152,7 \text{ g Sn(OH)}_2}{118,7 \text{ g Sn}} = 2021,76 \text{ g Sn(OH)}_2$$

$$304,09 \text{ g Fe} \cdot \frac{106,8 \text{ g Fe(OH)}_3}{55,8 \text{ g Fe}} = 582,04 \text{ g Fe(OH)}_3$$

Total de sólidos filtrados (en base seca): 2603,8 g

Total de sólidos filtrados (con 8% humedad): 2830,2 g

#### 2.1.4.4 Sulfuración

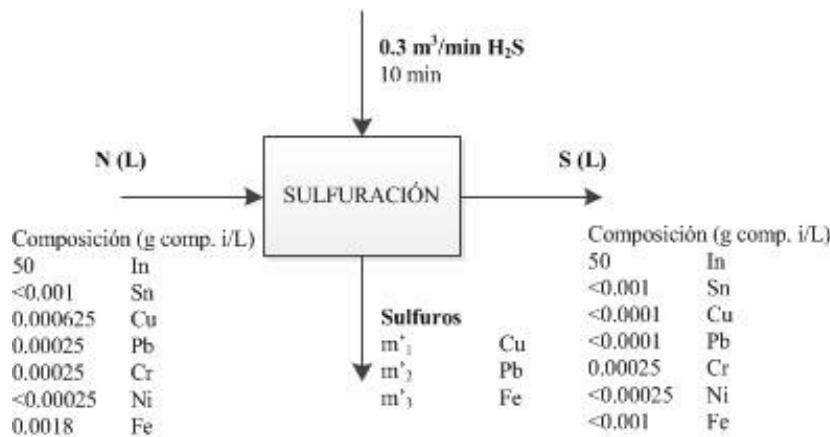


Ilustración 24: Diagrama del paso de sulfuración.

Fuente: Elaboración propia.

Balance a especies atómicas (en g):

Espece	Entra	Sale	$m'_i$ (g)
Cu	3,98	$= m'_1 + <0,638$	>3,34
Pb	1,59	$= m'_2 + <0,638$	>0,95
Fe	11,48	$= m'_3 + <6,375$	>5,11

Tabla 13: Sulfuración. Balance a especies atómicas, en g.

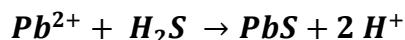
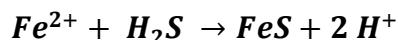
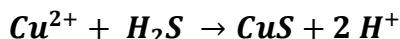
Fuente: Elaboración propia.

Cálculo de la corriente de  $H_2S$  (supuesto comportamiento de gas ideal):

$$1 \frac{m^3}{min} \cdot 3 min = 3 m^3(CN)$$

$$n_{H_2S} = \frac{1 atm \cdot 3000 L}{0,082 \cdot 273 K} = 134,01 mol H_2S$$

Cantidad de  $H_2S$  necesario para la reacción de formación de los sulfuros de Cu, Pb y Fe:



$$3,34 g Cu \cdot \frac{1 mol Cu}{63,54 g Cu} \cdot \frac{1 mol H_2S}{1 mol Cu} = 0,053 mol H_2S$$

$$5,11 g Fe \cdot \frac{1 mol Fe}{55,845 g Fe} \cdot \frac{1 mol H_2S}{1 mol Fe} = 0,092 mol H_2S$$

$$(n_{H_2S})_{consumido} = 0,14 mol H_2S$$

#### 2.1.4.5 Electroobtención

Los cátodos corresponden a láminas de alrededor de  $1 m^2$  de área. El material seleccionado para el cátodo es acero inoxidable, el cual es apropiado para soluciones electrolíticas de hidróxido sódico. El ánodo está compuesto de grafito.

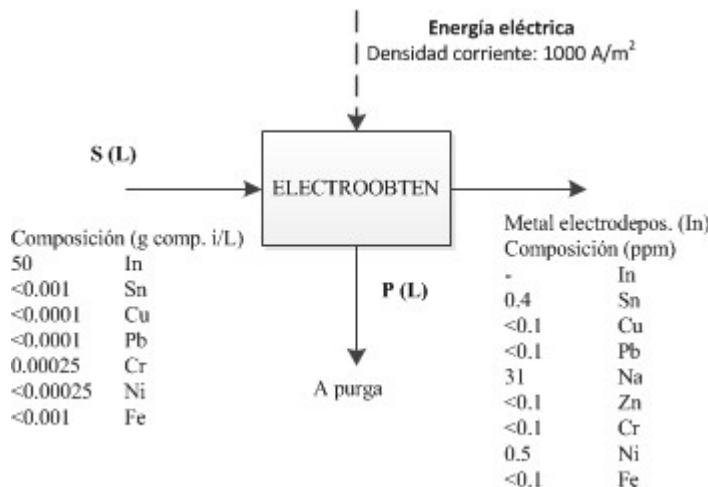


Ilustración 25: Diagrama del paso de electroobtención.

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta que  $1 \text{ ppm} = 1 \frac{\text{g analito}}{\text{T muestra}}$ , y considerando la deposición de la totalidad de indio iónico.

Metal electro.	In	Sn	Cu	Pb	Na	Zn	Cr	Ni	Fe
Concentr (ppm)	-	0,4	<0,1	<0,1	31	<0,1	<0,1	0,5	<0,1
Masa (g)	343(kg)	0,1372	<0,0343	<0,0343	10,633	<0,0343	<0,0343	0,1715	<0,0343

Tabla 14: Electroobtención. Balance a especies atómicas, en g.

Fuente: Elaboración propia.

Según la ley de Faraday:

$$m_F = \frac{M \cdot I \cdot \eta_c \cdot t \cdot A_t}{n \cdot F}$$

donde  $m_F$  es la masa depositada (g)

M el peso molecular del metal depositado

n la valencia del ion metálico en la solución

F la constante de Faraday (96487 C/equivalente)

I la corriente que circula (A)

t el tiempo de operación de la electrolisis (s)

$A_t$  el área total expuesta a la depositación ( $\text{m}^2$ )

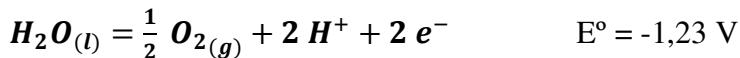
despejando t de la ecuación:

$$t = \frac{m_F \cdot n \cdot F}{M \cdot I \cdot \eta_c} = \frac{343000 \cdot 3 \cdot 96487}{114,82 \cdot 1000 \cdot 0,9} = 960780 \text{ s} = 266,88 \text{ h} = 11,1 \text{ días}$$

Ánodo



 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------



Cátodo



Resultado del proceso:

- Deposición de In en el cátodo.
- Desprendimiento de hidrógeno en el cátodo y empobrecimiento del electrolito en  $H^+$  y en indio.

Se precisan al menos 1,7 V de voltaje de celda para la electroobtención de indio. También se conoce que es preciso un sobrepotencial de más de 2 V en el rango de 50-200 mA/cm<sup>2</sup> de densidad de corriente en solución de ácido clorhídrico.

La electroobtención tiene lugar a 40°C.

El voltaje de celda se mantendrá alrededor de 6 V para una densidad de corriente de 100 mA/cm<sup>2</sup>.

$$V_{cel} = \Delta E + \eta_A + |\eta_c| + R \cdot I + \text{pérdidas}$$

$$\Delta E = E_{\text{ánodo}} - E_{\text{cátodo}}$$

donde R es la resistencia del electrolito ( $\Omega \cdot m^2$ )

I es la densidad de corriente ( $A/m^2$ )

Pérdidas es el término que engloba las pérdidas en los conductores externos (V)

Consumo específico de energía en el paso de electroobtención:

$$CE \left( \frac{kWh}{kg} \right) = \frac{V_{cel}(V) \cdot \frac{I(A)}{\eta} \cdot t(h)}{1000 \cdot m_F(kg)} = \frac{6 \cdot \frac{1000}{0,9} \cdot 266,88}{1000 \cdot 343} = 5,19 \frac{kWh}{kg In}$$

$$= 5190 \frac{kWh}{tn In}$$

Consumo de energía eléctrica =  $5,19 \cdot 343 = 1779,2 \text{ kW}$

#### 2.1.4.6 Fusión

El indio obtenido es fundido en un horno de crisol, del cual se crean a continuación formas que satisfacen los requerimientos de los clientes, generalmente como lingote o barras.

Balance de materia a componentes (traza):

$$0,02475025 \cdot y = z$$

donde y es la composición del metal fundido en cada especie (ppm)

z es la cantidad de cada especie en el metal fundido (g)

Masa (g)	In	Sn	Cu	Pb	Na	Zn	Cr	Ni	Fe
Electrodeposito	343(kg)	0,1372	<0,0343	<0,0343	10,633	<0,0343	<0,0343	0,1715	<0,0343
In fundido	343(kg)	0,1372	<0,0343	<0,0343	<0,0343	<0,0343	<0,0343	0,1029	<0,0343



Impurezas	-	-	-	-	10,599	-	-	0,069	-
-----------	---	---	---	---	--------	---	---	-------	---

Tabla 15: Fusión. Balance a especies atómicas, en g. Fuente: Elaboración propia.

Especie	PM	ρrelativa (20°C)	PF (°C)	PE (°C)	Qfusion (cal/mol)	C <sub>p</sub> (J/K·kg)
In	114,76	7,3	155	1450	781	233
Sn	118,70	5,75	231,8	2260	1720	-
Na	22,997	0,97	97,5	880	630	-
Ni	58,69	8,90	1452	2900	4200	-
NaOH(s)	40	2,13	318,4	1390	2000	2010

Tabla 16: Propiedades físicas de las especies. Fuente: Varios.

Balance de energía:

Calor absorbido por un material a una temperatura dada (Wh):

$$q = \frac{w \cdot c_m \cdot t'}{3,412} + L + R$$

donde  $c_m$  es el calor específico medio del metal dentro del rango de temperaturas (Btu/lbm°F)

w es el peso de metal (lb)

t' es el aumento de temperatura (°F)

L es el calor latente, si existe (Wh)

R es el calor de la reacción, si la hubiera (Wh)

$$q = \frac{756,2 \cdot 0,057 \cdot (600,8 - 212)}{3412} = 4911,7 \text{ Wh} = 4,91 \text{ kWh}$$

Considerando el término de pérdidas (crisol de 0,527 m de diámetro): 2,5 kW

La potencia absorbida durante la fusión es:  $4,9 + 2,5 = 7,4 \text{ kW}$

En condiciones normales será suficiente una potencia suplementaria de 3 kW, con lo que la potencia oscila entre 10 y 11 kWh.

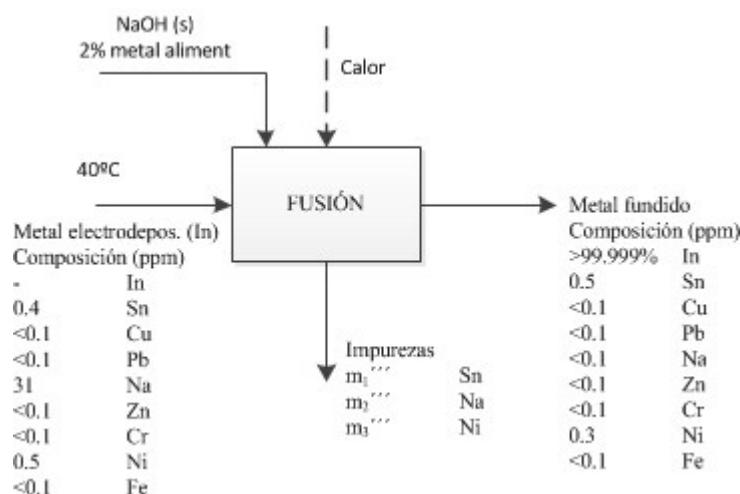


Ilustración 26: Diagrama del paso de fusión.

Fuente: Elaboración propia.



## 2.1.5 Estudio técnico de la primera alternativa

### 2.1.5.1 Descripción de equipos

#### • ÁREA 100: Reducción de tamaño

La chatarra de pantalla de cristal líquido es suministrada desde la instalación de desensamblado de un gestor de residuos autorizado con granulometrías inferiores a 1 mm. Durante la etapa de reducción de tamaño se lleva a cabo la molienda de la chatarra hasta obtener un tamaño inferior a 150 µm.

Mediante contenedores autobasculantes se transportará la chatarra en bruto alimentada a una tolva de carga que tiene una capacidad máxima de 35 t. Una cinta transportadora eleva el mineral para descargarlo mediante un basculante en una tolva de alimentación de 7 t que regula la alimentación del molino de bolas.

Se trata de un **molino cónico de bolas, E-1**. Consiste en una carcasa cilíndrica que gira lentamente alrededor de un eje horizontal, y está llena aproximadamente hasta la mitad de su volumen con un medio sólido de molienda, en este caso bolas metálicas. La carcasa es de acero, con un recubrimiento de una lámina de acero de elevado contenido en carbono, porcelana o caucho.

Los molinos de volteo pueden operar tanto de forma continua como discontinua. En este caso se selecciona un modo de operación discontinua. En una máquina discontinua, se introduce en el molino, a través de una abertura situada en la carcasa, una determinada cantidad de sólido que ha de ser molido. Se cierra entonces la abertura y el molino se mantiene girando durante varias horas, después de lo cual se para y se descarga el producto.

En todos los molinos de volteo los elementos de molienda son elevados por la carcasa hasta cerca de la parte superior, desde donde caen sobre las partículas situadas debajo. La energía consumida en elevar los elementos de molienda es utilizada en reducir el tamaño de las partículas.

En un molino de bolas la mayor parte de la reducción se produce por impacto de la caída de las bolas desde cerca de la parte superior de la carcasa. En un molino de bolas grande la carcasa puede tener 3 m de diámetro y 4,25 m de longitud. Las bolas son de 25 a 125 mm de diámetro.

Los molinos de bolas son excelentes para moler hasta polvo muy fino en un solo paso cuando el consumo de energía no es una variable importante. La segregación de las unidades de molienda en una sola cámara es una característica del molino de bolas cónico. Esta segregación de los medios de molienda en elementos de diferentes tamaños y pesos ayuda considerablemente a la pérdida de energía, haciendo que las bolas grandes y pesadas rompan solamente las partículas grandes sin interferencia de las finas, mientras que las bolas pequeñas y ligeras no caigan sobre las partículas grandes a las que no pueden romper.

La alimentación entra por un lado en la zona de molienda primaria donde el diámetro de la carcasa es máximo. Mientras que el producto sale por el otro lado. Un molino de este tipo contiene bolas de diferentes tamaños que se desgastan y se hacen más pequeñas a medida que opera el molino. Periódicamente se añaden nuevas bolas grandes.

Al girar la carcasa, las bolas grandes se desplazan hacia el punto de máximo diámetro mientras que las bolas pequeñas emigran hacia el punto de descarga. Por tanto, la rotura inicial de las partículas de la alimentación es realizada por las bolas más grandes que caen desde una altura mayor, mientras que las partículas pequeñas son molidas por bolas pequeñas que caen desde una altura mucho menor. El consumo de energía está ligado a la dificultad de la operación de rotura, aumentando así la eficacia del molino.



Los molinos de bolas producen de 1 a 50 t/h de polvo del cual entre 70-90% pasa por un tamiz de malla 200 (74 µm). El consumo total de energía para un molino de bolas es del orden de 20 CV·h/t (16 kWh/t).

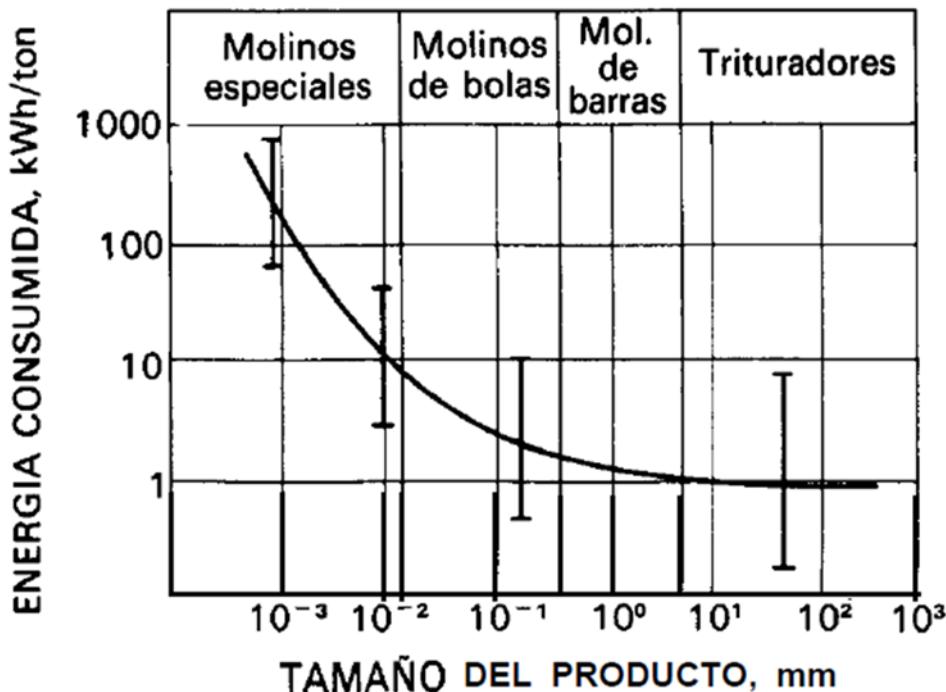


Ilustración 27: Relación entre la energía consumida y tamaño de producto, para distintos tipos de molinos. Fuente: Smith, McCabe

En la descarga de molinos, para molienda fina y ultrafina (como es el caso), la fuerza de gravedad es sustituida por el arrastre de un fluido portador. El polvo se retira de la corriente gaseosa por medio de separadores de ciclón o de filtros de mangas.

Las partículas de chatarra pulverizadas transportadas por la corriente de aire se conducen horizontalmente desde la salida del molino a través de una conducción de 4 m de largo hacia un **filtro de mangas, E-2**, situado a continuación del molino y sobre una base que lo eleva del suelo.

MOLINO CÓNICO DE BOLAS (E-1)	
Diámetro	0,9 m
Longitud	1,8 m
Material	Carcasa de acero recubierto de caucho y bolas metálicas.
Capacidad	0,65-2 t/h
Potencia	18,5 kW

Ilustración 28: Características del molino cónico de bolas.

Fuente: Elaboración propia.



Se trabaja con caídas de presión en torno a 2 atmósferas. La velocidad a la que los gases pasan por la tela debe ser baja (entre 0,005-0,03 m/s), para evitar una excesiva compactación de sólidos que redundaría en una elevación de la pérdida de carga, o para impedir la rotura local del lecho filtrante que permitiría el paso de partículas grandes a través del filtro. Para mantener una velocidad constante se debe aumentar la presión a medida que aumenta el espesor de la torta.

El caudal de aire que atraviesa el filtro de mangas es de 1000 m<sup>3</sup>/h.

El filtro de mangas está formando por mangas de fibra sintética de alta porosidad. Las mangas servirán de soporte para el lecho filtrante de modo que la eficiencia de la filtración aumentará de forma progresiva.

La tela será del tipo fieltro debido al sistema de limpieza pulse-jet. Se selecciona una tela de polyester de 16 onzas, con un espesor de 0,2", diámetro de 4,5" y longitud de 60", considerando la bolsa como un cilindro mucho más largo que ancho.

El polyester (dacrón) se caracteriza por su buena resistencia a materiales ácidos y básicos además de buena flexibilidad, lo cual lo dota de una buena estabilidad frente a la abrasión.

Las dimensiones del filtro de mangas son 3,8 m de alto, 0,75 m de ancho y 0,75 m de largo y estará formado por 40 mangas en total. Opera en continuo, y la limpieza se produce mediante pulsos de aire comprimido (100 ms) cada 3 minutos desde toberas situadas en la parte superior de las mangas reguladas por un programador de ciclos.

El área total de filtración es:

$$A = \left( \frac{\pi \cdot \varnothing^2}{4} + \pi \cdot \varnothing \cdot L \right) \cdot n_{mangas} = \left( \frac{\pi \cdot 0,127^2}{4} + \pi \cdot 0,127 \cdot 1,524 \right) \cdot 40 \\ = 24,83 \text{ m}^2$$

FILTRO DE MANGAS PULSE-JET (E-2)	
<b>Alto</b>	3,8 m
<b>Ancho</b>	0,75 m
<b>Largo</b>	0,75 m
<b>Nº mangas</b>	40
<b>Material</b>	Carcasa de acero AISI 202, mangas polyester 16 onzas.

Tabla 17: Características del filtro de mangas. Fuente: Elaboración propia.

Las partículas depositadas en la superficie de las mangas se desprenden y son recogidas en el fondo de la tolva de descarga, descargándose mediante un tornillo sin-fin y una válvula rotatoria. El aire una vez filtrado se vierte a la atmósfera.

Un tornillo sin-fin, arrastra las partículas de chatarra hacia la tolva de alimentación de un elevador de cangilones que eleva las partículas de chatarra, descargándola en una rampa de descarga que distribuye el mineral entre dos silos de almacenamiento.

Se disponen de dos silos de sección cilíndrica y parte inferior cónica, con una capacidad de 245 t.

$$\text{Capacidad silos} = 35 \frac{tn}{día} \cdot 14 \text{ día} = 490 \text{ tn} \cdot 1,041 \frac{m^3}{t} = 510,4 \text{ m}^3$$

Cada uno posibilita el aprovisionamiento de chatarra para una semana a la capacidad nominal de la planta. Están construidos con acero inoxidable 304 ya que es más resistente y duradero que el



acero al carbono, y se fijarán sobre cuatro pilares

En la parte inferior cónica, la descarga de partículas de chatarra LCD está controlada por una válvula rotativa de construcción metálica y hermética. Tiene capacidad para dosificar 2 t/h a un circuito de impulsión por transporte neumático en fase fluida que traslada la chatarra de LCD pulverizada hasta el Área 200 donde se llevará a cabo su lixiviación.

Las partículas de chatarra se conducen suspendidas en una corriente de aire de 25 m/s ( $U_g$ ) por una tubería hasta un ciclón de descarga sobre un depósito de proceso.

La soplante genera una presión de 5 atm con una pérdida de carga de 0,50 atm, transportando un volumen de aire de 500 m<sup>3</sup>/h, siendo la relación de carga ( $\mu = W_s/W_g$ ) igual a 3. De esta manera se posibilita transportar 1500 kg/h. La potencia requerida por la soplante es 5,22 kW.

SOPLANTE	
<b>Presión</b>	5 atm
<b>Pérdida de carga</b>	0,5 atm
<b>Caudal</b>	500 m <sup>3</sup> /h
<b>Fluido transportado</b>	Aire
<b>Capacidad</b>	1500 kg/h
<b>Potencia</b>	5,22 kW

Tabla 18: Características de la soplante. Fuente: Elaboración propia.

#### • ÁREA 200: Lixiviación

Está ubicada dentro de la nave de proceso y está compuesta por: un ciclón convencional Lapple que capta la chatarra transportada neumáticamente, tolva de proceso, dos tanques de lixiviación, un tanque de recirculación de lixiviado y un filtro de prensa para separar la chatarra de LCD agotada.

El ciclón está construido en acero inoxidable AISI 304 opera descargando las partículas de 150 µm en un colector, la eficacia de la separación es del 99 %.

Para calcular el diámetro del ciclón se selecciona una velocidad de entrada de 25 m/s. Las otras dimensiones se relacionan con el diámetro para cada familia de ciclones. Para el cálculo del área del ducto de entrada:

$$\text{Área ducto entrada} = \frac{Q}{V_i} = \frac{0,14}{25} = 0,0056 \text{ m}^2$$

$$\text{Área ducto entrada} = a \cdot b$$

Para un ciclón Lapple:

- Altura de entrada al ciclón:

$$a = 0,5 \cdot D_c$$

- Ancho de entrada al ciclón:

$$b = 0,25 \cdot D_c$$

$$a \cdot b = 0,5 \cdot D_c \cdot 0,25 \cdot D_c = 0,0056$$



$$D_c = \sqrt{\frac{0,0056}{0,125}} = 0,2117 \text{ m}$$

El resto de dimensiones se obtienen en base a las proporciones anteriores (ver Ilustración 29):

Parámetro	Nomenclatura	Proporción (Lapple)	Dimensión (m)
Diámetro del ciclón	D <sub>c</sub> /D <sub>c</sub>	1,0	0,211
Altura de entrada	a/D <sub>c</sub>	0,5	0,106
Ancho de entrada	b/D <sub>c</sub>	0,25	0,053
Altura de salida	S/D <sub>c</sub>	0,625	0,132
Diámetro de salida	D <sub>s</sub> /D <sub>c</sub>	0,5	0,106
Altura parte cilíndrica	h/D <sub>c</sub>	2,0	0,423
Altura parte cónica	z/D <sub>c</sub>	2,0	0,423
Altura total ciclón	H/D <sub>c</sub>	4,0	0,847
Diámetro salida partículas	B/D <sub>c</sub>	0,25	0,053

Tabla 19: Dimensiones del ciclón. Fuente: Elaboración propia.

Las partículas al dirigirse hacia las paredes del **ciclón, E-3**, perderán su energía y caerán a un colector situado en la parte inferior del cuerpo. Tras su paso por el ciclón, la chatarra queda depositada en una tolva de proceso, mientras que la corriente de aire purificado se libera a la atmósfera.

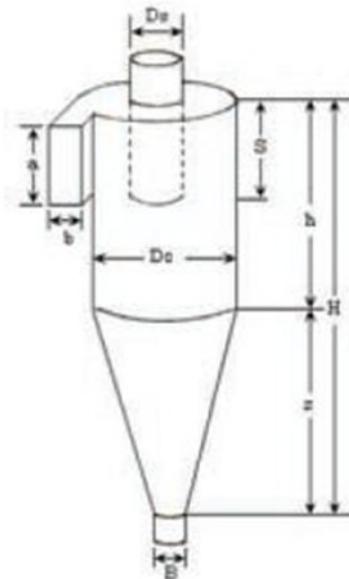


Ilustración 29: Dimensiones de un ciclón.

La chatarra de pantalla de cristal líquido recolectada por el colector es descargada en una tolva de proceso con una capacidad de 25 m<sup>3</sup>, una válvula rotatoria regula la cantidad de chatarra suministrada a los tanques de lixiviación en cada carga. La sección superior cuadrada presenta las siguientes dimensiones: 3,5 m de largo y 3,5 m de ancho, mientras que la cara superior de la tolva

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

alcanza 4,95 m sobre el nivel del suelo.

La parte inferior es un tronco de pirámide que debe tener un volumen de 6,625 m<sup>3</sup>, sabiendo que el lado de la sección inferior de descarga mide 0,3 m, la sección superior presenta un área de 12,25 m<sup>2</sup> (A<sub>s</sub>) y la inferior 0,09 m<sup>2</sup> (A<sub>i</sub>) siendo la altura resultante:

$$\begin{aligned}
V(m^3) &= 6,625 = (A_s + A_i + \sqrt{A_s} + \sqrt{A_i}) \cdot \frac{h}{3} \\
&= (12,25 + 0,09 + \sqrt{12,25} + \sqrt{0,09}) \cdot \frac{h}{3} \\
h(m) &= \frac{6,625 \cdot 3}{(12,25 + 0,09 + \sqrt{12,25} + \sqrt{0,09})} = 1,23 \text{ m}
\end{aligned}$$

Con una válvula rotativa se dosifica las cargas a la batería de dos **lixiviadores** en serie, **E-4** y **E-5**, operando en régimen discontinuo. Cada uno de los cuales posee una capacidad para alojar una cantidad de 6375 litros de solución de lixiviación además de 7 toneladas de chatarra de pantalla de cristal líquido (LCD).

En ellos extraemos el metal indio presente en las partículas de chatarra de cristal líquido mediante tratamiento de ácido clorhídrico 6M transportado desde **el tanque de alimentación de ácido clorhídrico, E-14**, a través de tuberías de PVC.

La chatarra de cristal líquido entra desde la válvula rotativa por la parte superior del reactor tras la apertura del cierre hermético.

La relación S/L en los reactores es 1/2, de este modo necesitamos utilizar 7000 kg de disolución de HCl 6M. El volumen del reactor de lixiviación requerido, viene definido por la suma de los volúmenes tanto del sólido como la disolución ácida mayorado por un factor de 1,25:

$$\begin{aligned}
capacidad\ tanque &= \left( 6,375 \text{ m}^3 \text{ HCl} + 7000 \text{ kg LCD} \cdot \frac{1}{960} \frac{\text{m}^3}{\text{kg LCD}} \right) \cdot \frac{100}{80} \\
&= 17,1 \text{ m}^3 = 4517,3 \text{ galones}
\end{aligned}$$

$$temperatura\ de\ operación \approx 25\ ^\circ\text{C}$$

$$tiempo\ de\ residencia = 4\ horas$$

Ambos tanques cuentan con un sistema de agitación compuesto por un agitador movido mediante un motor eléctrico. Se trata de tanques encamisados y caldeados a una temperatura idónea para facilitar la reacción del ácido clorhídrico con el indio presente en la chatarra (aproximadamente 25°C). Por otro lado es preciso evitar una temperatura excesiva que conduciría a la formación de vapores nocivos de ácido clorhídrico.

El lixiviado pasa del primer reactor (E-4) al segundo reactor (E-5) tras 4 horas de operación y de éste al tanque de recirculación de lixiviado (E-8). Mientras que la solución permanece en un tanque el otro es vaciado de chatarra y limpiado como preparación para la siguiente carga. Están programados 5 contactos de 4 horas y media al día, donde 4 horas corresponden al tiempo de residencia en el reactor, 15 minutos corresponden a la descarga y otros 15 minutos a la carga de lixiviado. La solución empleada en la lixiviación repite este proceso hasta que es agotada una parte del ácido clorhídrico utilizado.



Este proceso de lixiviación y recirculación dura 11 días, tras lo cual, continua con la fase de purificación.

Para dimensionar los reactores, en primer lugar se calcula su diámetro. Teniendo en cuenta que el reactor está formado por dos partes, una es el cilindro (la parte mayor), y la otra es la parte abombada que comprende las partes superior e inferior. Así que la expresión utilizada para encontrar el diámetro interior es:

$$D = \sqrt[3]{\frac{V}{\frac{\pi}{4} \cdot 1,5 + \frac{\pi}{12}}} = \sqrt[3]{\frac{17,1}{\frac{\pi}{4} \cdot 1,5 + \frac{\pi}{12}}} = 4,05 \text{ m}$$

Para el cálculo de la altura del reactor se ha consultado a la bibliografía y se ha utilizado la relación:

$$H = 1,5 \cdot D = 1,5 \cdot 4,05 = 6,08 \text{ m}$$

Estos valores son las dimensiones generales del reactor.

Con respecto a los materiales, están fabricados en acero recubierto de caucho. Este recubrimiento impide el ataque del ácido clorhídrico ionizado.

LIXIVIADOR (E-4 y E-5)	
<b>Diámetro</b>	4,05 m
<b>Altura</b>	6,08 m
<b>Capacidad</b>	17,1 m <sup>3</sup>
<b>T<sup>a</sup> operación</b>	25°C
<b>Tiempo de residencia</b>	4 horas

Tabla 20: Características del lixiviador. Fuente: Elaboración propia.

La solución procedente de los lixiviadores se conduce hasta un **filtro de placas**, E-6, donde se eliminan las partículas de chatarra de pantalla de cristal líquido. Este filtro de placas tiene unas dimensiones de 4,6 m de alto, 5 m de ancho y 5,24 m de largo. Está construido en estructura de acero AISI 316. Cuenta con 40 placas construidas en polipropileno. Tiene una potencia de 11 kW.

Las placas tienen unas dimensiones de 1,2 m x 1,2 m de área por 0,05 m de espesor. Es posible el cálculo del volumen de la cámara y de la capacidad del filtro mediante:

$$\text{Capacidad} = V_{camara} \cdot n_{placas}^o = 1,2 \text{ m} \cdot 1,2 \text{ m} \cdot 0,05 \text{ m} \cdot 40 \text{ placas} = 2,88 \text{ m}^3$$

FILTRO DE PLACAS (E-6)	
<b>Altura</b>	4,6 m
<b>Longitud</b>	5,24 m
<b>Anchura</b>	5 m
<b>Material estructura</b>	Acero AISI 316
<b>Numero placas</b>	40
<b>Dimensiones placas</b>	1,2x1,2x0,05 (en m)
<b>Capacidad total</b>	2,88 m <sup>3</sup>

 <b>Universidad de Granada</b> <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

<b>Material placas</b>	Polipropileno
<b>Potencia</b>	11 kW

Tabla 21: Características del filtro de placas.

Fuente: Elaboración propia.

#### • ÁREA 300: Purificación

Una vez el lixiviado alcanza una concentración de 50 g In/L continúa el proceso hasta la fase de purificación. En ésta, primeramente, se conduce el lixiviado hasta un **tanque de neutralización, E-7**.

El tanque de neutralización y envejecimiento consiste en un reactor químico mezcla perfecta encamisado. Un fluido refrigerante mantiene la temperatura del recipiente en el intervalo de temperatura entre 60-70°C.

En este tanque tiene lugar el paso de neutralización, de adición de un álcali (perlas de NaOH) a la solución. El objetivo es lograr un pH comprendido entre 0,5 y 4 (pH=1,7), con objeto de depositar y remover los hidróxidos de determinados iones metálicos presentes en la solución.

Mediante esta adición de álcali, es posible eliminar eficientemente la mayor parte del estaño, impureza principal de la chatarra de películas de ITO.

$$\text{temperatura operación} = 60 - 70 \text{ } ^\circ\text{C}$$

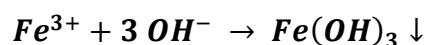
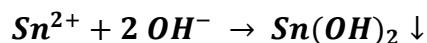
$$\text{tiempo residencia} = \geq 3 \text{ horas}$$

$$\text{capacidad tanque} = 6375 \text{ L} \cdot \frac{100}{80} = 7969 \text{ L} = 7,969 \text{ m}^3 = 2105 \text{ galones}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{V}{\frac{\pi}{4} \cdot 1,5 + \frac{\pi}{12}}} = \sqrt[3]{\frac{7,969}{\frac{\pi}{4} \cdot 1,5 + \frac{\pi}{12}}} = 1,77 \text{ m}$$

$$H = 1,5 \cdot D = 1,5 \cdot 1,77 = 2,65 \text{ m}$$

Las reacciones que posibilitan la eliminación de las impurezas metálicas en esta fase son:



El reactor de neutralización está construido en acero al carbono recubierto de caucho.

NEUTRALIZADOR (E-7)	
<b>Diámetro</b>	1,77 m
<b>Altura</b>	2,65 m
<b>Capacidad</b>	7,97 m <sup>3</sup>
<b>T<sup>a</sup> operación</b>	65°C
<b>Tiempo de residencia</b>	3 horas

Tabla 22: Características del neutralizador.

Fuente: Elaboración propia.



La eliminación de los hidróxidos de estaño y hierro se lleva a cabo mediante un paso de filtración en un **filtro de placas, E-8**. Dicho filtro de placas tiene 1,8 m de alto, 2 m de ancho y 1,43 m de largo. Está construido en estructura de acero AISI 316 y cuenta con 7 placas de polipropileno de 470 mm y espesor de torta 32 mm.

Con los datos anteriores se puede calcular la capacidad del filtro:

$$\text{Capacidad} = 0,47 \text{ m} \cdot 0,47 \text{ m} \cdot 0,032 \text{ m} \cdot 7 \text{ placas} = 0,049 \text{ m}^3$$

FILTRO DE PLACAS (E-8)	
Altura	1,8 m
Longitud	1,43 m
Anchura	2 m
Material estructura	Acero AISI 316
Número placas	7
Dimensiones placas	0,47x0,47x0,032 (en m)
Capacidad total	0,049 m <sup>3</sup>
Material placas	Polipropileno
Potencia	2 kW

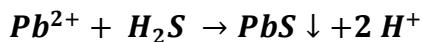
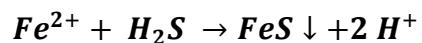
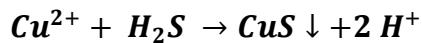
Tabla 23: Características del filtro de placas. Fuente: Elaboración propia.

Tras su paso por el tanque de neutralización y envejecimiento, la solución desprovista de la mayor parte de su contenido en estaño es dirigida a un **tanque de burbujeo de sulfuro de hidrógeno, E-9**.

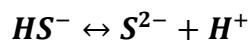
En este reactor agitado de 7969 L, se burbujea sulfuro de hidrógeno gaseoso mediante una bomba peristáltica con un caudal de 1000 L/min. Las bombas peristálticas se utilizan de forma habitual para bombear fluidos agresivos porque el fluido puede dañar la bomba.

Gran parte del sulfuro de hidrógeno gaseoso que se alimenta al sistema (aproximadamente el 70%) se absorbe en el líquido y solo el porcentaje restante de gas reacciona con los metales pesados ( $M^{2+}$ ).

De acuerdo a la estequiometría de la reacción, la reacción entre el sulfuro y los metales pesados es equimolar.



Sin embargo para este tipo de sistemas, es importante considerar la cantidad de sulfuro que se absorbe en la fase líquida, ya que el sulfuro de hidrógeno gaseoso tiende a un equilibrio (Hua y Deng, 2003).



Las concentraciones de  $H_2S$ ,  $HS^-$  y  $S^{2-}$  están en función directa del pH como se muestran las siguientes ecuaciones:



$$\log \frac{[HS^-]}{[H_2S]} = pH - pK_1$$

$$\log \frac{[S^{2-}]}{[HS^-]} = pH - pK_2$$

Las dimensiones del tanque de burbujeo son similares a las del neutralizador y al igual que éste, está construido en acero al carbono recubierto de caucho.

TANQUE DE SULFURACIÓN (E-9)	
<b>Diámetro</b>	1,77 m
<b>Altura</b>	2,65 m
<b>Capacidad</b>	7,97 m <sup>3</sup>
<b>Tiempo de residencia</b>	30 min

Tabla 24: Características del tanque de sulfuración.

Fuente: Elaboración propia.

El lixiviado tras el paso de sulfuración circula a través de un **filtro vertical de hojas, E-10**, donde se eliminan los sulfuros metálicos precipitados en el paso anterior (CuS, FeS y PbS). Estos sulfuros aun en cantidades minúsculas actúan como nocivos para la siguiente etapa de electroobtención. Las características del filtro vertical de hojas se muestran en la tabla siguiente.

FILTRO DE HOJAS (E-10)	
<b>Diámetro</b>	0,75 m
<b>Altura</b>	1,12 m
<b>Área filtrante</b>	10 m <sup>2</sup>
<b>Material</b>	Estructura en acero inoxidable

Tabla 25: Características del filtro de hojas.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez eliminados los sulfuros metálicos el lixiviado está listo para entrar en la etapa de electroobtención. Ésta tiene por objeto realizar una precipitación, selectiva por medio de electrolisis del elemento deseado, en este caso el indio metálico presente en la forma de cloruro de indio(III).

La precipitación por reducción electrolítica es actualmente uno de los procedimientos más sencillos para recuperar metales en forma pura y selectiva, respecto a las impurezas existentes en solución. Su característica principal radica en que el metal ya está en la solución y solamente se trata de recuperarlo depositándolo en el cátodo, mientras el ánodo es esencialmente insoluble.

En la actualidad tiene una gran importancia económica, al permitir el beneficio de recursos lixiviables, tanto en oro, como cobre, plata, etc., cuyo tratamiento por otras vías resultaría económicamente inviable.

Calculamos el área total requerida para que se produzca la deposición total del indio presente en la solución. A través de esta área estimaremos las dimensiones de la celda y el tamaño de la fuente de poder.

Fijada la producción diaria en 343 kg.

 <b>Universidad</b> <b>de Granada</b>  <b>Facultad de</b> <b>Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

$$m_F = \frac{M \cdot I \cdot \eta_c \cdot t \cdot A_t}{n \cdot F}$$

donde  $m_F$  es la masa depositada (g)  
 $M$  el peso molecular del metal depositado  
 $n$  la valencia del ion metálico en la solución  
 $F$  la constante de Faraday (96487 C/equivalente)  
 $I$  la corriente que circula (A)  
 $t$  el tiempo de operación de la electrolisis (s)  
 $A_t$  el área total expuesta a la deposición ( $m^2$ )

$$A_t = \frac{m_F \cdot n \cdot F}{t \cdot M \cdot I \cdot \eta_c} = \frac{343000 \cdot 3 \cdot 96487}{86400 \cdot 114,82 \cdot 1000 \cdot 0,9} = 11,12 m^2$$

Consumo específico de energía en el paso de electroobtención:

$$CE \left( \frac{kWh}{kg} \right) = \frac{V_{cel}(V) \cdot \frac{I(A)}{\eta} \cdot t(h)}{1000 \cdot m_F(kg)} = \frac{6 \cdot \frac{1000}{0,9} \cdot 24}{1000 \cdot 343} = 0,47 \frac{kWh}{kg In} = 470 \frac{kWh}{tn In}$$

Consumo de energía eléctrica =  $0,47 \cdot 343 = 160 \text{ kWh}$

Lo primero es estimar el número de celdas que se necesitan, estas dependerán de nuestra configuración de cátodos por celda.

$$N_{celdas} = \frac{A_t}{N_{cat} \cdot A_c \cdot 2}$$

$$N_{cat} = \frac{A_t}{N_{celdas} \cdot A_c \cdot 2} = \frac{11,12}{1 \cdot 1 \cdot 2} = 5,6 \cong 6$$

donde  $N_{celdas}$  es el número de celdas en la nave  
 $A_t$  el área total de deposición ( $m^2$ )  
 $N_{cat}$  el número de cátodos por celda  
 $A_c$  el área por cátodo, la deposición tiene lugar por ambos lados ( $m^2$ )

Habitualmente la electroobtención se lleva a cabo en celdas típicas de 6 a 8 m de largo, 1 a 1,5 m de ancho y de 1 a 1,5 m y medio de profundidad, siendo el volumen habitual de una de estas celdas igual a  $10 \text{ m}^3$ .

Se utilizan ánodos y cátodos laminares de aproximadamente  $1 \text{ m}^2$  de superficie por lado y se colocan de manera alternada en el interior de la celda. La distancia entre ánodo y cátodo, que normalmente fluctúa alrededor de los 45 mm, busca disminuir al máximo la caída de tensión que se produce por la resistencia del electrólito, pero manteniendo una distancia suficiente para evitar cortocircuitos.

- Ancho de la celda, viene dado por:
  - Ancho del electrodo (1 m)
  - Distancia del electrodo a la pared (0,1 m)
  - Ancho de la pared de la celda (0,1 m por lado)

$$\text{Ancho de celda} = An_{elect} + d_{e-p} \cdot 2 + An_{pared} \cdot 2$$

$$\text{Ancho de celda} = 1 + 0,1 \cdot 2 + 0,1 \cdot 2 = 1,4 \text{ m}$$



- Largo de la celda, viene dado por:
  - Número de cátodos más 1 (debido a que existe un ánodo más que cátodo).
  - Número de ánodos
  - Ancho del cátodo (0,015 m)
  - Ancho del ánodo (0,001 m)
  - Distancia entre ánodos y cátodos (0,1 m)
  - Ancho de las paredes de la celda (0,1 m por lado)

$$\text{Largo de celda} = N_{cat} \cdot An_{cat} + N_{an} \cdot An_{an} + N_{cat} \cdot d_{a-c} + 0,2$$

$$\text{Largo de celda} = 6 \cdot 0,015 + 7 \cdot 0,001 + 6 \cdot 0,1 + 0,2 = 0,897 \cong 1 \text{ m}$$

$$h = \frac{7,96 \text{ m}^3}{1,4 \text{ m}^2} = 5,7 \text{ m}$$

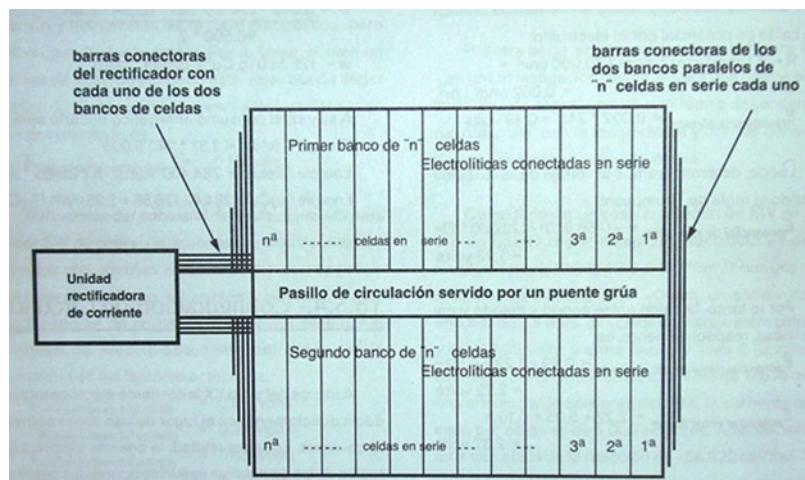


Ilustración 30: Esquema de una bancada de celdas de electroobtención.

Fuente: Desconocida

CELDA DE ELECTROOBTENCIÓN (E-11)	
<b>Altura</b>	1 m
<b>Anchura</b>	1,4 m
<b>Longitud</b>	1 m
<b>Material</b>	Estructura acero AISI 316, cátodo de acero inoxidable y ánodo de grafito
<b>Nº cátodos</b>	6 (acero inoxidable)
<b>Nº ánodos</b>	7 (grafito)

Tabla 26: Características de la celda de electroobtención.

Fuente: Elaboración propia.

- **ÁREA 400: Fusión y moldeo**



El metal indio depositado en los cátodos es recuperado y transportado mediante un **secador de tornillo, E-12**, hasta el área 400, donde una vez desprovisto de gran parte del agua es alimentado a un **horno de fusión, E-13**.

Las características del secador de tornillo mencionado se muestran en la siguiente tabla:

SECADOR DE TORNILLO (E-12)	
<b>Diámetro (tornillo)</b>	0,48 m
<b>Longitud (tornillo)</b>	10 m
<b>Distancia cubierta-eje</b>	0,40 m
<b>Velocidad tornillo</b>	16 rev/min
<b>Potencia del motor</b>	9,5 kW
<b>Material</b>	Acero inoxidable
<b>Humedad inicial</b>	9%
<b>Humedad final</b>	0,1%
<b>T<sup>a</sup> entrada sólidos</b>	20°C
<b>T<sup>a</sup> salida sólidos</b>	100°C
<b>Pot. consumida</b>	410 KWh / t. producto
<b>Capacidad tratamiento</b>	250 kg sólido seco / h

Tabla 27: Características del secador de tornillo.

En la fusión se incluyen, además del cambio de estado, el calentamiento posterior del metal hasta alcanzar la temperatura específica conocida como temperatura de colada, si el metal debe verterse dentro de un molde, o temperatura de trabajo si el metal debe emplearse como capa de recubrimiento o como baño líquido de calentamiento.

Las temperaturas de colada de los metales y aleaciones no ferreas oscilan entre 100 y 200°C por encima del punto de fusión, variando para cada metal o aleación con el tipo de carga y con las dimensiones y tipo de colada según la finalidad a la que se destine la misma.

En la fusión de metales se produce una cierta pérdida de material por volatilización. Esta pérdida de material es generalmente despreciable.

A menudo es necesario agitar una aleación en estado fundido para evitar que se produzcan segregaciones. La agitación constituye también un medio para la igualación de las temperaturas y para evitar el sobrecalentamiento de la superficie de la masa fundida. Mediante bobinas de inducción adecuadas o utilizando un horno de inducción puede obtenerse una agitación automática.

La fusión de metales blandos y sus aleaciones puede conseguirse mediante el equipo de calentamiento de resistencias de aleación 80 Ni – 20 Cr. Los contenedores para estos materiales pueden ser crisoles, calderos de galvanizado, tanques, etc.

Los crisoles de fusión son de fundición de hierro o de acero moldeado y de varias aleaciones no ferreñas. La elección del tipo de material del crisol depende de la temperatura del metal fundido y las posibles reacciones de este metal con el material del crisol.

Se usan crisoles abiertos, de los que el material fundido se saca por decantación o bombeo. Es conveniente disponer de una profundidad de metal fundido superior a la necesaria para el servicio, para ayudar al aumento de temperatura cuando se añade metal frío.

Los crisoles cerrados tienen la ventaja de reducir la pérdida de calor que se produce en la superficie del metal fundido y de reducir la oxidación; además se dispone de espacio para una atmós-



fera protectora. Algunos hornos poseen un sistema de descarga del metal fundido mediante gas a presión, por ejemplo, vapor.

El aislamiento térmico de un crisol de fusión de metales debe ser suficiente para que la temperatura de la superficie exterior quede reducida a un valor seguro; por otra parte, el aislamiento térmico cuesta dinero. Como norma no es necesario utilizar una capa de material refractario a temperaturas inferiores a 600°C. Una capa refractaria es útil para mantener una temperatura uniforme en el metal.

En la Ilustración 31 puede verse una representación de las pérdidas de calor en función de la temperatura de los crisoles de fusión abiertos normales. Esta pérdida puede reducirse mediante una capa de material aislante granular, por ejemplo, carbón vegetal o tierra de diatomeas sobre la superficie del metal. Esta capa reduce también la oxidación del metal.

El equipo de regulación de temperatura de los crisoles es el mismo que se emplea en los hornos de resistencia. Como norma, los crisoles pequeños de 5 kW y menores sólo poseen control manual mediante un interruptor de dos o tres posiciones.

La velocidad de fusión de un crisol viene determinada por el tiempo necesario para que el metal fundido alcance de nuevo la temperatura de vertido o de trabajo después de la adición de una cantidad de metal frío.

La potencia necesaria en un crisol viene determinada por la velocidad necesaria para fundir un metal o aleación dada. En nuestro caso la potencia necesaria será la suma de la necesaria para la fusión, la necesaria para calentar el material base y para compensar la potencia que se pierde en forma de calor. Como norma, la potencia es algo superior para poder acelerar el calentamiento y para evitar un descenso excesivo de la temperatura cuando se añade el metal frío. El rendimiento de un crisol no depende de su potencia.

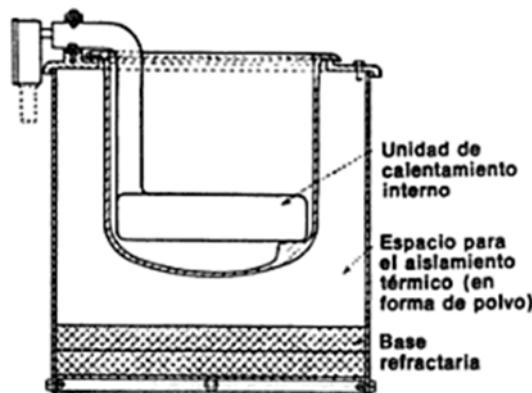


Ilustración 31: Representación de un crisol de fusión..

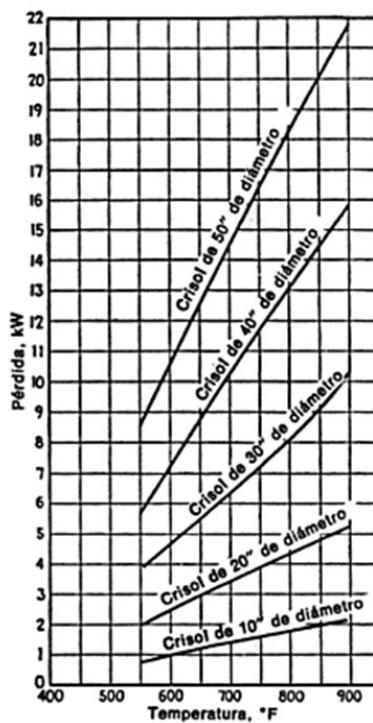


Ilustración 32: Pérdidas en función de la temperatura  
en crisoles de fusión.

Nos decantamos por el uso de un horno tipo crisol por quedar la carga totalmente aislada y cumplir los requerimientos de capacidad y de energía, tengamos en cuenta que se trata de un metal con bajo punto de fusión.

Las características del horno vienen descritas en la siguiente tabla:

HORNO DE CRISOL FIJO, E-13	
Altura	1,4 m
Anchura	1,2 m
Longitud	1,3 m
Material	Interior en fibra cerámica y ladrillo refractario.
Potencia	32 kW

Tabla 28: Características del horno de crisol. Fuente: Elaboración propia.

#### • ÁREA 500: Control de producción

La sala estará equipada con todos los equipos informáticos necesarios para poder realizar la vigilancia y el control de todo el proceso de fabricación del ácido sulfúrico.

Además de los controladores lógicos programables (PCL) la sala de control contará con los armarios en los que se ubicarán las cajas de conexión.

#### • ÁREA 600: Almacenamiento de reactivos y taller de mantenimiento

El área 600 alberga los tanques de almacenamiento de ácido clorhídrico. Dichos tanques son dos, el tanque de almacenamiento de **ácido clorhídrico fresco, E-14** y el **tanque de mezcla de ácido clorhídrico fresco y recirculado, E-15**.

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

El tanque de almacenamiento de ácido clorhídrico fresco 6M está construido en acero recubierto de caucho, se ha provisto de una válvula a su salida para controlar el paso de ácido clorhídrico fresco a la bomba que impulsará dicho ácido hasta el tanque de mezcla.

Para el cálculo de la capacidad de este tanque consideramos la cantidad total de ácido clorhídrico necesario para el paso de lixiviación (6375 L). Se trata de una capacidad mayorada en prevención de la posibilidad de no recircular electrolito agotado. También se tiene en cuenta que el nivel de ácido no debe superar el 80% de la capacidad total del tanque de almacenamiento.

$$\text{capacidad del tanque} = 6375 \text{ L} \cdot \frac{100}{80} = 7969 \text{ L} = 2105 \text{ galones}$$

Se tratará por tanto de un tanque cilíndrico dispuesto horizontalmente de 3,66 m de largo y 1,626 m de diámetro montado sobre una estructura de hormigón.

El tanque de mezcla consiste en un tanque de 2000 galones donde se produce la mezcla de ácido clorhídrico fresco procedente del tanque de almacenamiento de ácido clorhídrico (90%) y de la solución electrolítica agotada tras el paso de electroobtención de metal indio (10%).

Para lograr la mezcla se dispone de un agitador movido mediante un motor eléctrico. La solución procedente de este tanque se bombeará como corriente de alimentación para la fase de lixiviación.

Para el cálculo de la capacidad de este tanque consideramos un volumen correspondiente a la totalidad de la cantidad de ácido clorhídrico requerida para el proceso de lixiviación (6375 L, 1684 galones). También tendremos en cuenta que los tanques se dimensionan para que en su llenado no superen el 80% de su capacidad.

Por tanto, al igual que el tanque de almacenamiento de ácido clorhídrico fresco tendrá geometría cilíndrica y disposición horizontal. Sus dimensiones al igual que el anterior serán 3,66 m de largo y 1,626 m de diámetro e irá montado sobre una estructura de hormigón.

Para la fabricación de ambos tanques se utilizará acero con recubrimiento de caucho, depositado homogéneamente sobre el metal; dichos depósitos son de una gran resistencia y tenacidad. Se emplean varios cementos, tales como derivados sulfonados del caucho, obtenidos amasando, con los molinos de rodillos propios de la industria del caucho, ácido sulfúrico y goma.

- **ÁREA 700: Almacenamiento de chatarra**

El área de almacenamiento de chatarra abarca un área de 72 m<sup>2</sup>. En esta zona se almacenan, en forma de pila, la chatarra de pantalla LCD procedente de los gestores de residuos.

#### 2.1.5.2 Diseño de instalaciones

- Instalación de agua

El diseño de esta instalación precisa una estimación de la cantidad de agua a utilizar en la planta, tanto para el abastecimiento de los equipos de proceso como para el suministro del agua necesaria en la higiene y el aseo de todo el personal de la planta.

Se distinguen las siguientes redes:

- Red de abastecimiento de agua potable.

El caudal total será la suma de todos los caudales instantáneos mínimos (Q<sub>b</sub>) servidos por la totalidad de la instalación:  $\sum Q_b$ .

Los valores de los caudales instantáneos mínimos serán los que figuran en la Tabla 2.1 del Documento HS-4 del vigente Código Técnico de la Edificación.

En el presente proyecto se contemplan los siguientes aparatos sanitarios:



Aparato Sanitario	Caudal inst. min. (dm <sup>3</sup> /s)	Nº unidades	Caudal inst. min. total (dm <sup>3</sup> /s)
Grifo de laboratorio	0,20	2	0,40
Lavabo	0,10	3	0,30
Inodoro con cisterna	0,10	3	0,30
Ducha	0,20	2	0,40
Total			<b>1,40</b>

Tabla 29: Caudales mínimos de agua para aparatos sanitarios.

Fuente: Elaboración propia.

En la estimación del coeficiente de simultaneidad se tendrá en cuenta que se trata de 3 locales húmedos para un uso público. De esta manera, se selecciona un **coeficiente de simultaneidad, K**, de 0,85.

Para el cálculo del caudal máximo simultáneo se emplea la siguiente expresión:

$$\sum Q_b \cdot K = Q_c$$

donde  $\sum Q_b$  es el sumatorio de los caudales instantáneos mínimos (dm<sup>3</sup>/s)

K es el coeficiente de simultaneidad, adimensional.

Q<sub>c</sub> es el caudal de cálculo o caudal simultáneo (dm<sup>3</sup>/s)

Siendo, por tanto, el **caudal máximo simultáneo** en el distribuidor principal:

$$Q_c = 1,40 \frac{dm^3}{s} \cdot 0,85 = 1,19 \frac{dm^3}{s}$$

▪ Red de abastecimiento de agua industrial.

Esta instalación abastece a los equipos del proceso que necesitan agua durante su funcionamiento. El agua fría tiene una temperatura de 15°C.

Parte del agua se emplea para producir vapor que se utilizará como fluido de calefacción para los extractores, E-4 y E-5. Además se utiliza en los filtros de prensa, E-6 y E-8, para efectuar el lavado de la torta (se estima en un 20% del peso del sólido filtrado). También se suministra a la celda de electroobtención, E-11, para recuperar el volumen de líquido perdido por evaporación, las pérdidas se estiman en un 10% del volumen durante la duración de una carga.

Igualmente se alimenta agua fría al reactor de neutralización para evitar que se supere una temperatura de 70°C tras la reacción exotérmica entre ácido clorhídrico e hidróxido sódico.

Para el almacenamiento del agua industrial de proceso se utilizan 2 depósitos a partir de los cuales se abastecerá a cada uno de los equipos que precisan agua para su funcionamiento;

Cada depósito tendrá una capacidad mínima de 6800 dm<sup>3</sup>. Se seleccionan dos depósitos con una capacidad de 2000 galones cada uno, en ningún caso superarán el 90% de su capacidad.

- Instalación de fuel-oil

 <b>Universidad</b> <b>de Granada</b>  <b>Facultad de</b> <b>Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

Es necesario el suministro de fuel-oil para alimentar la sala de calderas cuyo vapor será utilizado entre otras cosas para el caldeo de los lixiviadores.

El diseño y la instalación del depósito de fuel-oil se realizarán según las normas marcadas por el Ministerio de Ciencia y Tecnología.

El depósito tendrá una capacidad de 50000 litros y estará totalmente enterrado. El resto de la instalación de fuel-oil está formada por:

- Bomba que realiza el trasiego del fuel-oil.
- Canalizaciones de llenado, aspiración retorno y ventilación.
- Resistencias eléctricas necesarias para precalentar el combustible y facilitar el trasiego.
- Filtros y válvulas.

La cantidad de combustible necesario se calcula en función del calor que hay que aportar para la obtención de vapor de calefacción.

$$\dot{Q} = m \cdot c_p \cdot \Delta T = 6375230 \cdot 4,2 \cdot (25 - 15) = 267760 \text{ kJ}$$

Necesidades de calor:

$$Q = \frac{\dot{Q}}{t} = \frac{267760}{600} = 446,3 \text{ kW}$$

En primer lugar se calcula la potencia necesaria del generador o de los generadores a instalar:

$$P_c = \frac{Q}{r_c \cdot r_i}$$

- donde
- |                |  |
|----------------|--|
| P <sub>c</sub> | es la potencia de la caldera (kW)                    |
| Q              | son las necesidades de calor (kW)                    |
| r <sub>c</sub> | es el rendimiento de la caldera                      |
| r <sub>i</sub> | es el rendimiento de la instalación (mínimo de 0,95) |

Para requerimientos caloríficos en el intervalo 150-800 kW se considera un rendimiento de la caldera (r<sub>c</sub>) de 83%. Si consideramos además un rendimiento mínimo de la instalación, se calcula la potencia de la caldera como:

$$P_c = \frac{446,3}{0,83 \cdot 0,95} = 565,97 \text{ kW}$$

Para potencias térmicas nominales a instalar mayores de 400 kW, se instalan dos o más generadores.

Utilizando como combustible fuel-oil líquido, se procede al cálculo del caudal másico de combustible a quemar:

$$m_c = \frac{P_c}{PCI}$$

- donde
- |                |   |
|----------------|---|
| m <sub>c</sub> | es el caudal másico de fuel-oil (kg/h)                              |
| P <sub>c</sub> | es la potencia de la caldera (kcal/h)                               |
| PCI            | es el poder calorífico inferior del fuel-oil, es decir 9700 kcal/kg |



$$m_c = \frac{486553,1}{9700} = 50,2 \frac{kg}{h}$$

El caudal másico de fuel-oil consumido en la generación de vapor de calefacción para la operación de extracción es 50,2 kg/h.

- Instalación de fuerza motriz

Todas las masas recibirán una tensión de 380 V trifásica y con una frecuencia de 50 Hz. Además dichas masas estarán conectadas a un neutro y éste a tierra, con lo que se pretende evitar posibles accidentes.

El material empleado en las líneas principales será el cobre. La línea de acometida estará formada por un conductor tetrapolar que también estará aislado mediante polietileno en tubo de PVC e instalado en una zanja de al menos 1,2 m de profundidad junto a la línea de acometida de alumbrado.

El suministro a las diferentes cargas se realizará mediante una serie de líneas que se explicarán más adelante en la Memoria del Proyecto. Los equipos que necesitan energía eléctrica se especifican en la siguiente tabla:

Equipos	kWh	kWh/t In
Molino de bolas	7,3	-
Soplante	1,75	-
Reactor lixiviación	20	-
Filtro de prensa 1	11	-
Tanque de neutralización	10	-
Filtro de prensa 2	2	-
Filtro de hojas	2	-
Celda electroobtención	-	5190
Secador tornillo	-	410
Horno de fusión	-	32
Impulsión fluidos	10	
Total	64,05	5632

Tabla 30: Consumo energético por equipos. Fuente: Elaboración propia.

- Instalación de alumbrado

La acometida de la instalación de alumbrado llega hasta el cuadro general. A partir de éste, las líneas se distribuyen hacia los diferentes cuadros de distribución y, a continuación, se dirigen hacia los diversos puntos de consumo con una tensión de suministro de 380 V entre fases y 220 V entre fase y neutro.

En el interior de las naves de producción y de almacenamiento de chatarra se instalarán lámparas de 500 W de potencia.

En el resto de dependencias se instalarán lámparas fluorescentes de tipo luz de día de 60 W. También se dispondrán los puntos de enchufe necesarios en vestuarios, aseos y oficinas.

 <b>Universidad</b> <b>de Granada</b>  <b>Facultad de</b> <b>Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

Para alumbrado exterior se colocarán lámparas de vapor de sodio de 150 W en el perímetro de la nave de proceso, del edificio de oficinas, almacenes y aparcamientos.

Los conductores de las líneas de alumbrado serán de cobre y la instalación bajo tubo metálico con aislamiento interior de PVC.

La protección contra contactos indirectos se realizará mediante interruptores diferenciales de 30 mA de sensibilidad y la protección contra contactos directos mediante interruptores magnetotérmicos.

Las características principales de la red de alumbrado interior son:

Zona	Nº y tipo de luminarias
Almacén de chatarra	4 lámparas de vapor de sodio de alta presión de 500 W
Nave de producción	10 lámparas de vapor de sodio de alta presión de 500 W
Vestuarios y aseos	4 tubos fluorescentes tipo luz día de 60 W
Sala de control	8 tubos fluorescentes tipo luz día de 60 W
Almacén de reactivos	6 tubos fluorescentes tipo luz día de 60 W
Taller mantenimiento	4 tubos fluorescentes tipo luz día de 60 W
Almacén de producto	4 tubos fluorescentes tipo luz día de 60 W
Embalaje	4 tubos fluorescentes tipo luz día de 60 W
Control de calidad	10 tubos fluorescentes tipo luz día de 60 W
Dirección	6 tubos fluorescentes tipo luz día de 60 W
Secretaría	3 tubos fluorescentes tipo luz día de 60 W
Administración	3 tubos fluorescentes tipo luz día de 60 W
Responsable comercial	3 tubos fluorescentes tipo luz día de 60 W
Recursos humanos	3 tubos fluorescentes tipo luz día de 60 W
Archivo	3 tubos fluorescentes tipo luz día de 60 W
Oficina almacén	3 tubos fluorescentes tipo luz día de 60 W

Tabla 31: Relación de luminarias, alumbrado interior. Fuente: Elaboración propia.

Las características que definen la red de alumbrado exterior son:

Zona exterior	Nº y tipo de lámparas
Nave de producción	4 lámparas de vapor de sodio de alta presión de 150 W
Almacenamiento chatarra	3 lámparas de vapor de sodio de alta presión de 150 W
Almacenamiento reactivos	1 lámparas de vapor de sodio de alta presión de 150 W
Mantenimiento	1 lámparas de vapor de sodio de alta presión de 150 W
Oficinas	2 lámparas de vapor de sodio de alta presión de 150 W
Control de calidad	1 lámparas de vapor de sodio de alta presión de 150 W
Aparcamientos	4 lámparas de vapor de sodio de alta presión de 150 W

Tabla 32: Relación de luminarias, alumbrado exterior. Fuente: Elaboración propia.

La potencia total de alumbrado tanto interior como exterior se estima en 13,24 kW.

#### 2.1.5.3 Diagrama de flujo del proceso

El diagrama de flujo del proceso muestra una vista esquemática de las distintas operaciones de las que consta. Se indican las principales corrientes así como los equipos involucrados.

El **Diagrama de flujo de la alternativa 1** recibe la denominación de **D4**.

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

#### 2.1.5.4 Matriz de actividades

En la matriz de actividades se relacionan las distintas actividades que se van a desarrollar atendiendo a una relación de proximidad. En esta matriz sólo se tendrán en cuenta las actividades principales.

- **PROXIMIDAD:**

- A: Absolutamente necesario.
- E: Especialmente importante.
- I: Importante.
- O: Deseable.
- U: No importante.
- X: Indeseable.

- **JUSTIFICACIÓN:**

- 1: Contacto directo.
- 2: Conveniencia.
- 3: Ruido, molestias.
- 4: Comparte equipo.

La **Matriz de actividades** recibe la denominación D1 y puede encontrarse en el correspondiente cajetín de planos.

#### 2.1.5.5 Diagrama de interrelación de actividades

Este diagrama constituye una representación gráfica de la matriz de actividades.

El **Diagrama de interrelación de actividades** recibe la denominación D2 y puede encontrarse en el correspondiente cajetín de planos.

#### 2.1.5.6 Diagrama de interrelación de espacios

Al igual que en el Diagrama de interrelación de actividades, el **Diagrama de interrelación de espacios** constituye una representación gráfica de la matriz de actividades, pero en este caso, además relaciona las actividades con sus necesidades de espacio. Recibe la denominación de D3.

#### 2.1.5.7 Ubicación de la planta. Planos de localización y emplazamiento.

La planta industrial proyectada se localiza en la calle El Matorral (Parque de Actividades Medioambientales de Andalucía), parcela nº35, Aznalcóllar (Sevilla). Dicha parcela tiene una extensión de 12370 m<sup>2</sup>.

Los planos relativos a la ubicación de la planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantalla de cristal líquido son los siguientes:

- A1. Plano de localización.
- A2. Plano de situación y emplazamiento.

#### 2.1.5.8 Plano de implantación

El **Plano de implantación** recibe la denominación de A3, está realizado a escala 1:200.

Este plano muestra una representación de la planta industrial con sus respectivos equipos de proceso e instalaciones principales, así como también del área social o de oficinas.

Muestra asimismo una relación del espacio ocupado por cada una de las actividades divididas en áreas.

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

## 2.1.6 Estudio económico

A continuación se analizarán los distintos apartados de costes que posteriormente se mencionarán en el estudio económico financiero, a saber: costes de los equipos del proceso, costes de las instalaciones y costes de fabricación.

### 2.1.6.1 Costes de los equipos del proceso

A continuación se muestra la relación de equipos del proceso y sus respectivos costes:

**Equipo: Molino cónico de bolas**

Diámetro: 0,9 m

Longitud: 1,8 m

Material: carcasa de acero recubierto de caucho, bolas de metal.

Capacidad: 0,65-2 t/h

Potencia: 18,5 kW

Precio: 104.409,85 €



*Ilustración 33: Molino cónico de bolas. Fuente: <http://www.molino-industrial.com/molino-industrial/molino-de-bolas.html>*

**Equipo: Filtro de mangas pulse-jet (40 mangas)**

Alto: 3,8 m

Ancho: 0,75 m

Largo: 0,75 m

Material: carcasa de acero AISI 202, mangas de polyester de 16 onzas.



Precio: 23.283,89 €

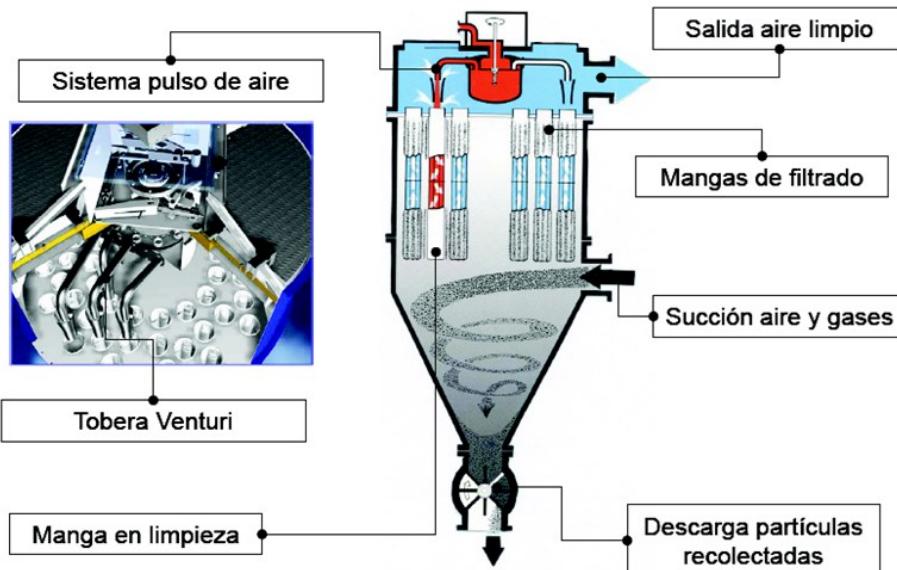


Ilustración 34: Filtro de mangas pulse-jet. Fuente: Desconocida.

Equipo: **Ciclón**

Diámetro: 0,211 m

Altura: 0,847 m

Material de mangas: acero AISI 304.

Precio: 2.124,14 €

Equipo: **Lixiviador encamisado y agitado** (2 unidades)

Diámetro: 4,05 m

Altura: 6,08 m

Material: Acero al carbono recubierto de caucho.

Precio (por las 2 unidades): 165.846,64 €

Equipo: **Filtro de prensa** (40 placas)

Alto: 4,6 m

Ancho: 5 m

Largo: 5,24 m

Material: Estructura acero AISI 316 y placas de polipropileno.

Precio: 252.282,96 €

Equipo: **Neutralizador encamisado y agitado**

Diámetro: 1,77 m

Altura: 2,65 m

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

Material: Acero al carbono recubierto de caucho.

Precio: 61.518,48 €

Equipo: **Filtro de prensa** (7 placas)

Alto: 1,8 m

Ancho: 2 m

Largo: 1,43 m

Material: Estructura acero AISI 316 y placas de polipropileno.

Precio: 19.199,00 €

Equipo: **Tanque de burbujeo**

Diámetro: 1,77 m

Altura: 2,65 m

Material: Acero recubierto de caucho.

Precio: 61.518,48 €

Equipo: **Celda de electroobtención**

Alto: 1 m

Ancho: 1,4 m

Largo: 1 m

Material: Estructura acero AISI 316, cátodo de acero inoxidable y ánodo de grafito

Precio: 92.972,15 €

Equipo: **Horno de crisol fijo**

Alto: 1,4 m

Ancho: 1,2 m

Largo: 1,3 m

Material: Interior en fibra cerámica y ladrillo refractario.

Precio: 7.609,48 €

Equipo: **Tanque de recirculado**

Diámetro: 1,6 m

Longitud: 3,7 m

Material: Acero al carbono recubierto de caucho.

Precio: 12.418,07 €

Equipo: **Tanque de ácido clorhídrico fresco**

Diámetro: 1,6 m

Longitud: 3,7 m



Material: Acero al carbono recubierto de caucho.

Precio: 12.418,07 €

Equipo: **Tanque de mezcla de ácido clorhídrico alimentado**

Diámetro: 1,6 m

Longitud: 3,7 m

Material: Acero al carbono recubierto de caucho.

Precio: 12.418,07 €

Equipo: **Secador de tornillo**

Diámetro: 0,48 m

Longitud: 10 m

Material: Acero inoxidable.

Precio: 3.070,00 €

Equipo: **Filtro vertical de hojas**

Área filtrante: 10 m<sup>2</sup>

Diámetro: 0,75 m

Altura: 1,12 m

Material: Estructura en acero inoxidable.

Precio: 30.000,00 €

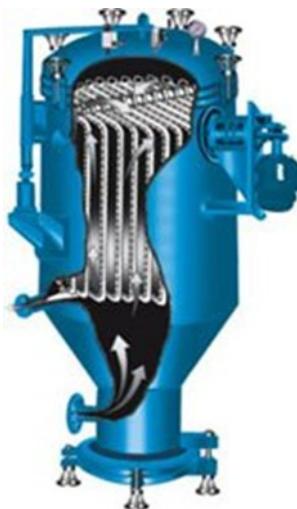


Ilustración 35: Filtro vertical de hojas.

Equipo: **Cinta transportadora**

Longitud: 7 m

Material: Acero al carbono.

Precio: 12.254,67 €

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

**Equipo: Elevador de cangilones centrífugo**

Dimensiones: 0,2 m x 0,13 m

Altura: 20 m

Material: Acero al carbono.

Precio: 15.849,38 €

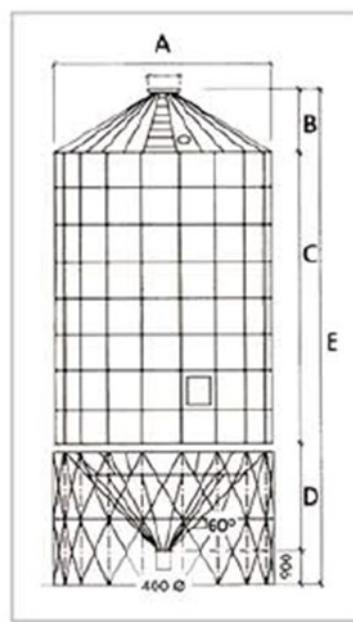
**Equipo: Silo de almacenamiento (2 unidades)**

Capacidad: 275 m<sup>3</sup>.

Dimensiones: 4,6 x 1,26 x 14,86 x 3,705 x 20,725 m (AxBxCxDxE)

Material: Acero recubierto de caucho.

Precio (por las dos unidades): 5.006,44 €



*Ilustración 36. Silo de almacenamiento.*

*Fuente: Desconocida.*

Para un estudio detallado remitirse al apartado técnico. La siguiente tabla resume la relación de equipos fundamentales:

<b>Equipo</b>	<b>Coste unitario</b>	<b>Nº de unidades</b>	<b>Coste Total</b>
Molino cónico de bolas	104.409,85	1	104.409,85
Filtro de mangas	23.283,89	1	23.283,89
Ciclón	2.124,14	1	2.124,14
Lixiviador	82.923,32	2	165.846,64
Filtro de prensa	252.282,96	1	252.282,96
Neutralizador	61.518,48	1	61.518,48

 <b>Universidad de Granada</b> <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

Filtro de prensa	19.199,00	1	19.199,00
Absorbedor H <sub>2</sub> S	61.518,48	1	61.518,48
Celda electroobtención	92.972,15	1	92.972,15
Horno de crisol fijo	7.609,48	1	7.609,48
Tanque de recirculado	12.418,07	1	12.418,07
Tanque de HCl fresco	12.418,07	1	12.418,07
Tanque de HCl alimenta.	12.418,07	1	12.418,07
Secador de tornillo	3.070,00	1	3.070,00
Filtro vertical de hojas	30.000,00	1	30.000,00
Cinta transportadora	12.254,67	1	12.254,67
Elevador cangilones	15.849,38	1	15.849,38
Silo	2.503,22	2	5.006,44
<b>COSTE TOTAL DE LOS EQUIPOS</b>			<b>938.909,76 €</b>

Tabla 33: Relación de equipos fundamentales. Fuente: Elaboración propia.

**El coste total de los equipos asciende a 938.909,76 euros.** El coeficiente de amortización de los equipos es del 8% anual.

#### 2.1.6.2 Costes de las instalaciones

Para el estudio del coste de las instalaciones hacemos uso del método factorial de Peters y Timmerhaus, que parte del valor del equipo instalado y pondera el valor del resto de costes de la instalación por unos factores medios. Este método mantiene la clasificación de Lang de procesos sólidos, líquidos o mixtos y parten del coste del equipo instalado.

De acuerdo con el mencionado método, los siguientes conceptos suponen el 130% del coste total de los equipos principales (para procesos mixtos de sólidos y líquidos):

- Instalación de equipos
- Instalación de tuberías, válvulas y accesorios
- Instrumentación
- Sistema eléctrico
- Edificios del proceso

Según el método de Chilton, la instalación de servicios auxiliares (potencia, vapor y agua) supone el 10% del coste total de los equipos principales.

De este modo el coste total de las instalaciones será:

$$\text{Coste instalaciones} = 1,40 \cdot 938.909,76 € = 1.314.473,66 €$$

**El coste total de las instalaciones asciende a 1.314.473,66 euros.** El coeficiente de amortización de las instalaciones es del 10% anual.

#### 2.1.6.3 Costes de fabricación

- Costes de personal

Se calculan para un período de trabajo de un año. Se tendrá en cuenta que la planta trabaja en tres turnos diarios de lunes a viernes, y con solo dos turnos al día en sábado y domingo.

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

Incluyen Seguridad Social y cargas sociales. Se consideran los siguientes costes unitarios por trabajador:

Cargo	Sueldo Base	Nº Trabaj.	Coste Total €/año
Técnicos			
Dir. general	4.000	1	56.000
Ing. proceso	3.500	1	49.000
Químico	3.500	1	49.000
Respons. seguridad	3.500	1	49.000
Personal administrativo			
Respons. ventas	2.000	1	28.000
Contable	2.000	1	28.000
Secretario	2.000	1	28.000
Respons. RRHH	2.000	1	28.000
Especialistas			
Técn. laboratorio	1.800	1	30.800
Electricista	1.800	4	100.800
Fontanero	1.800	4	100.800
Soldador	1.800	4	100.800
Técnico de control	1.800	5	126.000
Personal suministro	1.800	5	126.000
Operarios			
Operario	1.000	25	350.000
Personal de servicios			
Limpieza	1.000	4	56.000
Otras actividades			
Mantenimiento	2.000	2	56.000
Logística	2.000	1	28.000
<b>COSTE TOTAL DE PERSONAL</b>	<b>63</b>	<b>1.390.200</b>	

Tabla 34: Costes de personal. Fuente: Elaboración propia.

### El coste de personal asciende a 1.390.200 €/año.

- Costes energéticos
  - Coste de combustible

La calefacción de los lixiviadores requiere el consumo de fueloil como combustible. En este caso el caudal másico de este combustible fue calculado previamente en el apartado de instalaciones. Su valor es 50,2 kg/h.

$$50,2 \frac{kg}{h} \cdot \frac{1}{945} \frac{m^3}{kg} \cdot 24 \frac{h}{dia} \cdot 330 \frac{dia}{año} \cdot 585,33 \frac{\epsilon}{m^3} = 246.262,27 \frac{\epsilon}{año}$$

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

- Coste de electricidad

El coste de la electricidad se divide a su vez en dos apartados. Por un lado, la energía eléctrica necesaria para los equipos del proceso.

<b>Equipos</b>	<b>Potencia (kW)</b>	<b>Consumo (kWh)</b>
Molino de bolas	7,3	57816
Soplante	1,75	13860
Lixiviador (agitación)	20	158400
Filtro de prensa 1	11	-
Neutralizador	10	900
Filtro de prensa 2	2	-
Filtro de hojas	2	-
Celda electroobtención	5190	53457
Secador tornillo	410	4223
Horno de fusión	32	329.6
Impulsión fluidos (bombas)	10	-
<b>Total (kWh/año)</b>		288986

Tabla 35: Relación de equipos y consumo energético. Fuente: Elaboración propia.

Para los filtros y las bombas del proceso se considerará un coeficiente de simultaneidad de 0,8:

$$\text{Consumo} = 25 \text{ kW} \cdot 0,8 \cdot 7920 \frac{\text{h}}{\text{año}} = 158400 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

El consumo energético de los equipos de proceso será por tanto:

$$\text{Coste} = 288986 + 158400 = 447386 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \cdot 0,17 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 76.055,62 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

La energía eléctrica que se precisa para el alumbrado. Se ha estimado en 13,24 kW y tiene un coeficiente de simultaneidad de 0,7:

$$P = 13,24 \text{ kW} \cdot 0,7 = 9,27 \text{ kW}$$

$$\text{Coste} = 9,27 \text{ kW} \cdot 7920 \frac{\text{h}}{\text{año}} \cdot 0,17 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 12.478,44 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

• Costes de materias primas

Se considerarán en este apartado el consumo de agua, tanto industrial como potable; el consumo de chatarra de pantalla de cristal líquido y por último el resto de reactivos principales, a saber: hidróxido sódico en forma granular, sulfuro de hidrógeno (suministrado en forma de botellas de gas licuado), y ácido clorhídrico diluido 6M.

- Coste del agua

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

El agua tiene muchas aplicaciones además de su uso en el proceso. En cuanto al agua precisa para saneamiento, se encuentra la de los aseos y la utilizada en tareas de limpieza. A continuación una tabla con los gastos previstos:

Aparato Sanitario	Caudal inst. min. (dm <sup>3</sup> /s)	Nº unidades	Caudal inst. min. total (dm <sup>3</sup> /s)
Grifo de laboratorio	0,20	2	0,40
Lavabo	0,10	3	0,30
Inodoro con cisterna	0,10	3	0,30
Ducha	0,20	2	0,40
Limpieza	0,28	1	0,28
Total			<b>1,68</b>

Tabla 36: Consumo de agua de saneamiento. Fuente: Elaboración propia.

Como resultado, el coste del agua del saneamiento es:

$$6,05 \frac{t}{h} \cdot 24 \frac{h}{dia} \cdot 330 \frac{dia}{año} \cdot 0,63 \frac{\epsilon}{t} = 30.177,10 \frac{\epsilon}{año}$$

Los requerimientos de agua en cuanto al proceso incluyen el consumo de agua para el lavado de la torta en el filtro de prensa, el vapor de agua para la calefacción en los extractores, el agua de refrigeración para el neutralizador y el agua utilizada en la reposición del electrolito perdido por evaporación en la celda de electroobtención.

Equipo de proceso	Consumo
Lavado de filtros	0,29 m <sup>3</sup> /h
Calefacción en el extractor (vapor)	12 t/año
Reactor de neutralización*	178 t/año
Celda de electroobtención	0,0024 m <sup>3</sup> /h

Tabla 37: Consumo de agua por equipos proceso. Fuente: Elaboración propia.

Siendo el coste del agua de proceso, la suma de los siguientes conceptos:

Para el lavado de los filtros y la alimentación a la celda de electroobtención:

$$0,2924 \frac{m^3}{h} \cdot 24 \frac{h}{dia} \cdot 330 \frac{dia}{año} \cdot 1,09 \frac{\epsilon}{t} = 2.524,23 \frac{\epsilon}{año}$$

Para la calefacción en el extractor y la refrigeración en el reactor de neutralización:

$$190 \frac{t}{año} \cdot 1,09 \frac{\epsilon}{t} = 207,1 \frac{\epsilon}{año}$$

Siendo el coste total del agua:

$$30.177,10 \frac{\epsilon}{año} + 2.524,23 \frac{\epsilon}{año} + 207,1 \frac{\epsilon}{año} = 32.908,43 \frac{\epsilon}{año}$$

- Coste de la chatarra de pantalla de cristal líquido

 <b>Universidad de Granada</b> <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

El proceso consume 35 t/día de chatarra de cristal líquido durante su funcionamiento de 330 días al año. **El coste unitario por tonelada de la chatarra es de 50 euros.**

$$35 \frac{t}{dia} \cdot 330 \frac{dias}{año} \cdot 50 \frac{\€}{t} = 577.500 \€$$

#### - Coste de reactivos

Los reactivos principales empleados en el proceso son: hidróxido sódico en forma granular, sulfuro de hidrógeno (suministrado en forma de botellas de gas licuado), y ácido clorhídrico en concentración 6M.

Reactivo	Coste unit., €/t	Consumo, t	Coste total, €/año
NaOH sólido	285,64	43,5	12.425,34
H <sub>2</sub> S licuado	408,84	0,1508	61,65
HCl 6M	76,05	230,99	17.566,79
Coste FOB			30.053,78
Coste total (1,05 • Coste FOB)			31.556,47

Tabla 38: Consumo de reactivos. Fuente: Elaboración propia.

**El coste total de los reactivos empleados en el proceso es 31.556,47 €/año.**

#### 2.1.6.4 Ventas

Corresponden a las de indio. No se tiene en cuenta la forma de pago, es decir, se considera como si fuesen al contado. El precio de venta del producto será de 500.000 € por tonelada.

$$Ventas = 10,3 \frac{t}{In} \cdot 500.000 \frac{\€}{t In} = 5.150.000 \€$$

Las ventas ascienden a 5.150.000 €.

### 2.1.7 Estudio económico-financiero

#### 2.1.7.1 Introducción

Como se ha descrito con anterioridad, el objeto de este Proyecto es la implantación de una planta de recuperación de indio procedente del reciclado de chatarra de pantallas de cristal líquido (LCD). Se ha previsto un incremento significativo de la demanda de este producto en los años venideros, especialmente en zonas de proximidad a industrias relacionadas con la fabricación de aparatos electrónicos.

La planta se localiza en el término municipal de Aznalcollar, de la provincia de Sevilla, debido a su proximidad la industria de recuperación y tratamiento de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), además de otras industrias relacionados con el sector medioambiental.

La producción anual programada para esta industria se ha fijado en 10,3 t de metal indio de 99,999% de pureza, dicha estimación se fundamenta en la previsión de materia prima recuperada y tratada en gran parte del territorio peninsular. El precio de venta del producto será de 500.000 € por tonelada.

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

La planta ha sido diseñada en una línea de tratamiento de chatarra, consistente principalmente en cuatro etapas divididas en áreas, a saber: reducción de tamaño, lixiviación, purificación y obtención, fusión y moldeo.

A continuación se presenta la evaluación económica financiera de la inversión necesaria para la ejecución y explotación del proyecto.

#### 2.1.7.2 Estimación de la inversión

##### 2.1.7.2.1 Capital fijo

Mediante el cálculo del capital fijo se pretende conocer el coste total de implantación. Distinguiremos entre material e inmaterial, pues será de utilidad a la hora de realizar balances de situación, entre otros aspectos. El capital fijo se desglosa en los siguientes conceptos:

###### a) Material

- Terrenos

La planta está ubicada en el término municipal de Aznalcollar, en la provincia de Sevilla, concretamente en el Parque de Actividades Medioambientales de Andalucía.

La parcela donde se ubicará la planta presenta una superficie de 12370 m<sup>2</sup>. El precio del terreno es de 40 €/m<sup>2</sup> por lo que el coste total de este concepto será:

$$12.370 \text{ m}^2 \cdot 40 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} = 494.800 \text{ €}$$

**El coste total del terreno asciende a 494.800 euros.** No es susceptible a amortización.

- Obra civil

Para un análisis más exhaustivo, se dividirá este concepto en subapartados que reflejarán distintas áreas de la parcela.

###### Oficinas y laboratorio de control de calidad:

$$136 \text{ m}^2 \cdot 754 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} = 102.544 \text{ €}$$

###### Nave de proceso y control de producción:

$$849 \text{ m}^2 \cdot 335 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} = 284.415 \text{ €}$$

###### Muelle de carga y descarga, parking y exteriores:

$$8599 \text{ m}^2 \cdot 20 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} = 171.980 \text{ €}$$

###### Jardinería:

$$2608 \text{ m}^2 \cdot 50 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} = 130.400 \text{ €}$$

###### Nave de almacenamiento de reactivos:

$$46 \text{ m}^2 \cdot 335 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} = 15.410 \text{ €}$$

###### Embalaje y nave de almacenamiento de producto:

$$40 \text{ m}^2 \cdot 335 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} = 13.400 \text{ €}$$

###### Mantenimiento y limpieza:



$$20 \text{ m}^2 \cdot 335 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} = 6.700 \text{ €}$$

**Infraestructura:**

Se estima en 120.000 €. Abarca los conceptos de albañilería, electricistas, fontanería y técnicos especialistas.

**El coste total de obra civil asciende a 844.849 euros.**

- Equipos

Este concepto se ha discutido en el *apartado 2.1.6.1, Costes de los equipos del proceso*. Basta con referirnos a su valor, que **asciende a 938.909,76 euros**.

- Instalaciones

El *apartado 2.1.6.2, Costes de las instalaciones*, hace referencia a este concepto. **El coste de las instalaciones asciende a 1.314.473,66 euros**.

b) Inmaterial

- Estudios previos, proyecto y dirección de obra

Bajo este concepto se engloban: el proyecto en sí, lo concerniente a la elección del director de obra y sus emolumentos, y los estudios de utilidad.

Podemos estimar el coste de este concepto como un porcentaje sobre el capital fijo, concretamente la experiencia lo sitúa alrededor de un 4% del capital fijo.

- Puesta en marcha

Este concepto hace referencia a la serie de tareas que se han de realizar antes de poner en funcionamiento la planta. Estas acciones incluirán ensayos con la planta en funcionamiento, informes de procesos, intereses de préstamos antes de comenzar la actividad, imprevistos, etc.

Podemos estimar el coste de la puesta en marcha como un porcentaje del capital fijo, en particular un 5%.

- Constitución, organización y gestión

Este concepto se corresponde con la adquisición de una serie de medidas legales necesarias para la puesta en funcionamiento de la planta. Se incluyen las tasas de inscripción en el Registro Mercantil, el Impuesto sobre Transmisiones Patrimoniales, las Escrituras y la Licencia de Apertura y de Obras.

**El coste de este concepto ascenderá a los 600.000 euros.**

A continuación se procede a la determinación del capital fijo mediante la siguiente expresión:

Se calcula el capital fijo mediante la siguiente expresión:

$$C.F. = 494.800 + 844.849 + 1.314.473,66 + 938.909,76 + 600.000 + 0,09 \cdot C.F.$$

**El capital fijo es 4.607.727,94 euros.**

La siguiente tabla resume los conceptos anteriormente mencionados:

Material	Valor (euros)
Terrenos	494.800

 <b>Universidad de Granada</b> <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

Obra civil	844.849
Instalaciones	1.314.473,66
Equipos	938.909,76
Inmaterial	Valor (euros)
Estudios, Proyecto y Dirección de obra	0.04·CF = 184.309,12
Puesta en marcha	0.05·CF = 230.386,40
Constitución, organización y gestión	600.000
Capital Fijo	4.607.727,94

Tabla 39: Capital fijo. Fuente: Elaboración propia.

### 2.1.7.2.2 Financiación del Capital fijo

Para la financiación del capital fijo se recurre a tres fuentes: aportación propia del promotor, subvenciones y el mercado financiero. A continuación se analiza cada una de las fuentes.

a) Aportación propia

Se establece al menos un tercio parte del capital fijo como aportación propia:

$$4.607.727,93 \text{ €} \cdot \frac{1}{3} = 1.535.909,31 \text{ €}$$

**La aportación propia asciende a 1.535.909,31 euros.**

b) Subvención

Todo el territorio de la Comunidad Autónoma de Andalucía está considerado como zona de Promoción Económica de Tipo I. Esto quiere decir que:

- A este tipo de zona le corresponden las máximas ayudas permitidas por la Unión Europea.
- Concesión de subvenciones hasta un máximo del 30% (2011-2013) de la inversión aprobada.
- Los proyectos ubicados en los municipios que son los señalados en el Real Decreto 162/2008, de 8 de febrero, por el que se delimita la zona de promoción económica de Andalucía serán considerados prioritarios.

Por tanto, el total del montante corresponde a un 30% del capital fijo.

$$4.607.727,93 \text{ €} \cdot 0,3 = 1.382.318,38 \text{ €}$$

**La subvención asciende a 1.382.318,38 euros.**

c) Mercado financiero

Como última opción se recurre al mercado financiero para terminar de financiar el capital fijo. Consiste en un préstamo a pagar a largo plazo.

El resto del capital fijo se cubre con un crédito a largo plazo que tiene una duración de 10 años. Las condiciones son las siguientes:

- Cuantía: 1.689.500,24
- Devolución: 10 años
- Carencia: 2 años
- Interés: 6%

 <b>Universidad</b> <b>de Granada</b>  <b>Facultad de</b> <b>Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

- Comisión de apertura: 1% del valor del crédito

A continuación se muestra el *Cuadro de Financiación a largo plazo*.

Devolución	10	años
Carencia	2	años
Interés	6%	
Comisión apertura	1%	de la cuantía
Cuantía	1.689.500,24	euros

#### 2.1.7.3 Capital circulante

Al activo circulante pertenecen todos aquellos elementos del activo que normalmente van a permanecer en la empresa un período corto de tiempo y que presentan una gran movilidad.

Comprende los siguientes términos ordenados de menor a mayor liquidez:

a) Activo circulante:

- Existencias de materias primas

Debido a que la empresa suministradora de materia prima (en este caso chatarra de pantalla de cristal líquido) se encuentra en la misma área industrial se almacenará la materia prima requerida para tan solo 14 días de funcionamiento.

$$35 \frac{t}{dia} \cdot 14 \text{ días} \cdot 50 \frac{\text{€}}{t} = 24.500 \text{ €}$$

- Existencias de productos terminados

La cantidad de producto no vendida se ha estimado en un 3% de la producción.

$$Exist. PT = (C. Fabrica. + C. Estruct. + G. Financ) \cdot \frac{3}{100}$$

$$Exist. PT = (2.708.784,89 + 257.741,84 + G. Financ) \cdot \frac{3}{100}$$

Los gastos financieros corresponden a los intereses que genera el préstamo a corto plazo, es decir el 8% de su cuantía. Se determinará al final del apartado.

- Clientes

Este concepto corresponde a lo que deben los clientes, cobrándose con efectos a los 30 días. Su cálculo precisa el conocimiento de las ventas totales, concepto que fue abordado anteriormente en el *apartado 2.1.6.4, Ventas*.

$$5.150.000 \cdot \frac{1}{12} = 429.166,67 \text{ €}$$

- Tesorería

Representa la cantidad mínima de la que se desea disponer en caja y se calcula como un 2% del capital fijo. Ver *Plan de tesorería*.

$$4.607.727,94 \text{ €} \cdot \frac{2}{100} = 92.154,56 \text{ €}$$

b) Pasivo circulante:

- Proveedores

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

Se contempla lo que se debe a proveedores por el concepto de la compra de materias primas. Se establece un pago a 30 días.

Cada año la compra de materias primas es:

$$35 \frac{t}{dia} \cdot 330 \text{ días} \cdot 50 \frac{\text{€}}{t} = 577.500 \text{ €}$$

Sería la cantidad correspondiente a un mes:

$$\frac{577.500}{12} = 48.125 \text{ €}$$

Por lo tanto, **la cantidad que se debe a proveedores asciende a 48.125 euros.**

El capital circulante se calcula como la diferencia entre el activo circulante y el pasivo circulante.

$$C.C. = 92.154,56 + 429.166,67 + 24.500 + (2.708.784,89 + 257.741,84 + 0,08 \cdot C.C.) \cdot \frac{3}{100} - 48.125$$

<b>ACTIVO CIRCULANTE</b>	
Tesorería	92.154,56 €
Clientes	429.166,67 €
Existencias Materia prima	24.500,00 €
Existencias Producto terminado	90.407,25 €
<b>PASIVO CIRCULANTE</b>	
Proveedores	48.125 €
<b>CAPITAL CIRCULANTE</b>	
	588.103,48 €

Tabla 40: Capital circulante. Fuente: Elaboración propia.

#### 2.1.7.4 Financiación del Capital circulante

Se recurrirá a un crédito a devolver a corto plazo. Su importe será por todo el Capital circulante, y el período de devolución 1 año.

- Cuantía: 588.103,48 €
- Devolución: 1 años
- Interés: 8%

A continuación se muestra el *Cuadro financiación del préstamo corto plazo.*

Devolución	1	año
Interés	8%	
Cuantía	588103,48	euros
<b>Gasto financiero c/p</b>	47048,2784	euros
Cuota	588103,48	euros
Pendiente devolver	0	euros

#### 2.1.7.5 Gastos financieros

Corresponden a los intereses y a las comisiones a pagar por los créditos, tanto a largo como a corto plazo. Ver *Cuenta de Resultados.*

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

#### 2.1.7.6 Costes de estructura

Reciben este nombre genérico una serie de conceptos de ámbito distinto a la producción o fabricación en sí, pero que repercuten tanto en los costes como en el funcionamiento global de la planta. Se consideran:

- a) Suministros de material variado, tales como vestuario, equipos de protección, mangueras, etc. Se estima el gasto en un 1% del capital fijo.

**Este concepto asciende a 46.077,28 €/año.**

- b) Transporte y distribución, dada la naturaleza del producto y la ubicación de la planta, se estima en un 2% del capital fijo.

**Este concepto asciende a 92.154,56 €/año.**

- c) Seguridad, esta función corre por cuenta de una empresa ajena.

**Se fija en 50.000 €/año.**

- d) Personal ajeno a la fabricación, no interviene en la producción ni forma parte de la plantilla de empleados en nómina, pero se requiere sus servicios. Supondrá un 5% del coste de personal.

**Este concepto asciende a 69.510,00 €/año.**

Atendiendo a estos conceptos **los costes de estructura ascienden a 257.741,84 €/año.**

A continuación se muestra el *Cuadro de Costes de Estructura*.

COSTES DE ESTRUCTURA	<b>257.741,84</b>	euros
Suministro y Material variado	46.077,28	euros
Tte y distribución	92.154,56	euros
Seguridad	50.000,00	euros
Personal ajeno fabricación	69.510,00	euros

#### 2.1.7.7 Costes de producción

Se compone de tres conceptos: costes de fabricación (que incluyen gastos de fabricación, mano de obra, amortización y consumo de materias primas), costes de estructura y gastos financieros.

De los anteriores, excepto la amortización, todos han sido tratados. Así pues, a continuación, nos referimos a la amortización.

La amortización no supone un gasto real, sino lo que se devalúa el producto de carácter material, ya sea equipo, obra civil o instalación. Por lo tanto, da una idea de lo que conviene tener en el capital circulante para responder cuando ese material se deteriore y requiera un recambio, o bien el inmaterial se devalúe. Se considerará una tasa de amortización constante año a año. Estos valores serán un porcentaje sobre el valor total del concepto.

- Obra civil: 4%
- Equipos: 8%
- Instalaciones: 10%
- Inmaterial: 10%

Ver *Cuadro de Amortizaciones*.

AÑO		
Obra civil	844.849,00	4%
Equipos	938.909,76	8%

 <b>Universidad de Granada</b> <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

Instalaciones	1.314.473,66	10%
Inmaterial	1.014.695,51	10%

El montante total de la **amortización** es de **341.823,66 €/año**.

Los **costes de producción** por tanto ascienden a **2.708.784,89 €/año**.

A continuación se muestra el *Cuadro de Costes de Producción* y el *Cuadro de Materias auxiliares y energía*.

COSTES DE PRODUCCIÓN	<b>2.708.784,89</b>	euros
Materias primas (chatarra LCD)	577.500,00	euros
Materias auxiliares y energía	399.261,23	euros
Mano de obra	1.390.200,00	euros
Amortizaciones	341.823,66	euros

<b>MATERIAS AUXILIARES Y ENERGÍA</b>		
Fuel-oil	246.262,27	euros
Fuerza	76.055,62	euros
Iluminación	12.478,44	euros
Agua potable	30.177,10	euros
Agua industrial	2.524,23	euros
Vapor	207,10	euros
Reactivos	31.556,47	euros
Total	399.261,23	euros

## 2.1.8 Cuenta de resultados

Se trata de un estudio de los ingresos y gastos que sirve para la obtención de estos previsibles en el horizonte de la planificación año por año. Determina el resultado que se prevé que va a tener la sociedad, sea beneficio o pérdida.

Se analizan cada uno de los conceptos de interés, dividiendo el análisis en los distintos apartados de que consta la cuenta de resultados: ingresos, gastos, margen de ventas, resultado operativo, resultado antes de impuestos, beneficio disponible y fondo de beneficio.

### 2.1.8.1 Ingresos

- a) **Ventas:** corresponden a las de indio. No se tiene en cuenta la forma de pago, es decir, se considera como si fuese al contado. Ver *apartado 2.1.6.4, Ventas*.

Se tendrá en cuenta que el primer año una parte de la producción se destina a almacenamiento como stock de producto terminado.

- b) **Variación de existencias de materia prima** (chatarra de cristal líquido): Asciende a 24.500,00 € el primer año. Para el resto de años no existe variación.
- c) **Variación de existencias de producto terminado** (indio metálico): Asciende a 90.407,25 € el primer año, permaneciendo el resto de años sin variación.

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

#### 2.1.8.2 Gastos

- a) **Consumo de materias primas:** Este concepto se refiere a al consumo de chatarra de pantalla de cristal líquido anual para el proceso. Asciende a 577.500 euros.  
Ver *apartado 2.1.6.3, Costes de fabricación.*
- b) **Materias auxiliares y energía:** comprenden los gastos en agua, reactivos, energía y vapor. **Asciende a 399.261,23 euros.**  
Ver *apartado 2.1.6.3, Costes de fabricación y el Cuadro de Materias auxiliares y Energía.*
- c) **Mano de obra:** Asciende a **1.390.200 euros.**  
Ver *apartado 2.1.6.3, Costes de fabricación y Tabla 34, Costes de Personal.*
- d) **Variación de existencias de producto terminado:** Igual que en el apartado anterior de ingresos. **Asciende a 24.500,00 euros.**

Los gastos descritos están sujetos a una actualización anual del 3%.

#### 2.1.8.3 Margen de ventas

Es la diferencia entre los ingresos y los gastos. **Asciende a 2.718.946,02 euros** para el primer año.

#### 2.1.8.4 Resultado operativo

- a) Costes de comercialización: son los correspondientes a aspectos como descuentos, publicidad y seguros. Se estima en un 3% de las ventas.
- b) Costes de estructura: ver *apartado 2.1.7.6, Costes de estructura.*
- c) Amortización: ver *apartado 2.1.7.7, Costes de producción.*

El **Resultado operativo** es el margen de ventas restando los conceptos de amortización, costes de comercialización y costes de estructura. **Asciende a 1.969.515,53 euros** para el primer año.

#### 2.1.8.5 Resultado antes de impuestos

Es el **Resultado operativo** restando los Gastos financieros. Ver *apartado 2.1.7.5, Gastos financieros.*

**Asciende a 1.804.202,23 euros** para el primer año.

#### 2.1.8.6 Beneficio disponible

Es el beneficio anual, calculado como la diferencia entre el **Resultado Antes de Impuestos** y los Impuestos. Por Impuestos nos referimos al **Impuesto de Actividades Económicas**, son el 35% del **Resultado Antes de Impuestos**.

Para el primer año **asciende a 1.172.731,45 euros.**

#### 2.1.8.7 Fondo de beneficio

Supone el **Beneficio disponible** acumulado a lo largo de los años.

Ver *Cuenta de Resultados.*



**CUENTA DE RESULTADOS**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>INGRESOS(+)</b>	4.995.500,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00
Ventas	4.995.500,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00
Variación existencias MP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Variación existencias PT	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>GASTOS(-)</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Consumo MP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Materias auxiliares	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mano de obra	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Variación existencias MP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>MARGEN DE VENTAS</b>	4.995.500,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00
Amortización	-341.823,66	-341.823,66	-341.823,66	-341.823,66	-341.823,66	-341.823,66	-341.823,66	-341.823,66	-341.823,66	-341.823,66
Costes comercialización	-149.865,00	-154.500,00	-154.500,00	-154.500,00	-154.500,00	-154.500,00	-154.500,00	-154.500,00	-154.500,00	-154.500,00
Costes de estructura	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>RESULTADO OPERATIVO</b>	4.503.811,34	4.653.676,34	4.653.676,34	4.653.676,34	4.653.676,34	4.653.676,34	4.653.676,34	4.653.676,34	4.653.676,34	4.653.676,34
Gasto financiero LP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gasto financiero CP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>RESULTADO ANTES IMPUESTOS</b>	4.503.811,34	4.653.676,34	4.653.676,34	4.653.676,34	4.653.676,34	4.653.676,34	4.653.676,34	4.653.676,34	4.653.676,34	4.653.676,34
Impuestos	-1.576.333,97	-1.628.786,72	-1.628.786,72	-1.628.786,72	-1.628.786,72	-1.628.786,72	-1.628.786,72	-1.628.786,72	-1.628.786,72	-1.628.786,72
Beneficio disponible	2.927.477,37	3.024.889,52	3.024.889,52	3.024.889,52	3.024.889,52	3.024.889,52	3.024.889,52	3.024.889,52	3.024.889,52	3.024.889,52
Fondo de beneficio	2.927.477,37	5.952.366,99	8.977.256,52	12.002.146,24	15.027.035,86	18.051.925,48	21.076.815,10	24.101.704,72	27.126.594,35	30.151.483,97

 <b>Universidad de Granada</b> <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

## 2.1.9 Plan de tesorería

En el Plan de Tesorería se incluye el AÑO 0 como el momento en que se realizan las inversiones sin que haya comenzado la actividad.

Está compuesto por los siguientes conceptos:

### 2.1.9.1 Cobros

- a) **Ventas:** Suponen el cobro a clientes por el indio comercializado. En el año 0 no hay actividad y por tanto el resultado es 0 €.
- b) **Clientes:** Este concepto corresponde a lo que deben los clientes, cobrándose con efectos a los 30 días. Ver *apartado 2.1.7.3, Capital circulante*.  
Se resta al concepto anterior de **Ventas** pues es dinero que se deja de cobrar. Solo existe para el primer año pues para los siguientes el dinero a deber por los clientes es el mismo y por tanto la diferencia es nula.
- c) **Aportación propia:** Ver *apartado 2.1.7.2.2, Financiación del Capital fijo*. Únicamente se contabiliza el año 0.
- d) **Subvención:** Ver *apartado 2.1.7.2.2, Financiación del Capital fijo*. Únicamente se contabiliza el año 0.
- e) **Exigible a largo plazo:** Corresponde a lo que se tiene que devolver del préstamo a largo plazo cada año, y se deduce de los préstamos en el *Plan Financiero*. Ver *apartado 2.1.7.2.2, Financiación del Capital fijo*. Únicamente se contabiliza el año 0.
- f) **Exigible a corto plazo:** Igual que en el caso anterior para el préstamo a corto plazo. Ver *apartado 2.1.7.4, Financiación del Capital circulante*. Únicamente se contabiliza el año 0.

### 2.1.9.2 Pagos

- a) **Inmovilizado:** Corresponde al **Capital fijo** y sólo se contabiliza para el año 0.
- b) **Materias auxiliares y energía:** Ver *Cuenta de Resultados*.
- c) **Consumo de materia prima:** Ver *Cuenta de Resultados*.
- d) **Proveedores de materia prima:** Ver *apartado 2.1.7.3, Capital circulante*.
- e) **Gastos financieros y cuota de préstamo a largo plazo:** Ver *apartado 2.1.7.2.2, Financiación del Capital fijo*.
- f) **Gastos financieros y cuota de préstamo a corto plazo:** Ver *apartado 2.1.7.4, Financiación del Capital circulante*.
- g) **Mano de obra:** Ver *Cuenta de Resultados*.
- h) **Costes de estructura:** Ver *Cuenta de Resultados*.
- i) **Variación de existencias:** Corresponde a la Variación de existencias de materia prima. Ver *Cuenta de Resultados*.
- j) **Costes de comercialización:** Ver *Cuenta de Resultados*.
- k) **Impuestos:** Son los correspondientes a la *Cuenta de Resultados* del año anterior.

### 2.1.9.3 Caja inicial.

Corresponde a la **Caja final** del año anterior.

### 2.1.9.4 Caja periodo

Es la diferencia entre los cobros y los pagos. En el año 0 coincide con el **Capital Circulante**.



#### 2.1.9.5 Caja final

Es la diferencia entre la **Caja inicial** y la **Caja periodo**.



**TESORERÍA**

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ventas	0,00	4.995.500,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00
Cuentas (-)		-429.166,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Aportación propia	1.535.909,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Subvención	1.382.318,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Exigible a /p	1.689.500,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Exigible a/c/p	588.103,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>TOtal INGRESOS</b>	<b>5.195.831,42</b>	<b>4.566.333,33</b>	<b>5.150.000,00</b>								
Inmovilizado	-4.607.727,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Materias auxiliares	0,00	-399.261,23	-411.239,07	-423.576,24	-436.283,53	-449.372,03	-462.853,19	-476.738,79	-491.040,95	-505.772,18	-520.545,35
Consumo Materia Prima	0,00	-577.500,00	-594.825,00	-612.669,75	-631.049,84	-649.981,34	-669.565,20	-689.565,20	-710.232,16	-731.559,72	-753.506,51
Proveedores MP {+}	0,00	48.125,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gastos financieros /p	0,00	-118.265,02	-101.370,01	-88.698,76	-76.027,51	-63.356,26	-50.685,01	-38.013,76	-25.342,50	-12.671,25	0,00
Cuota préstamo /p	0,00	0,00	0,00	-211.187,53	-211.187,53	-211.187,53	-211.187,53	-211.187,53	-211.187,53	-211.187,53	-211.187,53
Gastos financieros c/p	0,00	-47.048,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cuota préstamo c/p	0,00	-588.103,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mano de obra	0,00	-1.390.200,00	-1.431.906,00	-1.474.863,18	-1.519.109,08	-1.564.682,35	-1.611.622,82	-1.659.971,50	-1.709.770,65	-1.761.063,77	-1.813.895,68
Costes de estructura	0,00	-257.741,84	-265.474,09	-273.438,32	-281.641,47	-290.090,71	-298.793,43	-307.757,23	-316.989,95	-326.499,65	-336.294,64
Variación de existencias	0,00	-24.500,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Costes de comercializ.	0,00	-149.865,00	-154.500,00	-154.500,00	-154.500,00	-154.500,00	-154.500,00	-154.500,00	-154.500,00	-154.500,00	-154.500,00
Impuestos	0,00	0,00	-631.470,78	-647.101,76	-623.150,53	-598.347,72	-572.567,78	-546.084,39	-518.570,45	-490.098,04	-460.638,42
<b>TOTAL PAGOS</b>	<b>-4.607.727,94</b>	<b>-3.504.359,85</b>	<b>-3.590.784,96</b>	<b>-3.886.035,54</b>	<b>-3.932.949,49</b>	<b>-3.981.517,94</b>	<b>-4.031.790,54</b>	<b>-4.083.818,40</b>	<b>-4.137.654,19</b>	<b>-4.193.352,15</b>	<b>-4.250.958,13</b>
CAJA PERÍODO	588.103,48	1.061.973,49	1.559.215,04	1.263.964,46	1.217.050,51	1.168.482,06	1.118.209,46	1.066.181,60	1.012.345,81	956.647,85	899.031,87
CAJA INICIAL	0,00	588.103,48	1.650.076,97	3.209.292,01	4.473.256,47	5.690.306,99	5.690.306,99	6.858.789,05	7.976.998,51	9.043.180,11	10.055.525,91
CAJA FINAL	588.103,48	1.650.076,97	3.209.292,01	4.473.256,47	5.690.306,99	6.858.789,05	7.976.998,51	9.043.180,11	10.055.525,91	11.012.173,76	11.911.205,63

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

## 2.1.10 Balance

### 2.1.10.1 Activo

- a) **Inmovilizado:** es el Capital Fijo, dividido en Material (Terrenos, Obra Civil, Maquinaria e Instalaciones), Inmaterial (Estudios previos y Puesta en marcha), y Ficticio (Constitución). No varía a lo largo de los años.  
Ver *Plan de tesorería*.
- b) **Fondo de amortización:** es la suma de las amortizaciones de cada año y el anterior. Por tanto es la amortización acumulada. Resta en el Activo.
- c) **Clientes:** lo constituye el saldo final de clientes. Ver *apartado 2.1.7.3, Capital circulante*.
- d) **Existencias de materia prima y de producto terminado.**
- e) **Tesorería:** corresponde a la **Caja final** del *Plan de Tesorería*.

### 2.1.10.2 Pasivo

- a) **Aportación propia:** Ver *Plan de Tesorería*.
- b) **Subvención:** Ver *Plan de Tesorería*.
- c) **Fondo de beneficio:** Ver *Cuenta de Resultados*.
- d) **Proveedores de materia prima:** Ver *Plan de Tesorería*.
- e) **Exigible a largo plazo:** Es lo que queda por devolver del préstamo a largo plazo cada año. Ver *apartado 2.1.7.2.2, Financiación del Capital fijo*.
- f) **Exigible a corto plazo:** Es lo que queda por devolver del préstamo a corto plazo cada año. Como se devuelve el primer año únicamente está presente en el año 0. Ver *apartado 2.1.7.4, Financiación del Capital circulante*.
- g) **Impuestos:** Ver *Cuenta de Resultados*.



	BALANCE										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Immobilizado</b>	4.607.727,94	4.607.727,94	4.607.727,94	4.607.727,94	4.607.727,94	4.607.727,94	4.607.727,94	4.607.727,94	4.607.727,94	4.607.727,94	4.607.727,94
<b>Fondo de amortización (-)</b>	-341.823,66	-683.647,32	-1.025.470,98	-1.367.294,63	-1.709.118,29	-2.050.941,95	-2.392.765,61	-2.734.569,27	-3.076.412,93	-3.418.246,59	
<b>Clientes</b>	429.166,67	429.166,67	429.166,67	429.166,67	429.166,67	429.166,67	429.166,67	429.166,67	429.166,67	429.166,67	429.166,67
<b>Existencias Materias Primas</b>	24.500,00	24.500,00	24.500,00	24.500,00	24.500,00	24.500,00	24.500,00	24.500,00	24.500,00	24.500,00	24.500,00
<b>Existencias Producto terminado</b>	90.407,25	90.407,25	90.407,25	90.407,25	90.407,25	90.407,25	90.407,25	90.407,25	90.407,25	90.407,25	90.407,25
<b>Tesorería</b>	588.103,48	1.650.076,97	3.209.292,01	4.473.256,47	5.690.306,99	6.858.789,05	7.976.998,51	9.043.180,11	10.055.525,91	11.012.173,76	11.911.205,63
<b>TOTAL ACTIVO</b>	5.195.831,42	6.460.055,17	7.677.446,55	8.599.587,36	9.474.814,21	10.301.472,61	11.077.858,42	11.802.216,36	12.472.738,50	13.087.562,70	13.644.770,91
<b>Aportación propia</b>	1.535.909,31	1.535.909,31	1.535.909,31	1.535.909,31	1.535.909,31	1.535.909,31	1.535.909,31	1.535.909,31	1.535.909,31	1.535.909,31	1.535.909,31
<b>Subvención</b>	1.382.318,38	1.382.318,38	1.382.318,38	1.382.318,38	1.382.318,38	1.382.318,38	1.382.318,38	1.382.318,38	1.382.318,38	1.382.318,38	1.382.318,38
<b>Fondo de beneficio</b>		1.172.731,45	2.374.491,86	3.531.771,42	4.642.938,61	5.706.514,49	6.720.671,21	7.783.730,62	8.593.912,70	9.449.384,05	10.248.236,26
<b>Proveedores</b>		48.125,00	48.125,00	48.125,00	48.125,00	48.125,00	48.125,00	48.125,00	48.125,00	48.125,00	48.125,00
<b>Exigible a largo plazo</b>	1.689.500,24	1.689.500,24	1.689.500,24	1.478.312,71	1.267.125,18	1.055.937,55	844.750,12	633.562,59	422.375,06	211.187,53	0,00
<b>Exigible a corto plazo</b>	588.103,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Impuestos</b>	631.470,78	647.101,76	623.150,53	588.347,72	572.567,78	546.084,39	518.570,45	490.098,04	460.638,42	430.161,96	
<b>TOTAL PASIVO</b>	5.195.831,42	6.460.055,17	7.677.446,55	8.599.587,36	9.474.814,21	10.301.472,61	11.077.858,42	11.802.216,36	12.472.738,50	13.087.562,70	13.644.770,91

 <b>Universidad</b> <b>de Granada</b>  <b>Facultad de</b> <b>Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE</b> <b>VIABILIDAD</b>
---	---	--

### 2.1.11 TIR

El índice de evaluación del estudio económico será el TIR., tasa interna de rentabilidad, que representa el tipo de interés compuesto que se percibe, durante la vida de la inversión, por la inmovilización del capital invertido, es decir, a que interés se remunera el capital inmovilizado.

Para calcular el TIR se utiliza la siguiente fórmula:

$$I = \sum_{i=1}^n \frac{CF_i}{(1+r)^i}$$

Siendo:

I, la inversión inicial.

n, la Vida útil del Proyecto. En este caso 10 años.

CF<sub>i</sub>, el Flujo neto de caja en el año i

r, la tasa interna de retorno.

En este caso el **TIR es del 28%**.

Ver la página siguiente.



TIR	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Capital fijo	4.607.727,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Capital circulante	588.103,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Amortizaciones	0,00	341.823,56	341.823,56	341.823,56	341.823,56	341.823,56	341.823,56	341.823,56	341.823,56	341.823,56	341.823,56
Interés préstamo	0,00	165.313,30	101.370,01	88.658,76	76.027,51	63.356,26	50.685,01	38.013,76	25.342,50	12.671,25	0,00
Beneficio disponible	0,00	1.172.731,45	1.201.760,41	1.157.279,56	1.111.217,20	1.063.525,87	1.014.156,72	963.059,41	910.182,08	855.471,35	798.872,20
Valor residual	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SUMA	-5.195.831,42	1.679.868,40	1.644.954,08	1.587.801,98	1.529.068,37	1.468.705,79	1.406.665,39	1.342.896,82	1.277.348,25	1.209.966,26	2.330.187,21





### 2.1.12 Análisis de sensibilidad

Representa un estudio de la estructura de costes del proyecto, en el caso que nos ocupa se aprecia una clara relevancia del **coste de la materia prima** sobre el beneficio obtenido mediante esta práctica industrial.

Por tanto un precio estable de la materia prima, en este caso chatarra de cristal líquido, será fundamental para obtención de unos buenos resultados a nivel de beneficios. Puesto que es esperable que el precio de la chatarra de pantalla de cristal líquido no experimente importantes cambios en los próximos años, se trata de una actividad fiable.

Ver la página siguiente.



ESTUDIO DE SENSIBILIDAD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TOTAL	4.304.571,47	4.348.358,24	4.372.349,47	4.337.152,28	4.422.832,22	4.449.415,61	4.476.929,55	4.505.401,96	4.534.861,58	4.565.338,04
Mano de obra	32,30	32,93	33,73	34,55	35,38	36,22	37,08	37,95	38,83	39,73
Materias primas	13,42	13,68	14,01	14,35	14,70	15,05	15,40	15,76	16,13	16,50
Gastos de fabricación	9,28	9,46	9,69	9,92	10,16	10,40	10,65	10,90	11,15	11,41
Amortización	7,94	7,86	7,82	7,77	7,73	7,68	7,64	7,59	7,54	7,49
Costes de estructura	5,99	6,11	6,25	6,41	6,56	6,72	6,87	7,04	7,20	7,37
Gastos financieros	3,84	2,33	2,03	1,73	1,43	1,14	0,85	0,56	0,28	0,00
Beneficio disponible	27,24	27,64	26,47	25,27	24,05	22,79	21,51	20,20	18,86	17,50
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

 <b>Universidad de Granada</b>  <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

## 2.2 SEGUNDA ALTERNATIVA: *Método para recuperar indio de alta pureza mediante vaporización de cloruros a baja temperatura*

### 2.2.1 Objetivo

El objetivo del presente proyecto es la implantación de una industria de obtención de metal indio procedente del reciclaje de chatarra de pantallas de cristal líquido (LCD).

La planta proyectada tratará 10500 t/año de chatarra de pantalla de cristal líquido (LCD) para obtener 10,3 t de metal indio de 99,999% de pureza. Esto supone una capacidad de tratamiento de 35 t/día de chatarra LCD y una producción de 31 kg de metal indio diarios. La totalidad de dicha producción se pondrá en venta en el mercado internacional a 500 euros por kilogramo.

Se trabajará en continuo 24 horas, divididas en turnos de 8 horas, durante 330 días al año; el resto se reservan a tareas de mantenimiento.

Para la elección de su emplazamiento se tendrán en cuenta los siguientes criterios, además de los generalmente utilizados para dicha tarea:

- Estimación de RAEEs producidos y recogidos. Se consideran los factores más importantes a la hora de situar la planta. Los ingresos de una planta de tratamiento de RAEEs dependen directamente del tonelaje de residuos gestionados.
- Los residuos recogidos representan aquellos que son susceptibles de ser tratados por la planta a día de hoy, mientras que los producidos son el máximo que puede llegar a tratarse conforme la recogida de RAEEs se hace más efectiva.
- Proximidad geográfica a las zonas o comunidades donde se recogen la mayor cantidad de residuos adecuados para ser tratados.
- PIB per cápita. Pues la riqueza de una población influye directamente en el consumo y velocidad de reposición de los aparatos eléctricos y electrónicos.

Dos de los factores fundamentales en la elección del emplazamiento es, por un lado, la elevada cantidad de chatarra recogido en la Comunidad Andaluza (ver *apartado 1.2.3, Situación actual de la gestión en España*), y por otro lado la presencia en la misma localidad seleccionada de una Planta de Tratamiento Final de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos. De la empresa RECILEC.

En base a estos factores se proyecta ubicar la planta industrial en calle El Matorral (Parque de Actividades Medioambientales de Andalucía), parcela nº35, Aznalcóllar (Sevilla). Dicha parcela tiene una extensión de 12370 m<sup>2</sup>.

### 2.2.2 Generalidades

El indio procedente de pantallas LCD se encuentra en la forma de óxido de indio, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Es de sobra conocido que la temperatura de fusión del óxido de indio(III) es muy superior a la temperatura de sublimación de cualquier otro compuesto clorado de indio.

Aprovechando la relativamente baja temperatura de sublimación del cloruro de indio(III), es posible aplicar un esquema de operación para vaporizar compuestos de indio mediante calentamiento, tras la transformación de la estructura del óxido de indio(III) a cloruros de indio.



La idea es reducir la temperatura de vaporización del compuesto de indio a la vez que se reduce el consumo energético.

Primeramente, se lleva a cabo un proceso de molienda para reducir el tamaño de las partículas de chatarra de cristal líquido. A continuación las partículas resultantes se tratan con disolución acuosa de ácido clorhídrico 6M para formar un compuesto de cloruro de indio.

Se lleva a cabo un proceso de secado en atmósfera de aire a 373 K durante 60 minutos, y posteriormente se calienta a 673 K en atmósfera de nitrógeno durante 90 minutos para vaporizar el compuesto de cloruro de indio y recuperarlo.

#### 2.2.2.1 Influencia de la temperatura de calefacción en la recuperación de indio

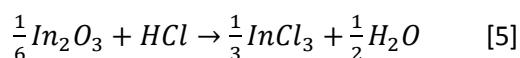
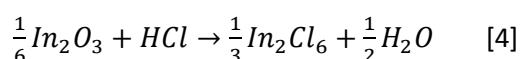
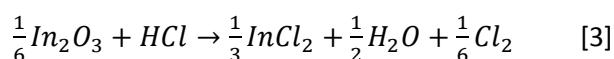
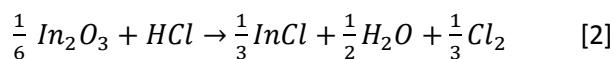
Se han llevado a cabo experimentos para encontrar la temperatura de calefacción más adecuada para la vaporización de compuestos de indio procedentes de muestras de ITO (óxido de indio y estaño).

Partiendo de una muestra pura de ITO y mediante tratamiento con una disolución acuosa de ácido clorhídrico y posterior etapa de secado a 373 K en atmósfera de nitrógeno durante 60 minutos. Se ha descrito la relación entre la temperatura de calefacción (en Kelvin), el tiempo de calefacción (en minutos), y el grado de vaporización (porcentual) de indio en atmósfera de nitrógeno (Takahashi et al.).

Los resultados experimentales indican que el grado de vaporización de indio aumenta con el incremento de la temperatura o con la prolongación del tiempo de calefacción.

#### 2.2.2.2 Consideraciones termodinámicas

Para una mejor comprensión del mecanismo de recuperación de indio, se muestran los resultados de una serie de cálculos termodinámicos usando datos tabulados. La Ilustración 37 muestra la energía libre de Gibbs como función de la temperatura para las siguientes reacciones de cloración de indio usando ácido clorhídrico (Reacciones de [2] a [5]).



Puesto que los valores de  $\Delta G^0$  para las Reacciones [2] y [3] son positivos dentro del rango de temperaturas de 273 a 1273 K, esas reacciones no ocurrirán en esas condiciones (Ilustración 37).

Comparando el valor para la energía libre de Gibbs de la Reacción [4] con el de la Reacción [5], se puede observar que la Reacción [4] transcurrirá a 850 K, mientras la Reacción [5] ocurrirá hasta más allá de 850 K.

A continuación se muestran los diagramas de estabilidad para los sistemas In-Cl<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> a 373, 773 y 973 K, respectivamente.

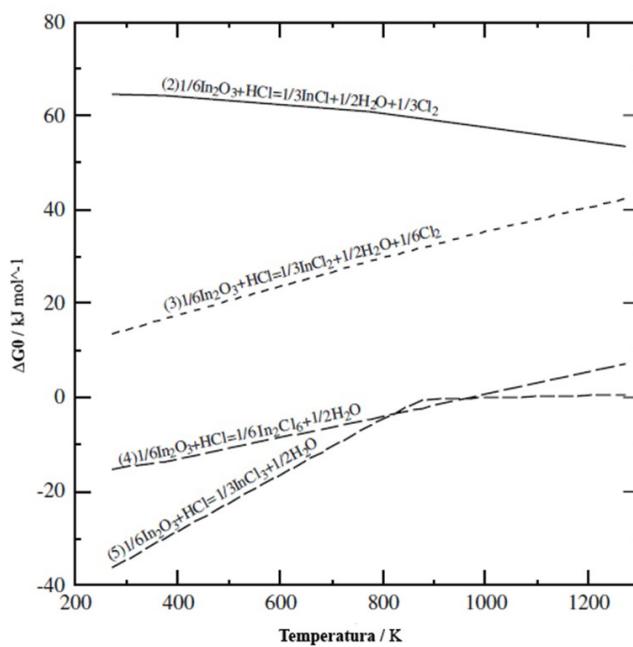


Ilustración 37: Energ. libre Gibbs como función de la temperatura.

Fuente: Takahashi et al.

Estos diagramas indican el área de estabilidad de varias especies de indio a varias temperaturas debido a la cloración de  $\text{In}_2\text{O}_3$  por ácido clorhídrico. Las líneas de puntos muestran el ácido clorhídrico y agua a presión de 1 atm.

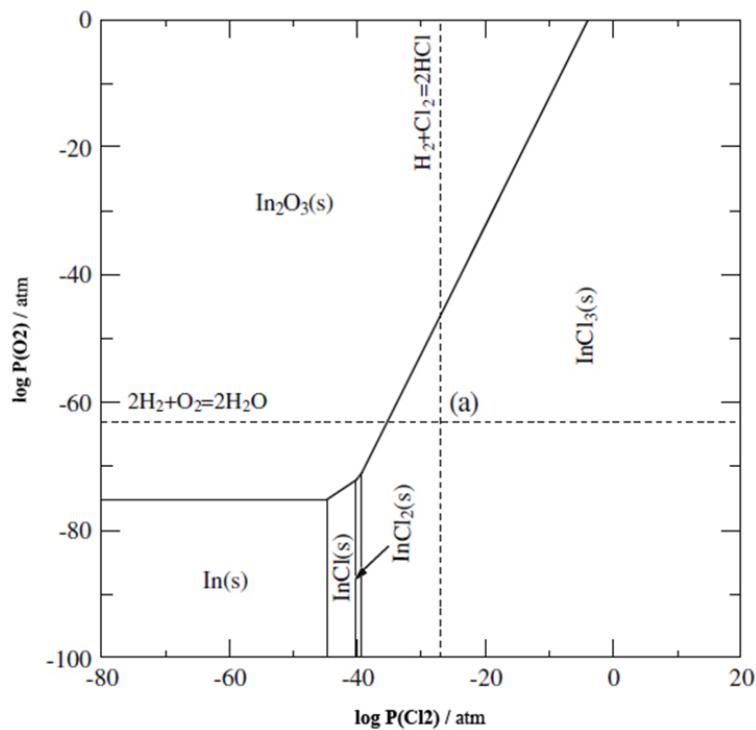


Ilustración 38: Diagrama estabilidad  $\text{In}-\text{Cl}_2-\text{O}_2$ , 373 K

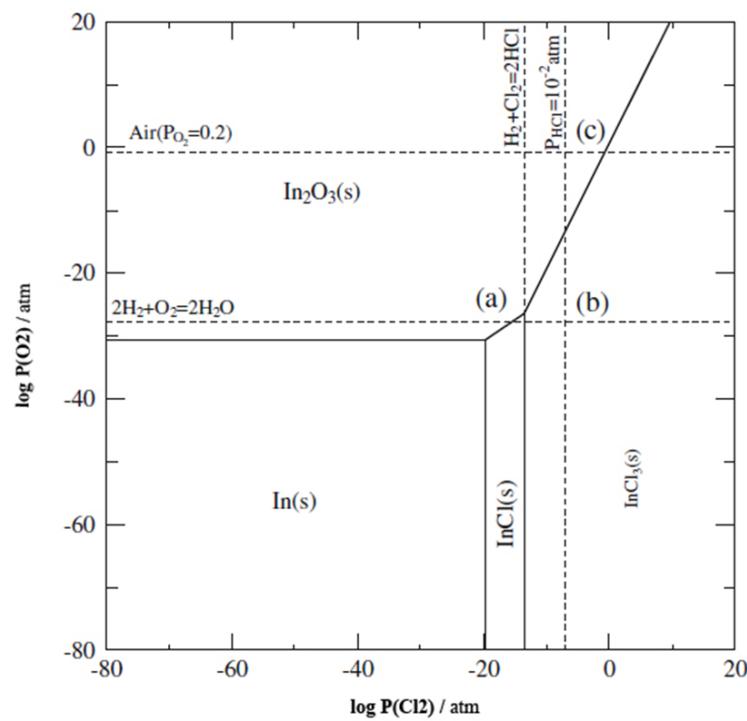


Ilustración 39: Diagrama de estabilidad  $In-Cl_2-O_2$ , 773 K

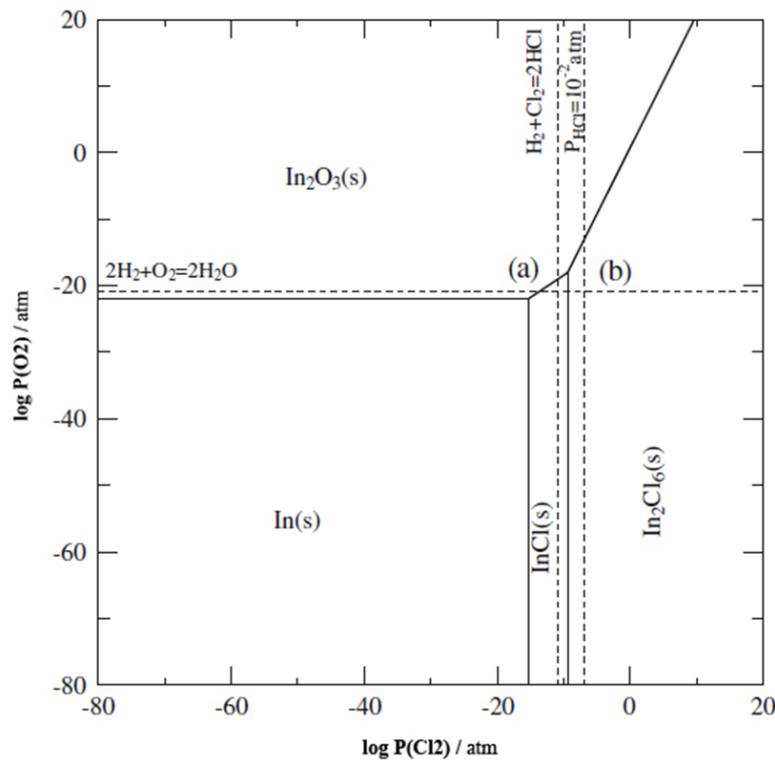


Ilustración 40: Diagrama de estabilidad  $In-Cl_2-O_2$ , 973 K



Como se muestra en las Ilustraciones 38, 39 y 40, existen tres especies de cloruro de indio, a saber,  $\text{InCl}$ ,  $\text{InCl}_2$  y  $\text{InCl}_3$ , mientras que solo existe una especie de óxido de indio,  $\text{In}_2\text{O}_3$ .

Aunque el compuesto oxicloruro,  $\text{InOCl}$ , puede aparecer entre cloruros y óxido, su región no se muestra en el diagrama debido a la carencia de datos termodinámicos.

Al estar el punto de corte (a) de las líneas de  $\text{HCl}$  y  $\text{H}_2\text{O}$  en la región de  $\text{InCl}_3$ , se forma dicho compuesto por cloración con ácido clorhídrico a 373 K (Ilustración 38).

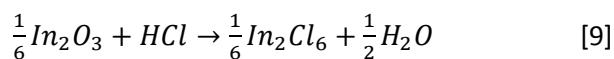
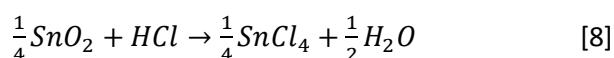
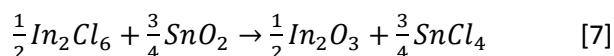
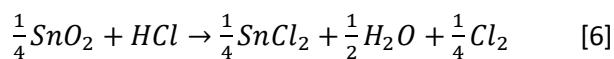
A 773 K, la región de  $\text{InCl}_2$  desaparece (Ilustración 39). El punto de corte (a) está muy próximo a la frontera entre  $\text{In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{InCl}$ , y  $\text{InCl}_3$ , aunque la línea de potencial de cloro es próxima a la línea de  $\text{HCl}$ . La presión de vapor del compuesto gaseoso se controla para ser la unidad en el cálculo de potencial bajo las condiciones estándar.

Si se reduce la presión de ácido clorhídrico a  $10^{-2}$  atm, la línea de potencial del cloro cambia al lado positivo, (esto es, punto de corte (b)). Después, podría formarse  $\text{InCl}_3$  aunque su presión de vapor es baja.

Si se calientan los compuestos en aire, la presión parcial de oxígeno se incrementará por encima de 0,2 atm. El punto de corte (c) está en la región de  $\text{In}_2\text{O}_3$ . En otras palabras, la formación de óxido a partir de cloruro tiene como resultado un bajo grado de volatilización de indio.

A 973 K, el punto de corte (a) se localiza dentro de la región de  $\text{InCl}$ , el cual es un compuesto no volátil . Sin embargo, cuando la presión de ácido clorhídrico es relativamente baja, por ejemplo,  $10^{-2}$  atm, la presión parcial de cloro cambia al lado de mayor potencial como se indica por el punto (b) mostrado en la Ilustración 40. En esta región, se formará y vaporizará debido al calentamiento el compuesto volátil  $\text{In}_2\text{Cl}_6$ .

Al contener las películas de ITO también óxido de estaño, a continuación se muestran una serie de reacciones que indican la posible cloración de óxidos de estaño:



Las reacciones [6] y [8] indican la posible hidrocloración del  $\text{SnO}_2$  por acción del ácido clorhídrico y la formación de  $\text{SnCl}_2$  y  $\text{SnCl}_4$ , respectivamente. Sin embargo, dichas reacciones pueden no transcurrir al ser positivos los valores para la energía libre.



No obstante, la cloración de  $\text{In}_2\text{O}_3$  parece empezar con la formación de  $\text{In}_2\text{Cl}_6$  (Reacción [4]). En esta etapa, la cloración de  $\text{SnO}_2$  no transcurre por adición de ácido clorhídrico. Entonces, es posible la reacción de  $\text{SnO}_2$  con  $\text{In}_2\text{Cl}_6$  vapor (Reacción [7]). Se puede argumentar, sin embargo, que su valor positivo de energía libre indica que tal reacción no ocurre de forma espontánea.

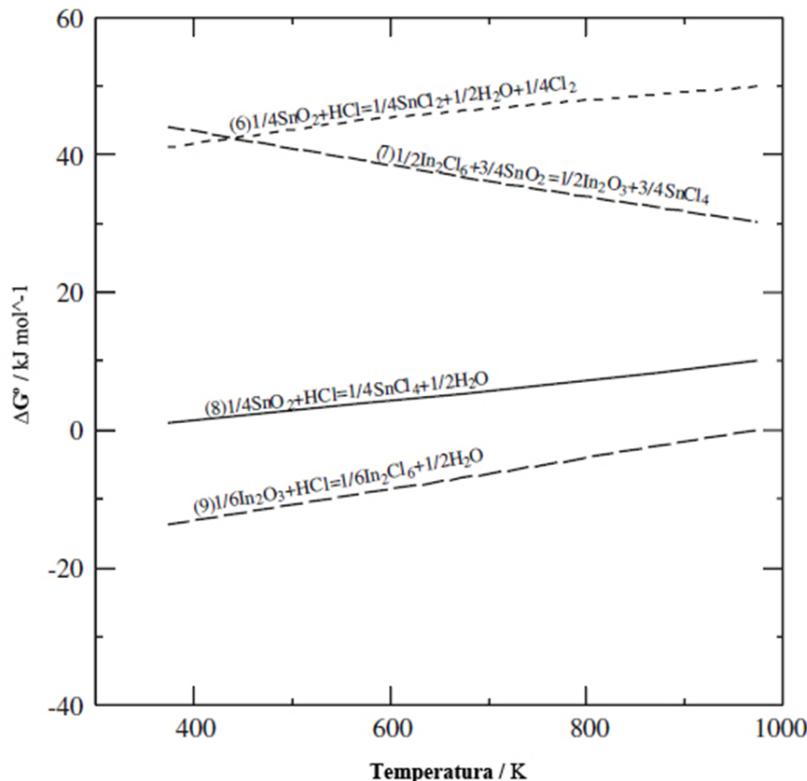


Ilustración 41: Energ. libre Gibbs hidrocloración de  $\text{SnO}_2$  y  $\text{In}_2\text{O}_3$

Se puede concluir que, la reacción de  $\text{In}_2\text{O}_3$  con ácido clorhídrico transcurre como sigue:

- Se forma  $\text{InCl}_3$  a temperatura relativamente baja por tratamiento con ácido clorhídrico.
- Hasta 773 K tiene lugar la volatilización de indio en forma de  $\text{In}_2\text{Cl}_6$  al ser el  $\text{In}_2\text{Cl}_6$  más estable que el  $\text{InCl}_3$  en fase vapor.
- El  $\text{InCl}_3$  volatiliza a temperatura relativamente alta.
- La volatilización de cloruro de indio en aire queda inhibida debido a la formación de óxidos estables.

#### 2.2.2.3 Influencia de la temperatura y tiempo de calefacción en el grado de vaporización de indio procedente de chatarra de LCD

Los resultados experimentales (Takahashi et al.) indican que el grado de vaporización de indio alcanza su máximo cuando la muestra es calentada durante más de 60 minutos.

Por el contrario no se observa incremento en el grado de vaporización cuando la muestra es calentada durante más de 90 minutos.

También se observa que el grado de vaporización del cloruro de indio es superior cuando la calefacción transcurre en atmósfera de nitrógeno.

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

Los resultados experimentales indican que bajo control cuidadoso de tiempo y la temperatura de calefacción es posible lograr una vaporización selectiva del indio y estaño.

Finalmente, considerando los resultados obtenidos en laboratorio, se selecciona una **temperatura idónea de calefacción de 673 K**.

### 2.2.3 Descripción del proceso

El objetivo de este proceso es vaporizar indio procedente de LCD de pantallas desechadas mediante la combinación de un tratamiento con ácido clorhídrico y un proceso de calefacción llevado a cabo a temperatura relativamente baja.

Seleccionar las condiciones de operación idóneas para este propósito exige estudiar la influencia que ejerce la temperatura de calefacción en el grado de vaporización de indio.

Se sabe que al calentar una muestra de ITO a 973 K durante 90 minutos, el grado de vaporización del compuesto de cloruro de indio formado es del 96,2%.

Es posible obtener un alto grado de extracción de indio cuando el tamaño de los fragmentos de LCD se reduce a menos de 75 µm.

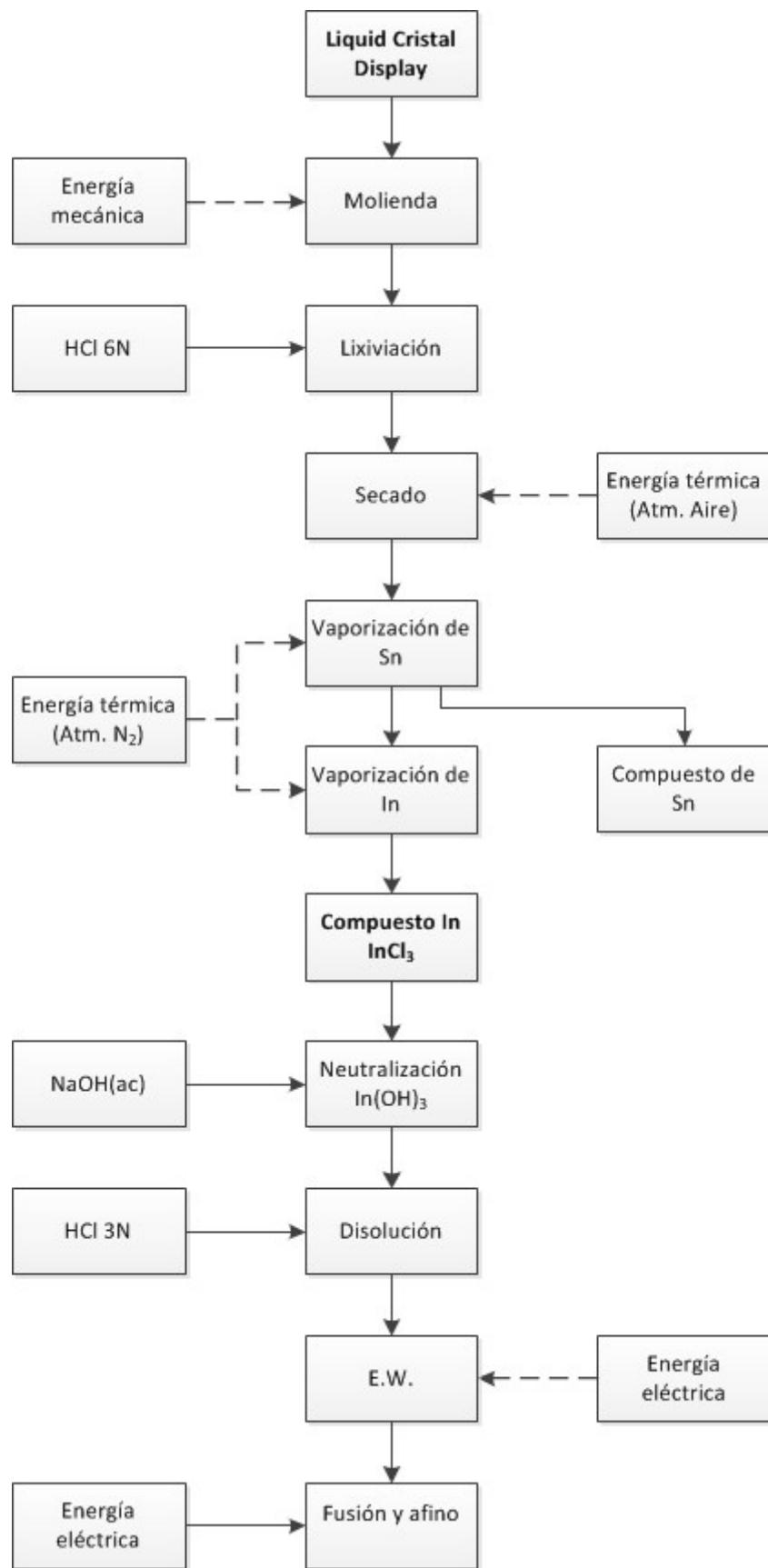
Este proceso para recuperar indio comprende los siguientes pasos:

- a) **Molienda** de las partículas, en un molino rotatorio para reducir el tamaño de las partículas hasta las 75 µm.
- b) **Lixiviación** del indio, con disolución acuosa de ácido clorhídrico 6M, para formar un compuesto de cloruro de indio.
- c) **Evaporación** en atmósfera de aire a 373 K durante 60 minutos, de la solución acuosa de ácido clorhídrico.
- d) **Vaporización** del cloruro de estaño, primero, a 573 K durante 30 min; y del cloruro de estaño, después, a 673 K en atmósfera de nitrógeno durante 60 minutos. El nitrógeno actúa como gas portador transportando al cloruro de indio vaporizado hasta un contenedor con una solución acuosa del 20% en peso de hidróxido de sodio.
- h) **Conversión del cloruro de indio vaporizado en hidróxido de indio (III)**, en presencia de la disolución acuosa anteriormente mencionada.
- i) **Conversión del hidróxido de indio en cloruro de indio**, mediante tratamiento con ácido clorhídrico diluido 3M.
- j) **Paso de electroobtención**, usando la solución procedente del paso anterior como solución electrolítica inicial, para electrodeposición de indio metálico, en condiciones electrolíticas apropiadas.

El indio metálico así recuperado contiene impurezas de metales alcalinos, tales como el sodio, componente de la solución electrolítica.

Una fracción de la solución electrolítica se mezcla con ácido clorhídrico fresco 6M para ser reutilizada en el paso de lixiviación.

- k) **Fundición y afino**. El indio metálico se calienta junto con hidróxido de sodio en estado sólido, para ser fundidos y mezclados, hasta que los metales alcalinos son disueltos en el hidróxido de sodio fundido para ser eliminados, y entonces, la pieza metálica obtenida por separación gravimétrica es arrojada a un molde para ser enfriada y recuperada como indio de alta pureza.



 <b>Universidad</b> <b>de Granada</b>  <b>Facultad de</b> <b>Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

## 2.2.4 Balances de materia y de energía

A continuación se procede a la realización de los balances de materia y de energía necesarios para el correcto dimensionamiento de los equipos que intervienen en el proceso.

### 2.2.4.1 Lixiviación

Base de cálculo: 7 t chatarra LCD (1400 g In/t LCD sin org.) = 9,8 kg In alimentado.

Consideramos una concentración disponible 6N (20% peso) para ácido clorhídrico comercial.

$$9,8 \text{ kg In} \cdot \frac{277,64 \text{ kg } In_2O_3}{229,64 \text{ kg In}} = 11,85 \text{ kg } In_2O_3$$

$$11,85 \text{ kg } In_2O_3 \cdot \frac{10 \text{ kg } SnO_2}{90 \text{ kg } In_2O_3} = 1,32 \text{ kg } SnO_2$$

$$11,85 \text{ kg } In_2O_3 \cdot \frac{100 \text{ kg ITO (s. org)}}{90 \text{ kg } In_2O_3} \cdot \frac{1400 \text{ kg ITO (c. org)}}{1102 \text{ kg ITO (s. org)}} = 16,73 \text{ kg ITO (c. org)}$$

$$1,32 \text{ kg } SnO_2 \cdot \frac{118,71 \text{ kg Sn}}{150,71 \text{ kg } SnO_2} = 1,04 \text{ kg Sn}$$

Puesto que el grado de extracción de In es 100% los 9,8 kg de In alimentados están presentes en D:

$$In(\text{entra}) = In(\text{sale})$$

Para calcular la cantidad de HCl 6M utilizado en el paso de lixiviación hacemos uso de la relación de tanto por ciento de sólidos:

$$\% \text{ sólidos} = \frac{\text{peso de sólidos}}{\text{peso de sólidos} + \text{peso disolvente}} = \frac{7 \text{ t}}{7 \text{ t} + x} = \frac{1}{2}$$

$$x = 7 \text{ t HCl 6M}$$

$$7 \text{ t HCl 6M} \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{t}} \cdot \frac{1 \text{ L}}{1,098 \text{ kg}} = 6375,23 \text{ L HCl 6M} = 6,375 \text{ m}^3$$

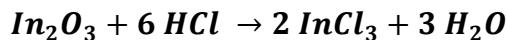
La corriente de 6375,23 L es alimentada durante 11 días a los extractores a razón de 5 cargas al día (4 h/carga).

Para D = 6375,23 L las masas de los distintos componentes son:

Corriente D	In	Sn	Cu	Pb	Cr	Ni	Fe
Concen. (g/L)	50	0,2475	0,000625	0,00025	0,00025	<0,00025	0,0495
Masa (g)	318760	1578	3,985	1,594	1,594	<1,594	315,572

Tabla 41: Balance a especies atómicas. Fuente: Elaboración propia.

Reacción de cloración de indio:



Supuesto que no existe variación de volumen en el paso de lixiviación:

$$A = D = 6375,2 \text{ L} = 6,375 \text{ m}^3$$

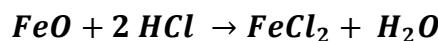
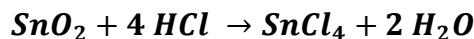
Cálculo de la cantidad de HCl teórico necesario para la lixiviación:

$$11850 \text{ g } In_2O_3 \cdot \frac{1 \text{ mol } In_2O_3}{277,64 \text{ g } In_2O_3} \cdot \frac{6 \text{ mol } HCl}{1 \text{ mol } In_2O_3} = 256,09 \text{ mol } HCl_{teo}$$

Cálculo de la cantidad en moles de ácido clorhídrico contenida en la corriente A:

$$n_{HCl} = M \cdot A = 6 \cdot 6375,2 = 38251,2 \text{ mol } HCl$$

Reacciones secundarias de cloración:



Cantidad de  $H^+$  en disolución tras el paso de lixiviación:

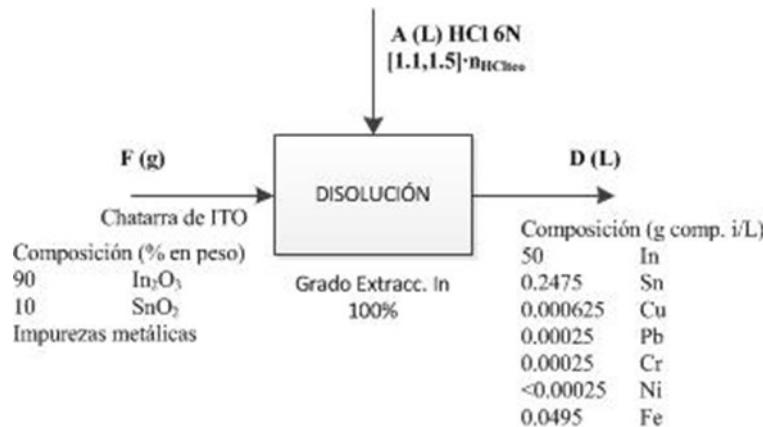
$$315,572 \text{ g } Fe \cdot \frac{1 \text{ mol } Fe}{55,845 \text{ g } Fe} \cdot \frac{2 \text{ mol } HCl}{1 \text{ mol } Fe} = 11,30 \text{ mol } HCl$$

$$1578 \text{ g } Sn \cdot \frac{1 \text{ mol } Sn}{118,71 \text{ g } Sn} \cdot \frac{4 \text{ mol } HCl}{1 \text{ mol } Sn} = 53,18 \text{ mol } HCl$$

$$\begin{aligned} 38251,2 \text{ mol } HCl - 256,09 (InCl_3) - 11,30 (FeCl_2) - 53,18(SnCl_4) \\ = 37930,6 \text{ mol } HCl = 37930,6 \text{ mol } H^+ \end{aligned}$$

pH de la corriente tras la lixiviación (D):

$$pH = -\log[H^+] = -\log\left[\frac{37993,1}{6375,2}\right] = -0,77$$



Supuesta la capacidad calorífica del agua pura para la disolución, 4,2 J/g·K.

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T = 6375230 \cdot 4,2 \cdot (25 - 15) = 267760 \text{ kJ} = 74,37 \text{ kWh}$$

 <b>Universidad</b> <b>de Granada</b>  <b>Facultad de</b> <b>Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	ESTUDIO DE VIABILIDAD
---	--	-----------------------

Potencia requerida:

$$\frac{267760 \text{ kJ}}{600 \text{ s}} = 446,3 \text{ kW}$$

$$\text{Consumo vapor} = 74,37 \text{ kWh} \cdot \frac{1}{0,63} \frac{\text{kg vapor}}{\text{kWh}} = 118,05 \text{ kg vapor}$$

#### 2.2.4.2 Evaporación

Secado en atmósfera de aire a 373 K durante 60 minutos.

Calor requerido para el calentamiento de la solución hasta 100°C:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T = 6375230 \cdot 4,2 \cdot (100 - 25) = 2008197 \text{ kJ} = 557,83 \text{ kWh}$$

Calor requerido para la evaporación del HCl presente en la solución a 100°C:

$$5757,71 \text{ kg} \cdot 412,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 2376783 \text{ kJ} = 660 \text{ kWh}$$

Calor invertido en la etapa de secado = 2008197 + 2376783 = 4384980 kJ

Potencia aportada:

$$P = \frac{4384980}{60 \cdot 60} = 1218,1 \text{ kW}$$

$$\text{Consumo vapor} = 1218,1 \text{ kWh} \cdot \frac{1}{0,63} \frac{\text{kg vapor}}{\text{kWh}} = 1933,4 \text{ kg vapor}$$

#### 2.2.4.3 Vaporización del cloruro de estaño

Atmósfera de Nitrógeno:

$$50000 \frac{\text{L}}{\text{min}} = 2232 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

Un volumen líquido de 0,1 L de nitrógeno se expande en 70 L de gas.

$$71,4 \frac{\text{L N}_2(\text{liq.})}{\text{min}} \cdot 30 \text{ min} = 2142 \text{ L N}_2$$

Calor requerido para el calentamiento de la solución hasta 573 K:

$$Q = \frac{4,186 \cdot c_p \cdot (T_1 - T_o) \cdot m}{1000} = \frac{4,186 \cdot 19,495 \cdot (573 - 373) \cdot 3,46}{1000} = 56,47 \text{ kJ}$$

$$= 0,02 \text{ kWh}$$

Calor requerido para la evaporación del SnCl<sub>4</sub>:

$$13,29 \text{ mol SnCl}_4 \cdot 8,33 \frac{\text{cal}}{\text{mol}} = 110,73 \text{ cal} \cdot 4,187 \frac{\text{J}}{\text{cal}} = 0,46 \text{ kJ}$$

Potencia aportada:

$$P = \frac{56,93}{30 \cdot 60} = 0,03 \text{ kW}$$

#### 2.2.4.4 Vaporización del cloruro de indio

Consumo de nitrógeno:

 <b>Universidad</b> <b>de Granada</b>  <b>Facultad de</b> <b>Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

$$71,4 \frac{L N_2}{min} \cdot 60 min = 4284 L N_2$$

Calor calentamiento:

$$Q = \frac{4,186 \cdot c_p \cdot (T_1 - T_o) \cdot m}{1000} = \frac{4,186 \cdot 19,924 \cdot (673 - 573) \cdot 614,06}{1000} = 5121,4 \text{ kJ}$$

$$= 1,42 \text{ kWh}$$

Calor vaporización:

$$2776,66 \text{ mol } InCl_3 \cdot 8,33 \frac{\text{cal}}{\text{mol}} = 23129,54 \text{ cal} \cdot 4,187 \frac{\text{J}}{\text{cal}} = 96,84 \text{ kJ} = 0,03 \text{ kWh}$$

Potencia aportada:

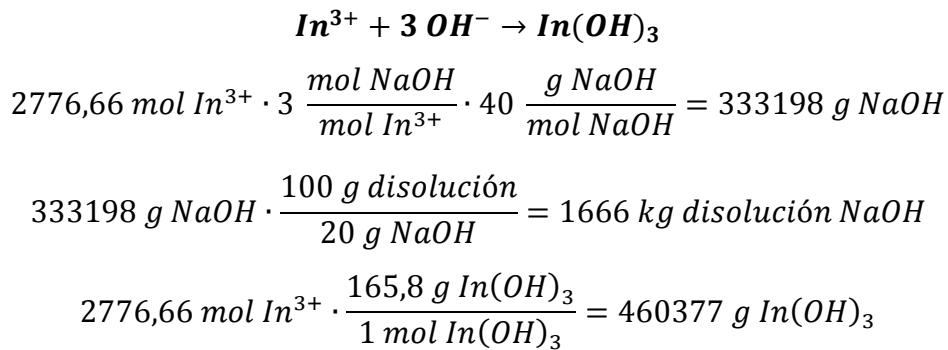
$$P = \frac{5218,24}{60 \cdot 60} = 1,45 \text{ kW}$$

$$\text{Consumo vapor} = 1,45 \text{ kWh} \cdot \frac{1}{0,63} \frac{\text{kg vapor}}{\text{kWh}} = 2,3 \text{ kg vapor}$$

#### 2.2.4.5 Neutralización

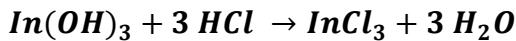
Burbujeo en un tanque con una disolución al 20% en peso de NaOH.

Balances de materia:



#### 2.2.4.6 Disolución

Reacción de cloración de indio:



$$460377 \text{ g } In(OH)_3 \cdot \frac{1 \text{ mol g } In(OH)_3}{165,8 \text{ g } In(OH)_3} \cdot \frac{3 \text{ mol HCl}}{1 \text{ mol } In(OH)_3} = 8330,1 \text{ mol HCl}_{teo}$$

$$V_{disol} = \frac{8330,1 \text{ mol HCl} \cdot 1,2}{3 \text{ M}} = 3332 \text{ L HCl (10% peso, 3M)}$$

#### 2.2.4.7 Electroobtención



Los cátodos corresponden a láminas de alrededor de 1 m<sup>2</sup> de área. El material seleccionado para el cátodo es acero inoxidable, el cual es apropiado para soluciones electrolíticas de hidróxido sódico. El ánodo está compuesto de grafito.

Según la ley de Faraday:

$$m_F = \frac{M \cdot I \cdot \eta_c \cdot t \cdot A_t}{n \cdot F}$$

donde m<sub>F</sub> es la masa depositada (g)

M el peso molecular del metal depositado

n la valencia del ion metálico en la solución

F la constante de Faraday (96487 C/equivalente)

I la corriente que circula (A)

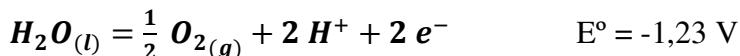
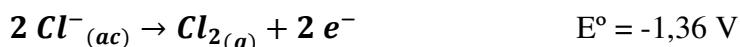
t el tiempo de operación de la electrolisis (s)

A<sub>t</sub> el área total expuesta a la depositación (m<sup>2</sup>)

despejando t de la ecuación:

$$t = \frac{m_F \cdot n \cdot F}{M \cdot I \cdot \eta_c} = \frac{343000 \cdot 3 \cdot 96487}{114,82 \cdot 1000 \cdot 0,9} = 960780 \text{ s} = 266,88 \text{ h} = 11,1 \text{ días}$$

#### Ánodo



#### Cátodo



Resultado del proceso:

- Deposición de In en el cátodo.
- Desprendimiento de hidrógeno en el cátodo y empobrecimiento del electrolito en H<sup>+</sup> y en indio.

Se precisan al menos 1,7 V de voltaje de celda para la electroobtención de indio. También se conoce que es preciso un sobrepotencial de más de 2 V en el rango de 50-200 mA/cm<sup>2</sup> de densidad de corriente en solución de ácido clorhídrico.

La electroobtención tiene lugar a 40°C.

El voltaje de celda se mantendrá alrededor de 6 V para una densidad de corriente de 100 mA/cm<sup>2</sup>.

$$V_{cel} = \Delta E + \eta_A + |\eta_c| + R \cdot I + \text{pérdidas}$$

$$\Delta E = E_{\text{ánodo}} - E_{\text{cátodo}}$$

donde R es la resistencia del electrolito (Ω·m<sup>2</sup>)

I es la densidad de corriente (A/m<sup>2</sup>)

Pérdidas es el término que engloba las pérdidas en los conductores externos (V)

Consumo específico de energía en el paso de electroobtención:

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

$$\begin{aligned}
CE \left( \frac{kWh}{kg} \right) &= \frac{V_{cel}(V) \cdot \frac{I(A)}{\eta} \cdot t(h)}{1000 \cdot m_F(kg)} = \frac{6 \cdot \frac{1000}{0,9} \cdot 266,88}{1000 \cdot 343} = 5,19 \frac{kWh}{kg In} \\
&= 5190 \frac{kWh}{tn In}
\end{aligned}$$

Consumo de energía eléctrica =  $5,19 \cdot 343 = 1779,2 \text{ kW}$

#### 2.2.4.8 Fusión

El indio obtenido es fundido en un horno de crisol, del cual se crean a continuación formas que satisfacen los requerimientos de los clientes, generalmente como lingote o barras.

Balance de energía:

Calor absorbido por un material a una temperatura dada (Wh):

$$q = \frac{w \cdot c_m \cdot t'}{3,412} + L + R$$

donde  $c_m$  es el calor específico medio del metal dentro del rango de temperaturas (Btu/lbm°F)

w es el peso de metal (lb)

$t'$  es el aumento de temperatura (°F)

L es el calor latente, si existe (Wh)

R es el calor de la reacción, si la hubiera (Wh)

$$q = \frac{756,2 \cdot 0,057 \cdot (600,8 - 212)}{3412} = 4911,7 \text{ Wh} = 4,91 \text{ kWh}$$

Considerando el término de pérdidas (crisol de 0,527 m de diámetro): 2,5 kW

La potencia absorbida durante la fusión es:  $4,9 + 2,5 = 7,4 \text{ kW}$

En condiciones normales será suficiente una potencia suplementaria de 3 kW, con lo que la potencia oscila entre 10 y 11 kWh.

### 2.2.5 Estudio técnico de la segunda alternativa

#### 2.2.5.1 Descripción de equipos

- **ÁREA 100: Reducción de tamaño**

La chatarra de pantalla de cristal líquido es suministrada por un gestor de residuos autorizado con granulometrías inferiores a 1 mm. Durante la etapa de reducción de tamaño se lleva a cabo la molienda de la chatarra hasta obtener un tamaño inferior a 150 µm.

Mediante contenedores autobasculantes se transportará la chatarra en bruto alimentada a una tolva de carga que tiene una capacidad máxima de 35 t. Una cinta transportadora eleva el mineral para descargarlo mediante un basculante en una tolva de alimentación de 7 t que regula la alimentación del molino de bolas.

Se trata de un **molino cónico de volteo de bolas, E-1**. Consiste en una carcasa cilíndrica que gira lentamente alrededor de un eje horizontal, y está llena aproximadamente hasta la mitad de su volumen con un medio sólido de molienda, en este caso bolas metálicas. La carcasa es de acero, con un recubrimiento de una lámina de acero de elevado contenido en carbono, porcelana o caucho.

Los molinos de volteo pueden operar tanto de forma continua como discontinua. En este caso se selecciona un modo de operación discontinuo. En una máquina discontinua, se introduce en el



molino, a través de una abertura situada en la carcasa, una determinada cantidad de sólido que ha de ser molido. Se cierra entonces la abertura y el molino se mantiene girando durante varias horas, después de lo cual se para y se descarga el producto.

En todos los molinos de volteo los elementos de molienda son elevados por la carcasa hasta cerca de la parte superior, desde donde caen sobre las partículas situadas debajo. La energía consumida en elevar los elementos de molienda es utilizada en reducir el tamaño de las partículas.

En un molino de bolas la mayor parte de la reducción se produce por impacto de la caída de las bolas desde cerca de la parte superior de la carcasa. En un molino de bolas grande la carcasa puede tener 3 m de diámetro y 4,25 m de longitud. Las bolas son de 25 a 125 mm de diámetro.

Los molinos de bolas son excelentes para moler hasta polvo muy fino en un solo paso cuando el consumo de energía no es una variable importante. La segregación de las unidades de molienda en una sola cámara es una característica del molino de bolas cónico. Esta segregación de los medios de molienda en elementos de diferentes tamaños y pesos ayuda considerablemente a la pérdida de energía, haciendo que las bolas grandes y pesadas rompan solamente las partículas grandes sin interferencia de las finas, mientras que las bolas pequeñas y ligeras no caigan sobre las partículas grandes a las que no pueden romper.

La alimentación entra por un lado en la zona de molienda primaria donde el diámetro de la carcasa es máximo. Mientras que el producto sale por el otro lado. Un molino de este tipo contiene bolas de diferentes tamaños que se desgastan y se hacen más pequeñas a medida que opera el molino. Periódicamente se añaden nuevas bolas grandes.

Al girar la carcasa, las bolas grandes se desplazan hacia el punto de máximo diámetro mientras que las bolas pequeñas emigran hacia el punto de descarga. Por tanto, la rotura inicial de las partículas de la alimentación es realizada por las bolas más grandes que caen desde una altura mayor, mientras que las partículas pequeñas son molidas por bolas pequeñas que caen desde una altura mucho menor. El consumo de energía está ligado a la dificultad de la operación de rotura, aumentando así la eficacia del molino.

Los molinos de bolas producen de 1 a 50 t/h de polvo del cual entre 70-90% pasa por un tamiz de malla 200 (74 µm). El consumo total de energía para un molino de bolas es del orden de 20 CV-h/t (16 kWh/t).

En la descarga de molinos, para molienda fina y ultrafina (como es el caso), la fuerza de gravedad es sustituida por el arrastre de un fluido portador. Por tanto, el polvo se retira de la corriente gaseosa por medio de un filtro de mangas.

Las partículas de chatarra pulverizadas transportadas por la corriente de aire se conducen horizontalmente desde la salida del molino a través de una conducción de 5 m de largo hacia un filtro de mangas situado a continuación del molino y suspendido sobre una base.

MOLINO CÓNICO DE BOLAS (E-1)	
<b>Diámetro</b>	0,9 m
<b>Longitud</b>	1,8 m
<b>Material</b>	Carcasa de acero recubierto de caucho y bolas metálicas.
<b>Capacidad</b>	0,65-2 t/h
<b>Potencia</b>	18,5 kW

Tabla 42: Características molino cónico de bolas. Fuente: Elaboración propia



Se trabaja con caídas de presión en torno a 2 atmósferas. La velocidad a la que los gases pasan por la tela debe ser entre 0,005-0,03 m/s, para evitar una excesiva compactación de sólidos que redundaría en una elevación de la pérdida de carga o en la rotura local del lecho filtrante. Se mantiene una velocidad constante aumentando la presión a medida que aumenta el espesor de la torta. El caudal de aire que atraviesa el filtro de mangas es de 1000 m<sup>3</sup>/h.

El filtro de mangas (E-2) está formado por mangas de fibra sintética de alta porosidad. Las mangas servirán de soporte para el lecho filtrante aumentando la eficiencia de la filtración de forma progresiva.

La tela será del tipo fieltro debido al sistema de limpieza pulse-jet. Se selecciona una tela de polyester de 16 onzas, con un espesor de 0,2", diámetro de 4,5" y longitud de 60", considerando la bolsa como un cilindro mucho más largo que ancho.

El polyester (dacrón) se caracteriza por su buena resistencia a materiales ácidos y básicos además de buena flexibilidad, lo cual lo dota de una buena estabilidad frente a la abrasión.

Las dimensiones del filtro de mangas son 3,8 m de alto, 0,75 m de ancho y 0,75 m de largo y estará formado por 40 mangas en total. Opera en continuo, y la limpieza se produce mediante pulsos de aire comprimido (100 ms) cada 3 minutos desde toberas situadas en la parte superior de las mangas reguladas por un programador de ciclos.

El área total de filtración es:

$$A = \left( \frac{\pi \cdot \emptyset^2}{4} + \pi \cdot \emptyset \cdot L \right) \cdot n_{mangas} = \left( \frac{\pi \cdot 0,127^2}{4} + \pi \cdot 0,127 \cdot 1,524 \right) \cdot 40 \\ = 24,83 \text{ m}^2$$

FILTRO DE MANGAS PULSE-JET (E-2)	
Alto	3,8 m
Ancho	0,75 m
Largo	0,75 m
Nº mangas	40
Material	Carcasa de acero AISI 202, mangas polyester 16 onzas.

Tabla 43: Características Filtro de mangas. Fuente: Elaboración propia.

Las partículas depositadas en la superficie de las mangas se desprenden y son recogidas en el fondo de la tolva de descarga, descargándose mediante un tornillo sin-fin y una válvula rotatoria. El aire una vez filtrado se vierte a la atmósfera.

Un tornillo sin-fin, arrastra las partículas de chatarra hacia un elevador de cangilones que eleva las partículas, y después se descargan distribuyéndose entre dos silos de almacenamiento.

Dichos silos de sección cilíndrica y parte inferior cónica permiten una capacidad de 245 t.

$$\text{Capacidad silos} = 35 \frac{tn}{día} \cdot 14 \text{ día} = 490 \text{ tn} \cdot 1,041 \frac{m^3}{t} = 510,4 \text{ m}^3$$

Cada uno posibilita el aprovisionamiento de chatarra para una semana de operación de la planta. Están construidos con acero inoxidable 304 ya que es más resistente y duradero que el acero al carbono, y se fijarán sobre cuatro pilares.

En la parte inferior cónica, la descarga de partículas de chatarra LCD está controlada por una

 <b>Universidad de Granada</b> <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

válvula rotativa metálica. Tiene capacidad para dosificar 2 t/h a un circuito de impulsión por transporte neumático en fase fluida que traslada la chatarra de LCD pulverizada hasta el Área 200 donde se llevara a cabo su lixiviación.

Las partículas de chatarra se mantienen suspendidas en una corriente de aire de 25 m/s ( $U_g$ ) por una tubería de 85 mm de diámetro interno recorriendo 24 m hasta un ciclón de descarga sobre un depósito de proceso.

La soplante genera una presión de 5 atm con una pérdida de carga de 0,50 atm, transportando un volumen de aire de 500 m<sup>3</sup>/h, siendo la relación de carga ( $\mu=W_s/W_g$ ) igual a 3. De esta manera se posibilita transportar 1500 kg/h. La potencia requerida por la soplante es 5,22 kW.

SOPLANTE	
<b>Presión</b>	5 atm
<b>Pérdida de carga</b>	0,5 atm
<b>Caudal</b>	500 m <sup>3</sup> /h
<b>Fluido transportado</b>	Aire
<b>Capacidad</b>	1500 kg/h
<b>Potencia</b>	5,22 kW

Tabla 44: Características soplante. Fuente: Elaboración propia.

### • ÁREA 200: Lixiviación

Está ubicada dentro de la nave de proceso y está compuesta por: un ciclón convencional Lapple que capta la chatarra transportada neumáticamente, tolva de proceso, dos tanques de lixiviación y un filtro de prensa para separar la chatarra de LCD agotada.

El ciclón (E-3) está construido en acero inoxidable AISI 304 y trabaja descargando las partículas de 150 µm en un colector, la eficacia de la separación es del el 99 %.

Para calcular el diámetro del ciclón se selecciona una velocidad de entrada de 25 m/s. Las otras dimensiones se relacionan con el diámetro para cada familia de ciclones. Para el cálculo del área del ducto de entrada:

$$\text{Área ducto entrada} = \frac{Q}{V_i} = \frac{0,14}{25} = 0,0056 \text{ m}^2$$

$$\text{Área ducto entrada} = a \cdot b$$

Para un ciclón Lapple:

- Altura de entrada al ciclón:

$$a = 0,5 \cdot D_c$$

- Ancho de entrada al ciclón:

$$b = 0,25 \cdot D_c$$

$$a \cdot b = 0,5 \cdot D_c \cdot 0,25 \cdot D_c = 0,0056$$



$$D_c = \sqrt{\frac{0,0056}{0,125}} = 0,2117 \text{ m}$$

El resto de dimensiones se obtienen en base a las proporciones anteriores (ver Ilustración 29):

Parámetro	Nomenclatura	Proporción (Lapple)	Dimensión (m)
Diámetro del ciclón	D <sub>c</sub> /D <sub>c</sub>	1,0	0,211
Altura de entrada	a/D <sub>c</sub>	0,5	0,106
Ancho de entrada	b/D <sub>c</sub>	0,25	0,053
Altura de salida	S/D <sub>c</sub>	0,625	0,132
Diámetro de salida	D <sub>s</sub> /D <sub>c</sub>	0,5	0,106
Altura parte cilíndrica	h/D <sub>c</sub>	2,0	0,423
Altura parte cónica	z/D <sub>c</sub>	2,0	0,423
Altura total ciclón	H/D <sub>c</sub>	4,0	0,847
Diámetro salida partículas	B/D <sub>c</sub>	0,25	0,053

Tabla 45: Características del ciclón Lapple. Fuente: Elaboración propia.

Las partículas al dirigirse hacia las paredes del ciclón, perderán su energía y caerán a un colector situado en la parte inferior del cuerpo. Tras su paso por el ciclón, la chatarra queda depositada en una tolva de proceso, mientras que la corriente de aire purificado se libera a la atmósfera.

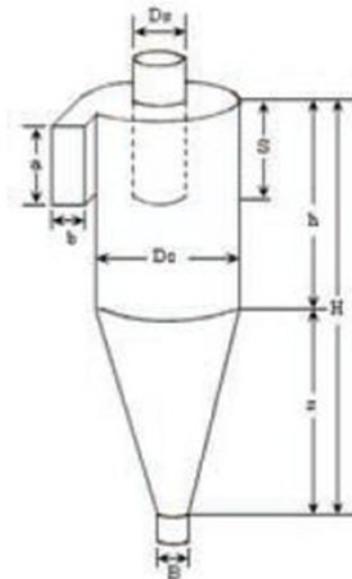


Ilustración 42: Dimensiones de un ciclón.

Fuente: Desconocida

La chatarra de pantalla de cristal líquido recolectada por el colector es descargada en una tolva de proceso con una capacidad de 25 m<sup>3</sup> y mediante una válvula rotatoria se controla la cantidad de chatarra suministrada a los tanques de lixiviación en cada carga.

La sección superior cuadrada presenta las siguientes dimensiones: 3,5 m de largo y 3,5 m de ancho. Además la tolva está provista con un sensor de nivel que impide que se supere una carga de

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

20 m<sup>3</sup>.

La parte inferior es un tronco de pirámide que debe tener un volumen de 6,625 m<sup>3</sup>, sabiendo que el lado de la sección inferior de descarga mide 0,3 m, la sección superior presenta un área de 12,25 m<sup>2</sup> (A<sub>s</sub>) y la inferior 0,09 m<sup>2</sup> (A<sub>i</sub>) siendo la altura resultante:

$$\begin{aligned}
V(m^3) &= 6,625 = (A_s + A_i + \sqrt{A_s} + \sqrt{A_i}) \cdot \frac{h}{3} \\
&= (12,25 + 0,09 + \sqrt{12,25} + \sqrt{0,09}) \cdot \frac{h}{3} \\
h(m) &= \frac{6,625 \cdot 3}{(12,25 + 0,09 + \sqrt{12,25} + \sqrt{0,09})} = 1,23 \text{ m}
\end{aligned}$$

Una válvula rotativa dosifica las cargas a la batería de dos reactores de lixiviación en serie (E-4 y E-5), operando en régimen discontinuo. Cada uno de los cuales posee una capacidad para alojar una cantidad de 6375 litros de solución de lixiviación (solución acuosa de ácido clorhídrico 6M) además de 7 toneladas de chatarra de pantalla de cristal líquido (LCD).

En ambos lixiviadores extraemos sucesivamente el metal indio presente en las partículas de chatarra de cristal líquido mediante tratamiento de ácido clorhídrico 6M transportado mediante tuberías de PVC desde el tanque de alimentación de ácido (E-15) donde se almacena.

La chatarra de pantalla de cristal líquido entra desde la válvula rotativa por la parte superior del reactor tras la apertura de un cierre hermético.

La relación S/L en los reactores es 1/2, de este modo necesitamos utilizar 7000 kg de disolución de HCl 6M. El volumen del reactor de lixiviación requerido, viene definido por la suma de los volúmenes tanto del sólido como la disolución ácida mayorado por un factor de 1,25:

$$\begin{aligned}
\text{capacidad tanque} &= \left( 6,375 \text{ m}^3 \text{ HCl} + 7000 \text{ kg LCD} \cdot \frac{1}{960} \frac{\text{m}^3}{\text{kg LCD}} \right) \cdot \frac{100}{80} \\
&= 17,1 \text{ m}^3 = 4517,3 \text{ galones}
\end{aligned}$$

$$\text{temperatura de operación} \approx 25^\circ\text{C}$$

$$\text{tiempo de residencia} = 4 \text{ horas}$$

Ambos tanques cuentan con un sistema de agitación compuesto por un agitador movido mediante un motor eléctrico. Se trata de tanques encamisados y caldeados a una temperatura idónea para facilitar la reacción del ácido clorhídrico con el indio presente en la chatarra (aproximadamente 25°C). Por otro lado es preciso evitar una temperatura excesiva que conduciría a la formación de vapores nocivos de ácido clorhídrico.

El lixiviado pasa del primer reactor (E-4) al segundo reactor (E-5) tras 4 horas de operación y de éste al tanque de recirculación de lixiviado (E-17). Mientras que la solución permanece en un tanque el otro es vaciado de chatarra y limpiado como preparación para la siguiente carga. Se han programado 5 contactos de 4 horas y media al día, donde 4 horas corresponden al tiempo de residencia en el reactor, 15 minutos corresponden a la descarga y otros 15 minutos a la carga de lixiviado. La solución empleada en la lixiviación repite este proceso hasta que es agotada una parte del ácido clorhídrico utilizado.

Este proceso de lixiviación y recirculación dura 11 días, tras lo cual, continua con la fase de



purificación.

Para dimensionar los reactores, en primer lugar se calcula su diámetro. Teniendo en cuenta que el reactor está formado por dos partes, una es el cilindro (la parte mayor), y la otra es la parte abombada que comprende las partes superior e inferior. Así que la expresión utilizada para encontrar el diámetro interior es:

$$D = \sqrt[3]{\frac{V}{\frac{\pi}{4} \cdot 1,5 + \frac{\pi}{12}}} = \sqrt[3]{\frac{17,1}{\frac{\pi}{4} \cdot 1,5 + \frac{\pi}{12}}} = 4,05 \text{ m}$$

Para el cálculo de la altura del reactor se ha utilizado la relación:

$$H = 1,5 \cdot D = 1,5 \cdot 4,05 = 6,08 \text{ m}$$

Estos valores son las dimensiones generales del reactor.

Con respecto a los materiales, están fabricados en acero recubierto de caucho. Este recubrimiento impide el ataque del ácido clorhídrico ionizado.

LIXIVIADOR (E-4 y E-5)	
<b>Diámetro</b>	4,05 m
<b>Altura</b>	6,08 m
<b>Capacidad</b>	17,1 m <sup>3</sup>
<b>T<sup>a</sup> operación</b>	25°C
<b>Tiempo de residencia</b>	4 horas

Tabla 46: Características lixiviadores. Fuente: Elaboración propia.

La solución procedente de los lixiviadores se conduce hasta un filtro de placas (E-6) donde se eliminan las partículas de chatarra de pantalla de cristal líquido. Este filtro de placas tiene unas dimensiones de 4,6 m de alto, 5 m de ancho y 5,24 m de largo. Está construido en estructura de acero AISI 316. Cuenta con 40 placas construidas en polipropileno. Tiene una potencia de 11 kW.

Las placas tienen unas dimensiones de 1,2 m x 1,2 m de área por 0,05 m de espesor. Es posible el cálculo del volumen de la cámara y de la capacidad del filtro mediante:

$$\text{Capacidad} = V_{camara} \cdot n_{placas}^o = 1,2 \text{ m} \cdot 1,2 \text{ m} \cdot 0,05 \text{ m} \cdot 40 \text{ placas} = 2,88 \text{ m}^3$$

FILTRO DE PLACAS (E-6)	
<b>Altura</b>	4,6 m
<b>Longitud</b>	5,24 m
<b>Anchura</b>	5 m
<b>Material estructura</b>	Acero AISI 316
<b>Número placas</b>	40
<b>Dimensiones placas</b>	1,2x1,2x0,05 (en m)
<b>Capacidad total</b>	2,88 m <sup>3</sup>
<b>Material placas</b>	Polipropileno
<b>Potencia</b>	11 kW

Tabla 47: Características filtro de placas. Fuente: Elaboración propia



#### • ÁREA 300: Purificación

Una vez el lixiviado alcanza una concentración de 50 g In/L continúa el proceso hasta la fase de purificación.

En ésta se conduce el lixiviado hasta un evaporador (E-7) donde la solución de ácido clorhídrico, empleada para la lixiviación del metal presente en la chatarra, se separa del deseado cloruro de indio.

Dicho evaporador se trata de un evaporador de tubos horizontales que utiliza vapor de agua como agente de calefacción. Consiste en un recipiente cerrado, en cuyo fondo hay tubos horizontales por donde circula el agente calefactor.

El condensado se purga por el otro extremo del haz de tubos. Las ventajas de este evaporador son su bajo coste y su fácil instalación. Suelen emplearse con líquidos poco viscosos que no formen espumas ni incrustaciones.

La cámara de calefacción está formada por los tubos horizontales, soportados por dos placas. El vapor entra en los tubos y se condensa al ceder su calor de condensación. Puede quedar vapor no condensable, que se elimina mediante una purga.

La cámara de evaporación formada por un cuerpo cilíndrico vertical, cerrado por las bases, con una salida para el disolvente evaporado por la parte superior y otra salida para la disolución concentrada en la parte inferior.

Estos evaporadores suelen ser de chapa de acero o hierro con un diámetro aproximado de entre 2 y 3 metros de altura.

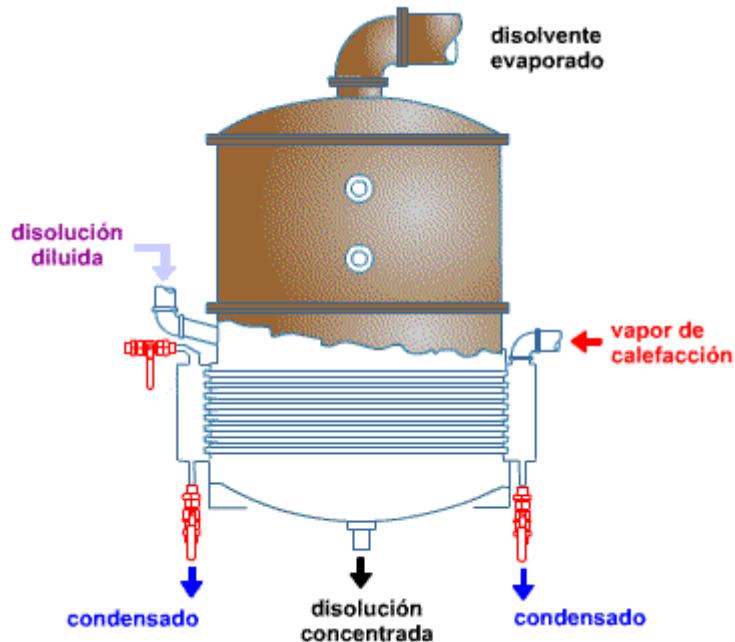


Ilustración 43: Evaporador de tubos horizontales

El diámetro de los tubos acostumbra a ser de 2 a 3 centímetros.

Se parte de un volumen de lixiviado de  $6,375 \text{ m}^3$  y suponiendo que este volumen representa un



80% de la capacidad total del evaporador. Tenemos que dicho evaporador debe ser capaz de albergar 7,969 m<sup>3</sup>.

En este caso para calcular las dimensiones aproximadas del evaporador hacemos uso de las siguientes relaciones geométricas (para geometría cilíndrica):

$$D = \sqrt[3]{\frac{V}{\frac{\pi}{4} \cdot 1,5 + \frac{\pi}{12}}} = \sqrt[3]{\frac{7,97}{\frac{\pi}{4} \cdot 1,5 + \frac{\pi}{12}}} = 2,35 \text{ m}$$

$$H = 1,5 \cdot D = 1,5 \cdot 2,35 = 3,53 \text{ m}$$

$$\text{Tiempo residencia} = 60 \text{ min}$$

Por tanto las características aproximadas de este equipo se reflejan en la siguiente tabla:

EVAPORADOR (E-7)	
Tipo	Tubos horizontales
Temperatura op.	373 K
Área intercambio	300 ft <sup>2</sup>
Altura	3,53 m
Diámetro	2,35 m
Diámetro de tubos	3 cm
Material estructura	Carcasa y cámara evaporación acero recubierto de caucho, tubos con superficie de vidrio
Capacidad total	8 m <sup>3</sup>
Presión interna Máx.	150 psi

Tabla 48 : Características del evaporador. Fuente: Elaboración propia

La disolución concentrada en cloruro de indio que abandona el evaporador por su salida inferior y se bombea hasta el siguiente equipo, un vaporizador (E-8), donde tendrá lugar una destilación fraccionada de los dos compuestos presentes en la disolución. Ambos compuestos, cloruro de indio y cloruro de estaño tienen distintos puntos de ebullición (673 y 573 K, respectivamente).

El evaporador trabaja por cargas, y la disolución concentrada de cloruro de indio y de cloruro de estaño tiene un volumen de 154 L. Aproximada una densidad para la mezcla de 4 g/cm<sup>3</sup>.

$$\text{temperatura operación} = 573 - 673 \text{ K}$$

$$\text{tiempo residencia} = 90 \text{ min}$$

VAPORIZADOR (E-8)	
Tipo	Tubos horizontales
Temperatura op.	373 K
Área intercambio	150 ft <sup>2</sup>
Altura	1 m
Diámetro	0,65 m
Diámetro de tubos	2 cm
Material estructura	Carcasa acero, tubos con superficie

 <b>Universidad de Granada</b> <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

	de vidrio
<b>Capacidad total</b>	$0,4 \text{ m}^3$
<b>Presión interna Máx.</b>	150 psi

Tabla 49: Características del vaporizador. Fuente: Elaboración propia.

En la primera fase, se produce la vaporización del cloruro de estaño(IV) a 573 K el cual se dirigirá a un lavador de gases para inertizarlo. A continuación, se eleva la temperatura en el vaporizador hasta los 673 K produciéndose la vaporización del cloruro de indio(III). Por su parte, este vapor de cloruro de indio(III) se conduce hasta un tanque de neutralización donde es burbujeado en una solución acuosa de hidróxido sódico al 20% en peso.

El neutralizador se trata de un tanque de burbujeo con capacidad para 1750 L de disolución alcalina. En éste tendrá lugar la reacción de obtención de hidróxido de indio(III):



Las dimensiones generales del neutralizador (E-9) se obtienen mediante las siguientes relaciones geométricas:

$$D = \sqrt[3]{\frac{V}{\frac{\pi}{4} \cdot 1,5 + \frac{\pi}{12}}} = \sqrt[3]{\frac{1,75}{\frac{\pi}{4} \cdot 1,5 + \frac{\pi}{12}}} = 1,21 \text{ m}$$

$$H = 1,5 \cdot D = 1,5 \cdot 1,21 = 1,82 \text{ m}$$

NEUTRALIZADOR (E-9)	
<b>Diámetro</b>	1,20 m
<b>Altura</b>	1,80 m
<b>Capacidad</b>	1750 L
<b>Material</b>	Acero inoxidable
<b>T° operación</b>	20°C
<b>Tiempo de residencia</b>	4 horas

Tabla 50: Características del neutralizador. Fuente: elaboración propia.

La solución del tanque tras el burbujeo de la totalidad del vapor de cloruro de indio(III) y la formación de hidróxido de indio(III) insoluble se bombea hasta un filtro vertical de hojas (E-10). En este filtro de hojas tiene lugar la separación del hidróxido de indio(III) de la solución.

FILTRO DE HOJAS (E-10)	
<b>Diámetro</b>	0,75 m
<b>Altura</b>	1,12 m
<b>Área filtrante</b>	10 m <sup>2</sup>
<b>Capacidad</b>	9 t solución/h
<b>Volumen torta</b>	150 L
<b>Presión op.</b>	0,1 – 0,4 MPa
<b>Material</b>	Estructura en acero inoxidable

Tabla 51: Características del filtro de hojas. Fuente: Elaboración propia.



La cantidad de  $\text{In(OH)}_3$  recuperado es de 460377 g y puesto que la densidad del  $\text{In(OH)}_3$  es de 4,38 g/cm<sup>3</sup>, el volumen de la torta es aproximadamente 105 L.

El hidróxido de indio insoluble recuperado en el filtro de hojas es alimentado a un tanque de acidificación (E-11) con capacidad para 4165 L de HCl 3M. Este volumen de ácido se bombea desde el depósito, E-16, de HCl 3 M

$$\text{capacidad tanque} = 3,332 \text{ m}^3 \cdot \frac{100}{80} = 4,165 \text{ m}^3 = 1100 \text{ galones}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{V}{\frac{\pi}{4} \cdot 1,5 + \frac{\pi}{12}}} = \sqrt[3]{\frac{4,165}{\frac{\pi}{4} \cdot 1,5 + \frac{\pi}{12}}} = 1,64 \text{ m}$$

$$H = 1,5 \cdot D = 1,5 \cdot 1,64 = 2,46 \text{ m}$$

ACIDIFICADOR (E-11)	
<b>Diámetro</b>	1,64 m
<b>Altura</b>	2,46 m
<b>Capacidad</b>	4,16 m <sup>3</sup>
<b>T<sup>a</sup> operación</b>	20°C
<b>Tiempo de residencia</b>	2 horas

Tabla 52: Características del acidificador. Fuente: Elaboración propia.

Tras su paso por el tanque de acidificación el hidróxido de indio(III) insoluble se transforma en cloruro de indio(III) soluble. Esta solución resultado de la acidificación se bombea hasta una celda de electroobtención (E-12). Ésta tiene por objeto realizar una precipitación, selectiva por medio de电解的 del elemento deseado, en este caso el indio metálico presente en la forma de cloruro de indio(III).

La precipitación por reducción electrolítica es actualmente uno de los procedimientos más sencillos para recuperar metales en forma pura y selectiva, respecto a las impurezas existentes en solución. Su característica principal radica en que el metal ya está en la solución y solamente se trata de recuperarlo depositándolo en el cátodo, mientras el ánodo es esencialmente insoluble.

En la actualidad tiene una gran importancia económica, al permitir el beneficio de recursos lixiviados, tanto en oro, como cobre, plata, etc., cuyo tratamiento por otras vías resultaría económicamente inviable.

Calculamos el área total requerida para que se produzca la deposición total del indio presente en la solución. A través de esta área estimaremos las dimensiones de la celda y el tamaño de la fuente de poder.

Fijada la producción diaria en 343 kg.

$$m_F = \frac{M \cdot I \cdot \eta_c \cdot t \cdot A_t}{n \cdot F}$$

donde  $m_F$  es la masa depositada (g)

$M$  el peso molecular del metal depositado

$n$  la valencia del ion metálico en la solución

$F$  la constante de Faraday (96487 C/equivalente)

$I$  la corriente que circula (A)

$t$  el tiempo de operación de la electrolysis (s)

 <b>Universidad</b> <b>de Granada</b>  <b>Facultad de</b> <b>Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

At el área total expuesta a la depositación ( $m^2$ )

$$A_t = \frac{m_F \cdot n \cdot F}{t \cdot M \cdot I \cdot \eta_c} = \frac{343000 \cdot 3 \cdot 96487}{86400 \cdot 114,82 \cdot 1000 \cdot 0,9} = 11,12 m^2$$

Consumo específico de energía en el paso de electroobtención:

$$CE \left( \frac{kWh}{kg} \right) = \frac{V_{cel}(V) \cdot \frac{I(A)}{\eta} \cdot t(h)}{1000 \cdot m_F(kg)} = \frac{6 \cdot \frac{1000}{0,9} \cdot 24}{1000 \cdot 343} = 0,47 \frac{kWh}{kg In} = 470 \frac{kWh}{tn In}$$

Consumo de energía eléctrica =  $0,47 \cdot 343 = 160 \text{ kWh}$

Lo primero es estimar el número de celdas que se necesitan, estas dependerán de nuestra configuración de cátodos por celda.

$$N_{celdas} = \frac{A_t}{N_{cat} \cdot A_c \cdot 2}$$

$$N_{cat} = \frac{A_t}{N_{celdas} \cdot A_c \cdot 2} = \frac{11,12}{1 \cdot 1 \cdot 2} = 5,6 \cong 6$$

donde  $N_{celdas}$  es el número de celdas en la nave

At el área total de depositación ( $m^2$ )

$N_{cat}$  el número de cátodos por celda

$A_c$  el área por cátodo, la deposición tiene lugar por ambos lados ( $m^2$ )

Habitualmente la electroobtención se lleva a cabo en celdas típicas de 6 a 8 m de largo, 1 a 1,5 m de ancho y de 1 a 1,5 m y medio de profundidad, siendo el volumen habitual de una de estas celdas igual a  $10 \text{ m}^3$ .

Se utilizan ánodos y cátodos laminares de aproximadamente  $1 \text{ m}^2$  de superficie por lado y se colocan de manera alternada en el interior de la celda. La distancia entre ánodo y cátodo, que normalmente fluctúa alrededor de los 45 mm, busca disminuir al máximo la caída de tensión que se produce por la resistencia del electrólito, pero manteniendo una distancia suficiente para evitar cortocircuitos.

- Ancho de la celda, viene dado por:
  - Ancho del electrodo (1 m)
  - Distancia del electrodo a la pared (0,1 m)
  - Ancho de la pared de la celda (0,1 m por lado)

$$\text{Ancho de celda} = An_{elect} + d_{e-p} \cdot 2 + An_{pared} \cdot 2$$

$$\text{Ancho de celda} = 1 + 0,1 \cdot 2 + 0,1 \cdot 2 = 1,4 \text{ m}$$

- Largo de la celda, viene dado por:
  - Número de cátodos más 1 (debido a que existe un ánodo más que cátodo).
  - Número de ánodos
  - Ancho del cátodo (0,015 m)
  - Ancho del ánodo (0,001 m)
  - Distancia entre ánodos y cátodos (0,1 m)

 <b>Universidad de Granada</b> <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

- Ancho de las paredes de la celda (0,1 m por lado)

$$\textbf{Largo de celda} = N_{cat} \cdot An_{cat} + N_{an} \cdot An_{an} + N_{cat} \cdot d_{a-c} + 0,2$$

$$\text{Largo de celda} = 6 \cdot 0,015 + 7 \cdot 0,001 + 6 \cdot 0,1 + 0,2 = 0,897 \cong 1 \text{ m}$$

La altura de la celda es tal que permita alojar la totalidad de la solución electrolítica, así pues:

$$\text{capacidad celda} = 3,332 \text{ m}^3 \cdot \frac{100}{80} = 4,165 \text{ m}^3$$

$$h = \frac{4,16 \text{ m}^3}{1,4 \text{ m}^2} = 2,97 \text{ m} \approx 3 \text{ m}$$

CELDA DE ELECTROOBTENCIÓN (E-12)	
<b>Altura</b>	3 m
<b>Anchura</b>	1,4 m
<b>Longitud</b>	1 m
<b>Material</b>	Estructura acero AISI 316, cátodo de acero inoxidable y ánodo de grafito
<b>Nº cátodos</b>	6 (acero inoxidable)
<b>Nº ánodos</b>	7 (grafito)

Tabla 53: Características celda de electroobtención. Fuente: Elaboración propia.

#### • ÁREA 400: Fusión y moldeo

El metal indio depositado en los cátodos es recuperado y transportado mediante un secador de tornillo (E-13) hasta el área 400, donde una vez desprovisto de gran parte del agua es alimentado a un horno de fusión (E-14).

Las características del secador de tornillo mencionado se muestran en la siguiente tabla:

SECADOR DE TORNILLO (E-13)	
<b>Diámetro (tornillo)</b>	0,48 m
<b>Longitud (tornillo)</b>	10 m
<b>Distancia cubierta-eje</b>	0,40 m
<b>Velocidad tornillo</b>	16 rev/min
<b>Potencia del motor</b>	9,5 kW
<b>Material</b>	Acero inoxidable
<b>Humedad inicial</b>	9%
<b>Humedad final</b>	0,1%
<b>T° entrada sólidos</b>	20°C
<b>T° salida sólidos</b>	100°C
<b>Pot. consumida</b>	410 KWh / t. producto
<b>Capacidad tratamiento</b>	250 kg sólido seco / h

Tabla 54: Características secador de tornillo. Fuente: Elaboración propia.



En la fusión se incluyen, además del cambio de estado, el calentamiento posterior del metal hasta alcanzar la temperatura específica conocida como temperatura de colada, si el metal debe verterse dentro de un molde, o temperatura de trabajo si el metal debe emplearse como capa de recubrimiento o como baño líquido de calentamiento.

Las temperaturas de colada de los metales y aleaciones no ferreas oscilan entre 100 y 200°C por encima del punto de fusión, variando para cada metal o aleación con el tipo de carga y con las dimensiones y tipo de colada según la finalidad a la que se destine la misma.

En la fusión de metales se produce una cierta pérdida de material por volatilización. Esta pérdida de material es generalmente despreciable.

A menudo es necesario agitar una aleación en estado fundido para evitar que se produzcan segregaciones. La agitación constituye también un medio para la igualación de las temperaturas y para evitar el sobrecalentamiento de la superficie de la masa fundida. Mediante bobinas de inducción adecuadas o utilizando un horno de inducción puede obtenerse una agitación automática.

La fusión de metales blandos y sus aleaciones puede conseguirse mediante el equipo de calentamiento de resistencias de aleación 80 Ni – 20 Cr. Los contenedores para estos materiales pueden ser crisoles, calderos de galvanizado, tanques, etc.

Los crisoles de fusión son de fundición de hierro o de acero moldeado y de varias aleaciones no ferreñas. La elección del tipo de material del crisol depende de la temperatura del metal fundido y las posibles reacciones de este metal con el material del crisol.

Se usan crisoles abiertos, de los que el material fundido se saca por decantación o bombeo. Es conveniente disponer de una profundidad de metal fundido superior a la necesaria para el servicio, para ayudar al aumento de temperatura cuando se añade metal frío.

Los crisoles cerrados tienen la ventaja de reducir la pérdida de calor que se produce en la superficie del metal fundido y de reducir la oxidación; además se dispone de espacio para una atmósfera protectora. Algunos hornos poseen un sistema de descarga del metal fundido mediante gas a presión, por ejemplo, vapor.

El aislamiento térmico de un crisol de fusión de metales debe ser suficiente para que la temperatura de la superficie exterior quede reducida a un valor seguro; por otra parte, el aislamiento térmico cuesta dinero. Como norma no es necesario utilizar una capa de material refractario a temperaturas inferiores a 600°C. Una capa refractaria es útil para mantener una temperatura uniforme en el metal.

En la Ilustración 31 puede verse una representación de las pérdidas de calor en función de la temperatura de los crisoles de fusión abiertos normales. Esta pérdida puede reducirse mediante una capa de material aislante granular, por ejemplo, carbón vegetal o tierra de diatomeas sobre la superficie del metal. Esta capa reduce también la oxidación del metal.

El equipo de regulación de temperatura de los crisoles es el mismo que se emplea en los hornos de resistencia. Como norma, los crisoles pequeños de 5 kW y menores sólo poseen control manual mediante un interruptor de dos o tres posiciones.

La velocidad de fusión de un crisol viene determinada por el tiempo necesario para que el metal fundido alcance de nuevo la temperatura de vertido o de trabajo después de la adición de una cantidad de metal frío.

La potencia necesaria en un crisol viene determinada por la velocidad necesaria para fundir un metal o aleación dada. En nuestro caso la potencia necesaria será la suma de la necesaria para la fusión, la necesaria para calentar el material base y para compensar la potencia que se pierde en forma de calor. Como norma, la potencia es algo superior para poder acelerar el calentamiento y



para evitar un descenso excesivo de la temperatura cuando se añade el metal frío. El rendimiento de un crisol no depende de su potencia.

Nos decantamos por el uso de un horno tipo crisol por quedar la carga totalmente aislada y cumplir los requerimientos de capacidad y de energía, tengamos en cuenta que se trata de un metal con bajo punto de fusión.

Las características del horno vienen descritas en la siguiente tabla:

HORNO DE CRISOL FIJO (E-14)	
Altura	1,4 m
Anchura	1,2 m
Longitud	1,3 m
Material	Interior en fibra cerámica y ladrillo refractario.
Potencia	32 kW

Tabla 55. Características horno de crisol. Fuente: Elaboración propia.

#### • ÁREA 500: Control de producción

La sala estará equipada con todos los equipos informáticos necesarios para poder realizar la vigilancia y el control de todo el proceso de fabricación del ácido sulfúrico.

Además de los controladores lógicos programables (PCL) la sala de control contará con los armarios en los que se ubicarán las cajas de conexión.

#### • ÁREA 600: Almacenamiento de reactivos y taller de mantenimiento

El área 600 alberga los tanques de almacenamiento de ácido clorhídrico. Dichos tanques son dos, el tanque de almacenamiento de ácido clorhídrico 6M, E-15, y el tanque de almacenamiento de ácido clorhídrico 3M, E-16.

El tanque de almacenamiento de ácido clorhídrico 6M está construido en acero recubierto de caucho, se ha provisto de una válvula a su salida para controlar el paso de ácido clorhídrico fresco a la bomba que impulsará dicho ácido hasta el reactor de lixiviación, E-4.

Para el cálculo de la capacidad de este tanque consideramos la cantidad total de ácido clorhídrico necesario para el paso de lixiviación (6375 L). También se tiene en cuenta que el nivel de ácido no debe superar el 80% de la capacidad total del tanque de almacenamiento.

$$\text{capacidad del tanque} = 6375 \text{ L} \cdot \frac{100}{80} = 7969 \text{ L} = 2105 \text{ galones}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{V}{\frac{\pi}{4} \cdot 1,5 + \frac{\pi}{12}}} = \sqrt[3]{\frac{7,97}{\frac{\pi}{4} \cdot 1,5 + \frac{\pi}{12}}} = 1,77 \text{ m}$$

$$L = 1,5 \cdot D = 1,5 \cdot 1,77 = 2,65 \text{ m}$$

Se tratará por tanto de un tanque cilíndrico dispuesto horizontalmente de 2,65 m de largo y 1,77 m de diámetro montado sobre una estructura de hormigón.

El tanque E-16 consiste en un tanque de 1100 galones donde se almacena el ácido clorhídrico 3M que se bombeará al acidificador, E-11.

Para el cálculo de la capacidad de este tanque consideramos las necesidades de ácido clorhídrico 3M necesario para el proceso de disolución del indio presente en el hidróxido de indio en ácido clorhídrico. También tendremos en cuenta que los tanques se dimensionan para que en su llenado no superen el 80% de su capacidad.



$$\text{capacidad del tanque} = 3332 \text{ L} \cdot \frac{100}{80} = 4165 \text{ L} = 1100 \text{ galones}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{V}{\frac{\pi}{4} \cdot 1,5 + \frac{\pi}{12}}} = \sqrt[3]{\frac{4,17}{\frac{\pi}{4} \cdot 1,5 + \frac{\pi}{12}}} = 1,43 \text{ m}$$

$$L = 1,5 \cdot D = 1,5 \cdot 1,43 = 2,13 \text{ m}$$

Por tanto, al igual que el tanque de almacenamiento de ácido clorhídrico 6M tendrá geometría cilíndrica y disposición horizontal. Sus dimensiones serán 2,13 m de largo y 1,43 m de diámetro e irá montado sobre una estructura de hormigón.

Para la fabricación de ambos tanques se utilizará acero con recubrimiento de caucho, depositado homogéneamente sobre el metal; dichos depósitos son de una gran resistencia y tenacidad. Se emplean varios cementos, tales como derivados sulfonados del caucho, obtenidos amasando, con los molinos de rodillos propios de la industria del caucho, ácido sulfúrico y goma.

- **ÁREA 700: Almacenamiento de chatarra**

El área de almacenamiento de chatarra abarca un área de  $72 \text{ m}^2$ . En esta zona se almacenan, en forma de pila, la chatarra de pantalla LCD procedente de los gestores de residuos.

#### 2.2.5.2 Diseño de las instalaciones

- Instalación de agua

El diseño de esta instalación precisa una estimación de la cantidad de agua a utilizar en la planta, tanto para el abastecimiento de los equipos de proceso como para el suministro del agua necesaria en la higiene y el aseo de todo el personal de la planta.

Se distinguen las siguientes redes:

- Red de abastecimiento de agua potable.

El caudal total será la suma de todos los caudales instantáneos mínimos ( $Q_b$ ) servidos por la totalidad de la instalación:  $\sum Q_b$ .

Los valores de los caudales instantáneos mínimos serán los que figuran en la Tabla 2.1 del Documento HS-4 del vigente Código Técnico de la Edificación.

En el presente proyecto se contemplan los siguientes aparatos sanitarios:

Aparato Sanitario	Caudal inst. min. (dm <sup>3</sup> /s)	Nº unidades	Caudal inst. min. total (dm <sup>3</sup> /s)
Grifo de laboratorio	0,20	2	0,40
Lavabo	0,10	3	0,30
Inodoro con cisterna	0,10	3	0,30
Ducha	0,20	2	0,40
Total			1,40

En la estimación del coeficiente de simultaneidad se tendrá en cuenta que se trata de 3 locales húmedos para un uso público. De esta manera, se selecciona un coeficiente de simultaneidad,  $K$ , de 0,85.

Para el cálculo del caudal máximo simultáneo se emplea la siguiente expresión:

$$\sum Q_b \cdot K = Q_c$$



donde  $\Sigma Q_b$  es el sumatorio de los caudales instantáneos mínimos ( $dm^3/s$ )

K es el coeficiente de simultaneidad, adimensional.

$Q_c$  es el caudal de cálculo o caudal simultáneo ( $dm^3/s$ )

Siendo, por tanto, el caudal máximo simultáneo en el distribuidor principal:

$$Q_c = 1,40 \frac{dm^3}{s} \cdot 0,85 = 1,19 \frac{dm^3}{s}$$

- Red de abastecimiento de agua industrial.

Esta instalación abastece a los equipos del proceso que necesitan agua durante su funcionamiento. El agua fría tiene una temperatura de 15°C.

Parte del agua se emplea para producir vapor que se utilizará como fluido de calefacción para los extractores, E-4 y E-5. El vapor también se utiliza en el evaporador, E-7 y en el vaporizador E-8.

Además se utiliza en el filtro de prensa, E-6, para efectuar el lavado de la torta (se estima en un 20% del peso del sólido filtrado). También se suministra a la celda de electroobtención, E-12, para recuperar el volumen de líquido perdido por evaporación, las pérdidas se estiman en un 10% del volumen durante la duración de una carga.

Para el almacenamiento del agua industrial de proceso se utilizan 2 depósitos, F-200 y F-300, a partir de los cuales se abastecerá a cada uno de los equipos que precisan agua para su funcionamiento.

Cada depósito tendrá una capacidad mínima de 6800  $dm^3$ . Se seleccionan dos depósitos con una capacidad de 2000 galones cada uno, en ningún caso superarán el 90% de su capacidad.

- Instalación de fuel-oil

Es necesario el suministro de fuel-oil para alimentar la sala de calderas cuyo vapor será utilizado entre otras cosas para el caldeo de los lixiviadores o las etapas de vaporización y de evaporación.

El diseño y la instalación del depósito de fuel-oil se realizarán según las normas marcadas por el Ministerio de Ciencia y Tecnología.

El depósito tendrá una capacidad de 50000 litros y estará totalmente enterrado. El resto de la instalación de fuel-oil está formada por:

- Bomba que realiza el trasiego del fuel-oil.
- Canalizaciones de llenado, aspiración retorno y ventilación.
- Resistencias eléctricas necesarias para precalentar el combustible y facilitar el trasiego.
- Filtros y válvulas.

La cantidad de combustible necesario se calcula en función del calor que hay que aportar para la obtención de vapor de calefacción para el calentamiento de la solución de lixiviación en los extractores.

$$\dot{Q} = m \cdot c_p \cdot \Delta T = 6375230 \cdot 4,2 \cdot (25 - 15) = 267760 \text{ kJ}$$

 <b>Universidad</b> <b>de Granada</b>  <b>Facultad de</b> <b>Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

Necesidades de calor:

$$Q = \frac{\dot{Q}}{t} = \frac{267760}{600} = 446,3 \text{ kW}$$

Análogamente para las etapas de evaporación y vaporización como ha sido calculado en el *apartado 2.2.4, Balances de materia y de energía*. Sumando todos los términos de necesidades de calor:

$$Q = 446,3 \text{ kW} + 1218,1 \text{ kW} + 0,03 \text{ kW} + 1,45 \text{ kW} = 1665,9 \text{ kW}$$

En primer lugar se calcula la potencia necesaria del generador o de los generadores a instalar:

$$P_c = \frac{Q}{r_c \cdot r_i}$$

donde  $P_c$  es la potencia de la caldera (kW)  
 $Q$  son las necesidades de calor (kW)  
 $r_c$  es el rendimiento de la caldera  
 $r_i$  es el rendimiento de la instalación (mínimo de 0,95)

Para requerimientos caloríficos entre 800 y 2000 kW se considera un rendimiento de la caldera ( $r_c$ ) de 85%. Si consideramos además un rendimiento mínimo de la instalación del 95%, se calcula la potencia de la caldera como:

$$P_c = \frac{1665,9}{0,85 \cdot 0,95} = 2063,01 \text{ kW}$$

Para potencias térmicas nominales a instalar mayores de 400 kW, se instalan dos o más generadores.

Utilizando como combustible fuel-oil líquido, se procede al cálculo del caudal mísico de combustible a quemar:

$$m_c = \frac{P_c}{PCI}$$

donde  $m_c$  es el caudal mísico de fuel-oil (kg/h)  
 $P_c$  es la potencia de la caldera (kcal/h)  
 $PCI$  es el poder calorífico inferior del fuel-oil, es decir 9700 kcal/kg

$$m_c = \frac{1773869,30}{9700} = 182,87 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

El caudal mísico de fuel-oil consumido en el proceso es 494,9 kg/h.

- Instalación de fuerza motriz

Todas las masas recibirán una tensión de 380 V trifásica y con una frecuencia de 50 Hz. Además dichas masas estarán conectadas a un neutro y éste a tierra, con lo que se pretende evitar posibles accidentes.

El material empleado en las líneas principales será el cobre. La línea de acometida estará formada por un conductor tetrapolar que también estará aislado mediante polietileno en tubo de PVC e instalado en una zanja de al menos 1,2 m de profundidad junto a la línea de acometida de alumbrado.

 <b>Universidad de Granada</b> <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

El suministro a las diferentes cargas se realizará mediante una serie de líneas que se explicarán más adelante en la Memoria del Proyecto. Los equipos que necesitan energía eléctrica se especifican en la siguiente tabla:

<b>Equipos</b>	<b>kWh</b>	<b>kWh/t In</b>
Molino de bolas	7,3	-
Soplante	1,75	-
Reactor lixiviación	20	-
Filtro de prensa, E-6	11	-
Filtro de hojas	2	-
Celda electroobtención	-	5190
Secador tornillo	-	410
Horno de fusión	-	32
Impulsión fluidos	10	
Total	52,05	5632

- Instalación de alumbrado

La acometida de la instalación de alumbrado llega hasta el cuadro general. A partir de éste, las líneas se distribuyen hacia los diferentes cuadros de distribución y, a continuación, se dirigen hacia los diversos puntos de consumo con una tensión de suministro de 380 V entre fases y 220 V entre fase y neutro.

En el interior de las naves de producción y de almacenamiento de chatarra se instalarán lámparas de 500 W de potencia.

En el resto de dependencias se instalarán lámparas fluorescentes de tipo luz de día de 60 W. También se dispondrán los puntos de enchufe necesarios en vestuarios, aseos y oficinas.

Para alumbrado exterior se colocarán lámparas de vapor de sodio de 150 W en el perímetro de la nave de proceso, del edificio de oficinas, almacenes y aparcamientos.

Los conductores de las líneas de alumbrado serán de cobre y la instalación bajo tubo metálico con aislamiento interior de PVC.

La protección contra contactos indirectos se realizará mediante interruptores diferenciales de 30 mA de sensibilidad y la protección contra contactos directos mediante interruptores magnetotérmicos.

Las características principales de la red de alumbrado interior son:

<b>Zona</b>	<b>Nº y tipo de luminarias</b>
Almacén de chatarra	4 lámparas de vapor de sodio de alta presión de 500 W
Nave de producción	10 lámparas de vapor de sodio de alta presión de 500 W
Vestuarios y aseos	4 tubos fluorescentes tipo luz día de 60 W
Sala de control	8 tubos fluorescentes tipo luz día de 60 W
Almacén de reactivos	6 tubos fluorescentes tipo luz día de 60 W
Taller mantenimiento	4 tubos fluorescentes tipo luz día de 60 W
Almacén de producto	4 tubos fluorescentes tipo luz día de 60 W
Embalaje	4 tubos fluorescentes tipo luz día de 60 W

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

Control de calidad	10 tubos fluorescentes tipo luz día de 60 W
Dirección	6 tubos fluorescentes tipo luz día de 60 W
Secretaría	3 tubos fluorescentes tipo luz día de 60 W
Administración	3 tubos fluorescentes tipo luz día de 60 W
Responsable comercial	3 tubos fluorescentes tipo luz día de 60 W
Recursos humanos	3 tubos fluorescentes tipo luz día de 60 W
Archivo	3 tubos fluorescentes tipo luz día de 60 W
Oficina almacén	3 tubos fluorescentes tipo luz día de 60 W

Las características que definen la red de alumbrado exterior son:

Zona exterior	Nº y tipo de lámparas
Nave de producción	4 lámparas de vapor de sodio de alta presión de 150 W
Almacenamiento chatarra	3 lámparas de vapor de sodio de alta presión de 150 W
Almacenamiento reactivos	1 lámparas de vapor de sodio de alta presión de 150 W
Mantenimiento	1 lámparas de vapor de sodio de alta presión de 150 W
Oficinas	2 lámparas de vapor de sodio de alta presión de 150 W
Control de calidad	1 lámparas de vapor de sodio de alta presión de 150 W
Aparcamientos	4 lámparas de vapor de sodio de alta presión de 150 W

La potencia total de alumbrado tanto interior como exterior se estima en 13,24 kW.

#### 2.2.5.3 Diagrama de flujo del proceso

El diagrama de flujo del proceso muestra una vista esquemática de las distintas operaciones de las que consta. Se indican las principales corrientes así como los equipos involucrados.

El Diagrama de flujo de la alternativa 2 recibe la denominación de D5.

#### 2.2.5.4 Matriz de actividades

En la matriz de actividades se relacionan las distintas actividades que se van a desarrollar atendiendo a una relación de proximidad. En esta matriz sólo se tendrán en cuenta las actividades principales.

- PROXIMIDAD:

A: Absolutamente necesario.

E: Especialmente importante.

I: Importante.

O: Deseable.

U: No importante.

X: Indeseable.

- JUSTIFICACIÓN:

1: Contacto directo.

2: Conveniencia.

3: Ruido, molestias.

4: Comparte equipo.

La **Matriz de actividades** recibe la denominación D1 y puede encontrarse en el correspondiente cajetín de planos.

#### 2.2.5.5 Diagrama de interrelación de actividades

Este diagrama constituye una representación gráfica de la matriz de actividades.

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

El Diagrama de interrelación de actividades recibe la denominación D2 y puede encontrarse en el correspondiente cajetín de planos.

#### **2.2.5.6 Diagrama de interrelación de espacios**

Al igual que en el Diagrama de interrelación de actividades, el Diagrama de interrelación de espacios constituye una representación gráfica de la matriz de actividades, pero en este caso, además relaciona las actividades con sus necesidades de espacio. Recibe la denominación de D3.

#### **2.2.5.7 Ubicación de la planta. Planos de localización y emplazamiento.**

La planta industrial proyectada se localiza en la calle El Matorral (Parque de Actividades Medioambientales de Andalucía), parcela nº35, Aznalcóllar (Sevilla). Dicha parcela tiene una extensión de 12370 m<sup>2</sup>.

Los planos relativos a la ubicación de la planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantalla de cristal líquido son los siguientes:

- A1. Plano de localización.
- A4. Plano de situación y emplazamiento.

#### **2.2.5.8 Plano de implantación**

El Plano de implantación recibe la denominación de A5, está realizado a escala 1:200.

Este plano muestra una representación de la planta industrial con sus respectivos equipos de proceso e instalaciones principales, así como también del área social o de oficinas.

Muestra asimismo una relación del espacio ocupado por cada una de las actividades divididas en áreas.

### **2.2.6 Estudio económico**

A continuación se analizarán los distintos apartados de costes que posteriormente se mencionarán en el estudio económico financiero, a saber: costes de los equipos del proceso, costes de las instalaciones y costes de fabricación.

#### **2.2.6.1 Costes de los equipos del proceso**

A continuación se muestra la relación de equipos del proceso y sus respectivos costes:

##### **Equipo: Molino cónico de bolas (E-1)**

Diámetro: 0,9 m

Longitud: 1,8 m

Material: carcasa de acero recubierto de caucho, bolas de metal.

Capacidad: 0,65-2 t/h

Potencia: 18,5 kW

Precio: 104.409,85 €

##### **Equipo: Filtro de mangas pulse-jet, de 40 mangas (E-2)**

Alto: 3,8 m

Ancho: 0,75 m

Largo: 0,75 m

 <b>Universidad</b> <b>de Granada</b>  <b>Facultad de</b> <b>Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	ESTUDIO DE VIABILIDAD
---	--	-----------------------

Material: carcasa de acero AISI 202, mangas de polyester de 16 onzas.

Precio: 23.283,89 €

**Equipo: Ciclón (E-3)**

Diámetro: 0,211 m

Altura: 0,847 m

Material de mangas: acero AISI 304.

Precio: 2.124,14 €

**Equipo: Lixiviador encamisado y agitado (E-4 y E-5)**

Diámetro: 4,05 m

Altura: 6,08 m

Material: Acero al carbono recubierto de caucho.

Precio (por las 2 unidades): 165.846,64 €

**Equipo: Filtro de prensa, de 40 placas (E-6)**

Alto: 4,6 m

Ancho: 5 m

Largo: 5,24 m

Material: Estructura acero AISI 316 y placas de polipropileno.

Precio: 252.282,96 €

**Equipo: Evaporador (E-7)**

Tipo: Tubos horizontales

Temperatura operación: 373 K

Área intercambio: 300 ft<sup>2</sup>

Altura: 3,53 m

Diámetro: 2,35 m

Diámetro de tubos: 3 cm

Material estructura: Carcasa acero, tubos con superficie de vidrio, cámara de evaporación con recubrimiento de caucho

Capacidad total: 8 m<sup>3</sup>

Presión interna Máx.: 150 psi

Precio: 105.598,00 €

**Equipo: Vaporizador (E-8)**

Tipo: Tubos horizontales

Temperatura operación: 373 K

Área intercambio: 150 ft<sup>2</sup>

Altura: 1 m

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

Diámetro: 0,65 m

Diámetro de tubos: 2 cm

Material estructura: Carcasa acero, tubos con superficie de vidrio

Capacidad total: 0,4 m<sup>3</sup>

Presión interna Máx.: 150 psi

Precio: 66.822,00 €

**Equipo: Neutralizador (E-9)**

Diámetro: 1,20 m

Altura: 1,80 m

Capacidad: 1750 L

T<sup>a</sup> operación: 20°C

Material: Acero inoxidable.

Precio: 8.066,00 €

**Equipo: Acidificador (E-11)**

Diámetro: 1,64 m

Altura: 2,46 m

Capacidad: 4,16 m<sup>3</sup>

Material: Acero inoxidable recubierto de caucho.

T<sup>a</sup> operación: 20°C

Presión interna Máx.: 150 psi

Tiempo de residencia 2 horas

Precio: 43.808,00 €

**Equipo: Celda de electroobtención (E-12)**

Alto: 3 m

Ancho: 1,4 m

Largo: 1 m

Material: Estructura acero AISI 316, cátodo de acero inoxidable y ánodo de grafito

Precio: 67.340,00 €

**Equipo: Horno de crisol fijo (E-14)**

Alto: 1,4 m

Ancho: 1,2 m

Largo: 1,3 m

Material: Interior en fibra cerámica y ladrillo refractario.

Precio: 7.609,48 €

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

**Equipo: Tanque de recirculado (E-17)**

Diámetro: 1,6 m

Longitud: 3,7 m

Material: Acero al carbono recubierto de caucho.

Precio: 12.418,07 €

**Equipo: Tanque de ácido clorhídrico 6M (E-15)**

Diámetro: 1,77 m

Longitud: 2,65 m

Material: Acero al carbono recubierto de caucho.

Precio: 12.418,07 €

**Equipo: Tanque de ácido clorhídrico 3M (E-16)**

Diámetro: 1,43 m

Longitud: 2,13 m

Material: Acero al carbono recubierto de caucho.

Precio: 8.658,00 €

**Equipo: Secador de tornillo (E-13)**

Diámetro: 0,48 m

Longitud: 10 m

Material: Acero inoxidable.

Precio: 3.070,00 €

**Equipo: Filtro vertical de hojas (E-10)**

Área filtrante: 10 m<sup>2</sup>

Diámetro: 0,75 m

Altura: 1,12 m

Área filtrante: 10 m<sup>2</sup>

Capacidad: 9 t solución/h

Volumen torta: 150 L

Presión operación: 0,1 – 0,4 MPa

Material: Estructura en acero inoxidable.

Precio: 30.000,00 €

**Equipo: Cinta transportadora**

Longitud: 7 m

Material: Acero al carbono.

Precio: 12.254,67 €

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

**Equipo: Elevador de cangilones centrífugo**

Dimensiones: 0,2 m x 0,13 m

Altura: 20 m

Material: Acero al carbono.

Precio: 15.849,38 €

**Equipo: Silo de almacenamiento (2 unidades)**

Capacidad: 275 m<sup>3</sup>.

Dimensiones: 4,6 x 1,26 x 14,86 x 3,705 x 20,725 m (AxBxCxDxE)

Material: Acero recubierto de caucho.

Precio (por las dos unidades): 5.006,44 €

Para un estudio detallado remitirse al apartado técnico. La siguiente tabla resume la relación de equipos fundamentales:

<b>Equipo</b>	<b>Coste unitario</b>	<b>Nº de unidades</b>	<b>Coste Total</b>
Molino cónico de bolas	104.409,85	1	104.409,85
Filtro de mangas	23.283,89	1	23.283,89
Ciclón	2.124,14	1	2.124,14
Lixiviador	82.923,32	2	165.846,64
Filtro de prensa	252.282,96	1	252.282,96
Neutralizador	8.066,00	1	8.066,00
Acidificador	43.808,00	1	43.808,00
Celda electroobtención	67.340,00	1	67.340,00
Horno de crisol fijo	7.609,48	1	7.609,48
Tanque de recirculado	12.418,07	1	12.418,07
Tanque de HCl 6M	12.418,07	1	12.418,07
Tanque de HCl 3M	8.658,00	1	8.658,00
Secador de tornillo	3.070,00	1	3.070,00
Filtro vertical de hojas	30.000,00	1	30.000,00
Cinta transportadora	12.254,67	1	12.254,67
Elevador cangilones	15.849,38	1	15.849,38
Silo	2.503,22	2	5.006,44
<b>COSTE TOTAL DE LOS EQUIPOS</b>			<b>774.445,59 €</b>

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

**El coste total de los equipos asciende a 774.445,59 euros.** El coeficiente de amortización de los equipos es del 8% anual.

#### 2.2.6.2 Costes de las instalaciones

Para el estudio del coste de las instalaciones hacemos uso del método factorial de Peters y Timmerhaus, que parte del valor del equipo instalado y pondera el valor del resto de costes de la instalación por unos factores medios. Este método mantiene la clasificación de Lang de procesos sólidos, líquidos o mixtos y parten del coste del equipo instalado.

De acuerdo con el mencionado método, los siguientes conceptos suponen el 130% del coste total de los equipos principales (para procesos mixtos de sólidos y líquidos):

- Instalación de equipos
- Instalación de tuberías, válvulas y accesorios
- Instrumentación
- Sistema eléctrico
- Edificios del proceso

Según el método de Chilton, la instalación de servicios auxiliares (potencia, vapor y agua) supone el 10% del coste total de los equipos principales.

De este modo el coste total de las instalaciones será:

$$\text{Coste instalaciones} = 1,40 \cdot 774.445,59 \text{ €} = 1.084.223,83 \text{ €}$$

**El coste total de las instalaciones asciende a 1.084.223,83 euros.** El coeficiente de amortización de las instalaciones es del 10% anual.

#### 2.2.6.3 Costes de fabricación

- Costes de personal

Se calculan para un período de trabajo de un año. Se tendrá en cuenta que la planta trabaja en tres turnos diarios de lunes a viernes, y con solo dos turnos al día en sábado y domingo.

Incluyen Seguridad Social y cargas sociales. Se consideran los siguientes costes unitarios por trabajador:

Cargo	Sueldo Base	Nº Trabaj.	Coste Total €/año
Técnicos			
Dir. general	4.000	1	56.000
Ing. proceso	3.500	1	49.000
Químico	3.500	1	49.000
Respons. seguridad	3.500	1	49.000
Personal administrativo			
Respons. ventas	2.000	1	28.000
Contable	2.000	1	28.000
Secretario	2.000	1	28.000
Respons. RRHH	2.000	1	28.000
Especialistas			



Técn. laboratorio	1.800	1	30.800
Electricista	1.800	4	100.800
Fontanero	1.800	4	100.800
Soldador	1.800	4	100.800
Técnico de control	1.800	5	126.000
Personal suministro	1.800	5	126.000
<b>Operarios</b>			
Operario	1.000	25	350.000
<b>Personal de servicios</b>			
Limpieza	1.000	4	56.000
<b>Otras actividades</b>			
Mantenimiento	2.000	2	56.000
Logística	2.000	1	28.000
<b>COSTE TOTAL DE PERSONAL</b>		63	<b>1.390.200</b>

**El coste de personal asciende a 1.390.200 €/año.**

- Costes energéticos

- Coste de combustible

La calefacción del proceso requiere el consumo de fueloil como combustible para la producción de vapor. En este caso el caudal másico de este combustible fue calculado previamente en el *apartado 2.2.5.2, Diseño de las instalaciones*. Su valor es 494,9 kg/h.

$$182,87 \frac{kg}{h} \cdot \frac{1}{945} \frac{m^3}{kg} \cdot 24 \frac{h}{dia} \cdot 330 \frac{dia}{año} \cdot 585,33 \frac{\€}{m^3} = 897.106,58 \frac{\€}{año}$$

- Coste de electricidad

El coste de la electricidad se divide a su vez en dos apartados. Por un lado, la energía eléctrica necesaria para los equipos del proceso:

Equipos	Potencia (kW)	Consumo (kWh)
Molino de bolas	7,3	57816
Soplante	1,75	13860
Lixiviador (agitación)	20	158400
Filtro de prensa, E-6	11	-
Filtro de hojas	2	-
Celda electroobtención	5190	53457
Secador tornillo	410	4223
Horno de fusión	32	329,6
Impulsión fluidos (bombas)	10	-
Total (kWh/año)		288085,6



Para los filtros y las bombas del proceso se considera un coeficiente de simultaneidad de 0,8:

$$Consumo = 25 \text{ kW} \cdot 0,8 \cdot 7920 \frac{\text{h}}{\text{año}} = 158400 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

El consumo energético de los equipos de proceso será por tanto:

$$\begin{aligned} Coste &= 288085,6 + 158400 = 446485,6 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \cdot 0,17 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \\ &= 75.902,55 \frac{\text{€}}{\text{año}} \end{aligned}$$

La energía eléctrica que se precisa para el alumbrado. Se ha estimado en 13,24 kW y tiene un coeficiente de simultaneidad de 0,7:

$$P = 13,24 \text{ kW} \cdot 0,7 = 9,27 \text{ kW}$$

$$Coste = 9,27 \text{ kW} \cdot 7920 \frac{\text{h}}{\text{año}} \cdot 0,17 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 12.478,44 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

- Costes de materias primas

Se considerarán en este apartado el consumo de agua, tanto industrial como potable; el consumo de chatarra de pantalla de cristal líquido y por último el resto de reactivos principales, a saber: hidróxido sódico en forma granular, nitrógeno (suministrado en forma de botellas de gas licuado), y ácido clorhídrico diluido 6M y 3M.

- Coste del agua

El agua tiene muchas aplicaciones además de su uso en el proceso. En cuanto al agua precisa para saneamiento, se encuentra la de los aseos y la utilizada en tareas de limpieza. A continuación una tabla con los gastos previstos:

Aparato Sanitario	Caudal inst. min. (dm <sup>3</sup> /s)	Nº unidades	Caudal inst. min. total (dm <sup>3</sup> /s)
Grifo de laboratorio	0,20	2	0,40
Lavabo	0,10	3	0,30
Inodoro con cisterna	0,10	3	0,30
Ducha	0,20	2	0,40
Limpieza	0,28	1	0,28
Total			<b>1,68</b>

Como resultado, el coste del agua del saneamiento es:

$$6,05 \frac{t}{h} \cdot 24 \frac{h}{dia} \cdot 330 \frac{dia}{año} \cdot 0,63 \frac{€}{t} = 30.177,10 \frac{€}{año}$$

Los requerimientos de agua en cuanto al proceso incluyen el consumo de agua para el lavado de la torta en el filtro de prensa que supone el 20% en peso del sólido filtrado, el vapor de agua para la calefacción del proceso, el agua para formar la disolución del 20% en peso de NaOH en el neutralizador y el agua utilizada en la reposición del electrolito perdido por evaporación en la celda de electroobtención (10% en volumen del contenido en la celda).



Equipo de proceso	Consumo
Lavado de la torta (20% peso sólido)	0,29 m <sup>3</sup> /h
Vapor de calefacción	2,05 t/año
Neutralización (20% peso)	39,96 t/año
Celda de electroobtención (10% vol.)	0,0012 m <sup>3</sup> /h

Siendo el coste del agua de proceso, la suma de los siguientes conceptos:

Para el lavado del filtro y la alimentación a la celda de electroobtención:

$$0,2912 \frac{m^3}{h} \cdot 24 \frac{h}{dia} \cdot 330 \frac{dia}{año} \cdot 1,09 \frac{\epsilon}{t} = 2.513,87 \frac{\epsilon}{año}$$

Para la calefacción por vapor y la solución del neutralizador:

$$2,05 \frac{t}{año} \cdot 1,09 \frac{\epsilon}{t} = 2,23 \frac{\epsilon}{año}$$

Siendo el coste total del agua:

$$30.177,10 \frac{\epsilon}{año} + 2.513,87 \frac{\epsilon}{año} + 2,23 \frac{\epsilon}{año} = 32.693,20 \frac{\epsilon}{año}$$

- Coste de la chatarra de pantalla de cristal líquido

El proceso consume 35 t/día de chatarra de cristal líquido durante su funcionamiento de 330 días al año. El coste unitario por tonelada de la chatarra es de 50 euros.

$$35 \frac{t}{dia} \cdot 330 días \cdot 50 \frac{\epsilon}{t} = 577.500 \epsilon$$

- Coste de reactivos

Los reactivos principales empleados en el proceso son: hidróxido sódico en forma granular, nitrógeno (suministrado en forma de botellas de gas licuado), y ácido clorhídrico en concentración 6M y 3M.

Reactivos	Coste unit., €/u	Consumo, u	Coste total, €/año
NaOH sólido (t)	285,64	9,99	2.853,54
N <sub>2</sub> licuado (L)	0,48	192780	92.534,40
HCl 6M (t)	76,05	230,99	17.566,79
HCl 3M (t)	52,03	109,95	5.721,01
Coste FOB			118.675,74
Coste total (1,05 • Coste FOB)			124.609,53

El coste total de los reactivos empleados en el proceso es 124.609,53 €/año.

#### 2.2.6.4 Ventas

Corresponden a las de indio. No se tiene en cuenta la forma de pago, es decir, se considera como si fuesen al contado. El precio de venta del producto será de 500.000 € por tonelada.

$$Ventas = 10,3 t In \cdot 500.000 \frac{\epsilon}{t In} = 5.150.000 \epsilon$$

 <b>Universidad de Granada</b> <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

**Las ventas ascienden a 5.150.000 euros.**

## 2.2.7 Estudio económico-financiero

### 2.2.7.1 Introducción

Como se ha descrito con anterioridad, el objeto de este Proyecto es la implantación de una planta de recuperación de indio procedente del reciclado de chatarra de pantallas de cristal líquido (LCD). Se ha previsto un incremento significativo de la demanda de este producto en los años venideros, especialmente en zonas de proximidad a industrias relacionadas con la fabricación de aparatos electrónicos.

La planta se localiza en el término municipal de Aznalcollar, de la provincia de Sevilla, debido a su proximidad la industria de recuperación y tratamiento de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), además de otras industrias relacionados con el sector medioambiental.

La producción anual programada para esta industria se ha fijado en 10,3 t de metal indio de 99,999% de pureza, dicha estimación se fundamenta en la previsión de materia prima recuperada y tratada en gran parte del territorio peninsular. El precio de venta del producto será de 500.000 € por tonelada.

La planta ha sido diseñada en una línea de tratamiento de chatarra, consistente principalmente en cuatro etapas divididas en áreas, a saber: reducción de tamaño, lixiviación, purificación y obtención, fusión y moldeo.

A continuación se presenta la evaluación económica financiera de la inversión necesaria para la ejecución y explotación del proyecto.

### 2.2.7.2 Estimación de la inversión

#### 2.2.7.2.1 Capital fijo

Mediante el cálculo del capital fijo se pretende conocer el coste total de implantación. Distinguiremos entre material e inmaterial, pues será de utilidad a la hora de realizar balances de situación, entre otros aspectos. El capital fijo se desglosa en los siguientes conceptos:

##### a) Material

- Terrenos

La planta está ubicada en el término municipal de Aznalcollar, en la provincia de Sevilla, concretamente en el Parque de Actividades Medioambientales de Andalucía.

La parcela donde se ubicará la planta presenta una superficie de 12370 m<sup>2</sup>. El precio del terreno es de 40 €/m<sup>2</sup> por lo que el coste total de este concepto será:

$$12.370 \text{ m}^2 \cdot 40 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} = 494.800 \text{ €}$$

**El coste total del terreno asciende a 494.800 euros.** No es susceptible a amortización.

- Obra civil

Para un análisis más exhaustivo, se dividirá este concepto en subapartados que reflejarán distintas áreas de la parcela.

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

**Oficinas y laboratorio de control de calidad:**

$$136 \text{ } m^2 \cdot 754 \frac{\text{€}}{m^2} = 102.544 \text{ €}$$

**Nave de proceso y control de producción:**

$$851 \text{ } m^2 \cdot 335 \frac{\text{€}}{m^2} = 285.085 \text{ €}$$

**Muelle de carga y descarga, parking y exteriores:**

$$8597 \text{ } m^2 \cdot 20 \frac{\text{€}}{m^2} = 171.940 \text{ €}$$

**Jardinería:**

$$2608 \text{ } m^2 \cdot 50 \frac{\text{€}}{m^2} = 130.400 \text{ €}$$

**Nave de almacenamiento de reactivos:**

$$46 \text{ } m^2 \cdot 335 \frac{\text{€}}{m^2} = 15.410 \text{ €}$$

**Embalaje y nave de almacenamiento de producto:**

$$40 \text{ } m^2 \cdot 335 \frac{\text{€}}{m^2} = 13.400 \text{ €}$$

**Mantenimiento y limpieza:**

$$20 \text{ } m^2 \cdot 335 \frac{\text{€}}{m^2} = 6.700 \text{ €}$$

**Infraestructura:**

Se estima en 120.000 €. Abarca los conceptos de albañilería, electricistas, fontanería y técnicos especialistas.

**El coste total de obra civil asciende a 845.479 euros.**

- **Equipos**  
Este concepto se ha discutido en el *apartado 2.2.6.1, Costes de los equipos del proceso*. Basta con referirnos a su valor, que **asciende a 774.445,59 euros**.
- **Instalaciones**  
El *apartado 2.2.6.2, Costes de las instalaciones*, hace referencia a este concepto. **El coste de las instalaciones asciende a 1.084.223,83 euros**.

b) Inmaterial

- **Estudios previos, proyecto y dirección de obra**  
Bajo este concepto se engloban: el proyecto en sí, lo concerniente a la elección del director de obra y sus emolumentos, y los estudios de utilidad.  
Podemos estimar el coste de este concepto como un porcentaje sobre el capital fijo, concretamente la experiencia lo sitúa alrededor de un 4% del capital fijo.
- **Puesta en marcha**  
Este concepto hace referencia a la serie de tareas que se han de realizar antes de poner en funcionamiento la planta. Estas acciones incluirán ensayos con la planta en funcionamiento, informes de procesos, intereses de préstamos antes de comenzar la actividad, imprevistos, etc.

 <b>Universidad de Granada</b> <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

Podemos estimar el coste de la puesta en marcha como un porcentaje del capital fijo, en particular un 5%.

- **Constitución, organización y gestión**

Este concepto se corresponde con la adquisición de una serie de medidas legales necesarias para la puesta en funcionamiento de la planta. Se incluyen las tasas de inscripción en el Registro Mercantil, el Impuesto sobre Transmisiones Patrimoniales, las Escrituras y la Licencia de Apertura y de Obras.

**El coste de este concepto ascenderá a los 600.000 euros.**

A continuación se procede a la determinación del capital fijo mediante la siguiente expresión:

Se calcula el capital fijo mediante la siguiente expresión:

$$C.F. = 494.800 + 845.479,00 + 1.084.223,83 + 774.445,59 + 600.000 + 0,09 \cdot C.F.$$

**El capital fijo es 4.174.668,59 euros.**

La siguiente tabla resume los conceptos anteriormente mencionados:

Material	Valor (euros)
Terrenos	494.800
Obra civil	845.479
Instalaciones	1.084.223,83
Equipos	774.445,59
Inmaterial	Valor (euros)
Estudios, Proyecto y Dirección de obra	0,04 • CF = 166.986,74
Puesta en marcha	0,05 • CF = 208.733,43
Constitución, organización y gestión	600.000
Capital Fijo	4.174.668,59

#### 2.2.7.2.2 Financiación del capital fijo

Para la financiación del capital fijo se recurre a tres fuentes: aportación propia del promotor, subvenciones y el mercado financiero. A continuación se analiza cada una de las fuentes.

a) Aportación propia

Se establece al menos un tercera parte del capital fijo como aportación propia:

$$4.174.668,59 \text{ €} \cdot \frac{1}{3} = 1.391.556,20 \text{ €}$$

**La aportación propia asciende a 1.391.556,20 euros.**

b) Subvención

Todo el territorio de la Comunidad Autónoma de Andalucía está considerado como zona de Promoción Económica de Tipo I. Esto quiere decir que:

- A este tipo de zona le corresponden las máximas ayudas permitidas por la Unión Europea.

 <b>Universidad de Granada</b> <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

- Concesión de subvenciones hasta un máximo del 30% (2011-2013) de la inversión aprobada.

- Los proyectos ubicados en los municipios que son los señalados en el Real Decreto 162/2008, de 8 de febrero, por el que se delimita la zona de promoción económica de Andalucía serán considerados prioritarios.

Por tanto, el total del montante corresponde a un 30% del capital fijo.

$$4.174.668,59 \text{ €} \cdot 0,3 = 1.252.400,58 \text{ €}$$

**La subvención asciende a 1.252.400,58 euros.**

c) Mercado financiero

Como última opción se recurre al mercado financiero para terminar de financiar el capital fijo. Consiste en un préstamo a pagar a largo plazo.

El resto del capital fijo se cubre con un crédito a largo plazo que tiene una duración de 10 años. Las condiciones son las siguientes:

- Cuantía: 1.530.711,82
- Devolución: 10 años
- Carencia: 2 años
- Interés: 6%
- Comisión de apertura: 1% del valor del crédito

A continuación se muestra el *Cuadro de Financiación a largo plazo*.

Devolución	10	años
Carencia	2	años
Interés	6%	
Comisión apertura	1%	de la cuantía
Cuantía	1.530.711,82	euros

#### 2.2.7.3 Capital circulante

Al activo circulante pertenecen todos aquellos elementos del activo que normalmente van a permanecer en la empresa un período corto de tiempo y que presentan una gran movilidad.

Comprende los siguientes términos ordenados de menor a mayor liquidez:

a) Activo circulante:

- Existencias de materias primas

Debido a que la empresa suministradora de materia prima (en este caso chatarra de pantalla de cristal líquido) se encuentra en la misma área industrial se almacenará la materia prima requerida para tan solo 14 días de funcionamiento.

$$35 \frac{t}{dia} \cdot 14 \text{ días} \cdot 50 \frac{\text{€}}{t} = 24.500 \text{ €}$$

- Existencias de productos terminados

La cantidad de producto no vendida se ha estimado en un 3% de la producción.

$$Exist. PT = (C. Producc. + C. Estruct. + G. Financ) \cdot \frac{3}{100}$$



$$Exist. PT = (3.412.259,50 + 244.750,06 + G. Financ) \cdot \frac{3}{100}$$

Los gastos financieros corresponden a los intereses que genera el préstamo a corto plazo, es decir el 8% de su cuantía. Se determinará al final del apartado.

- Clientes

Este concepto corresponde a lo que deben los clientes, cobrándose con efectos a los 30 días. Su cálculo precisa el conocimiento de las ventas totales, concepto que fue abordado anteriormente en el *apartado 2.2.6.4, Ventas*.

$$5.150.000 \cdot \frac{1}{12} = 429.166,67 \text{ €}$$

- Tesorería

Representa la cantidad mínima de la que se desea disponer en caja y se calcula como un 2% del capital fijo. Ver *Plan de tesorería*.

$$4.174.668,59 \text{ €} \cdot \frac{2}{100} = 83.493,37 \text{ €}$$

b) Pasivo circulante:

- Proveedores

Se contempla lo que se debe a proveedores por el concepto de la compra de materias primas. Se establece un pago a 30 días.

Cada año la compra de materias primas es:

$$35 \frac{t}{dia} \cdot 330 \text{ días} \cdot 50 \frac{\text{€}}{t} = 577.500 \text{ €}$$

Sería la cantidad correspondiente a un mes:

$$\frac{577.500}{12} = 48.125 \text{ €}$$

Por lo tanto, la cantidad que se debe a proveedores asciende a **48.125 euros**.

El capital circulante se calcula como la diferencia entre el activo circulante y el pasivo circulante.

$$C.C. = 83.493,37 + 429.166,67 + 24.500 + (3.412.259,50 + 244.750,06 + 0,08 \cdot C.C.) \cdot \frac{3}{100} - 48.125$$

ACTIVO CIRCULANTE	
Tesorería	83.493,37 €
Clientes	429.166,67 €
Existencias Materia prima	24.500,00 €
Existencias Producto terminado	111.150,74 €
PASIVO CIRCULANTE	
Proveedores	48.125 €
CAPITAL CIRCULANTE	
	600.185,78 €

**El capital circulante asciende a 600.185,78 euros.**

 <b>Universidad de Granada</b> <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

#### 2.2.7.4 Financiación del capital circulante

Se recurrirá a un crédito a devolver a corto plazo. Su importe será por todo el Capital circulante, y el período de devolución 1 año.

- Cuantía: 600.185,78 €
- Devolución: 1 años
- Interés: 8%

A continuación se muestra el *Cuadro financiación préstamo corto plazo*.

Devolución	1	año
Interés	8%	
Cuantía	600.185,78	euros
<b>Gasto financiero c/p</b>	<b>48014,8624</b>	euros
Cuota	600185,78	euros
Pendiente devolver	0	euros

#### 2.2.7.5 Gastos financieros

Corresponden a los intereses y a las comisiones a pagar por los créditos, tanto a largo como a corto plazo. Ver *Cuenta de Resultados*.

#### 2.2.7.6 Costes de estructura

Reciben este nombre genérico una serie de conceptos de ámbito distinto a la producción o fabricación en sí, pero que repercuten tanto en los costes como en el funcionamiento global de la planta. Se consideran:

- a) Suministros de material variado, tales como vestuario, equipos de protección, mangueras, etc. Se estima el gasto en un 1% del capital fijo.  
**Este concepto asciende a 41.746,69 €/año.**
- b) Transporte y distribución, dada la naturaleza del producto y la ubicación de la planta, se estima en un 2% del capital fijo.  
**Este concepto asciende a 83.493,37 €/año.**
- c) Seguridad, esta función corre por cuenta de una empresa ajena.  
**Se fija en 50.000 €/año.**
- d) Personal ajeno a la fabricación, no interviene en la producción ni forma parte de la plantilla de empleados en nómina, pero se requiere sus servicios. Supondrá un 5% del coste de personal.  
**Este concepto asciende a 69.510,00 €/año.**

Atendiendo a estos conceptos **los costes de estructura ascienden a 244.750,06 €/año**.

A continuación se muestra el *Cuadro de Costes de Estructura*.

<b>COSTES DE ESTRUCTURA</b>	<b>244.750,06</b>	euros
Suministro y Material variado	41.746,69	euros
Transporte y distribución	83.493,37	euros
Seguridad	50.000,00	euros
Personal ajeno fabricación	69.510,00	euros

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	----------------------------------

#### 2.2.7.7 Costes de producción

Se compone de tres conceptos: costes de fabricación (que incluyen gastos de fabricación, mano de obra, amortización y consumo de materias primas), costes de estructura y gastos financieros.

De los anteriores, excepto la amortización, todos han sido tratados. Así pues, a continuación, nos referimos a la amortización.

La amortización no supone un gasto real, sino lo que se devalúa el producto de carácter material, ya sea equipo, obra civil o instalación. Por lo tanto, da una idea de lo que conviene tener en el capital circulante para responder cuando ese material se deteriore y requiera un recambio, o bien el inmaterial se devalúe. Se considerará una tasa de amortización constante año a año. Estos valores serán un porcentaje sobre el valor total del concepto.

- Obra civil: 4%
- Equipos: 8%
- Instalaciones: 10%
- Inmaterial: 10%

Ver *Cuadro de Amortizaciones*.

CONCEPTO	CUANTÍA	
Obra civil	845.479,00	4%
Equipos	774.445,59	8%
Instalaciones	1.084.223,83	10%
Inmaterial	975.720,17	10%

El montante total de la amortización es de 301.769,21 €/año.

**Los costes de producción por tanto ascienden a 3.412.259,50 €/año.**

Ver *Cuadro de Costes de Producción*:

COSTES DE PRODUCCIÓN	<b>3.412.259,50</b>	euros
Materias primas (chatarra LCD)	577.500,00	euros
Materias auxiliares y energía	1.142.790,30	euros
Mano de obra	1.390.200,00	euros
Amortizaciones	301.769,21	euros

#### 2.2.8 Cuenta de resultados

Se trata de un estudio de los ingresos y gastos que sirve para la obtención de estos previsibles en el horizonte de la planificación año por año. Determina el resultado que se prevé que va a tener la sociedad, sea beneficio o pérdida.

Se analizan cada uno de los conceptos de interés, dividiendo el análisis en los distintos apartados de que consta la cuenta de resultados: ingresos, gastos, margen de ventas, resultado operativo, resultado antes de impuestos, beneficio disponible y fondo de beneficio.

##### 2.2.8.1 Ingresos

- Ventas:** corresponden a las de indio. No se tiene en cuenta la forma de pago, es decir, se considera como si fuese al contado. Ver *apartado 2.2.6.4, Ventas*.

Se tendrá en cuenta que el primer año una parte de la producción se destina a almacenamiento como stock de producto terminado (3% de la producción).

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

- b) **Variación de existencias de materia prima** (chatarra de cristal líquido): Asciende a 24.500,00 € el primer año. Para el resto de años no existe variación.
- c) **Variación de existencias de producto terminado** (indio metálico): Asciende a 111.150,74 € el primer año, permaneciendo el resto de años sin variación. Ver *apartado 2.2.7.3, Capital circulante.*

#### 2.2.8.2 Gastos

- a) **Consumo de materias primas:** Este concepto se refiere al consumo de chatarra de pantalla de cristal líquido anual para el proceso. Asciende a 577.500 euros. Ver *apartado 2.2.6.3, Costes de fabricación.*
- b) **Materias auxiliares y energía:** comprenden los gastos en agua, reactivos, energía y vapor. Asciende a 1.142.790,30 euros. Ver *apartado 2.2.6.3, Costes de fabricación.*
- c) **Mano de obra:** Asciende a 1.390.200 euros. Ver *apartado 2.2.6.3, Costes de fabricación.* Ver apartado 2.1.6.3, Costes de fabricación y Tabla 34, Costes de Personal.
- d) **Variación de existencias de materia prima:** Igual que en el apartado anterior de ingresos. Asciende a 24.500,00 euros

Los gastos descritos están sujetos a una actualización anual del 3%.

#### 2.2.8.3 Margen de ventas

Es la diferencia entre los ingresos y los gastos. **Asciende a 1.996.160,44 euros para el primer año.**

#### 2.2.8.4 Resultado operativo

- a) Costes de comercialización: son los correspondientes a aspectos como descuentos, publicidad y seguros. Se estima en un 3% de las ventas.
- b) Costes de estructura: ver *apartado 2.2.7.6, Costes de estructura.*
- c) Amortización: ver *apartado 2.2.7.7, Costes de producción.*

El **Resultado operativo** es el margen de ventas restando los conceptos de amortización, costes de comercialización y costes de estructura. **Asciende a 1.299.776,18 € para el primer año.**

#### 2.2.8.5 Resultado antes de impuestos

Es el Resultado operativo restando los Gastos financieros. Ver *apartado 2.2.7.5, Gastos financieros.*

**Asciende a 1.144.611,49 € para el primer año.**

#### 2.2.8.6 Beneficio disponible

Es el beneficio anual, calculado como la diferencia entre el Resultado Antes de Impuestos y los Impuestos. Por Impuestos nos referimos al Impuesto de Actividades Económicas, son el 35% del Resultado Antes de Impuestos.

**Para el primer año asciende a 743.997,47 euros.**

#### 2.2.8.7 Fondo de beneficio

Supone el Beneficio disponible acumulado a lo largo de los años.

Ver *Cuenta de Resultados.*



CUENTA DE RESULTADOS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
INGRESOS(+)	5.131.150,74	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00
Ventas	4.995.500,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00
Variación existencias MP	24.500,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Variación existencias PT	111.150,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
GASTOS(-)	-3.134.990,30	-3.203.805,01	-3.299.919,16	-3.398.916,73	-3.500.884,23	-3.605.910,76	-3.714.088,08	-3.825.510,72	-3.940.276,05	-4.058.484,33
Consumo MP	-577.500,00	-594.825,00	-612.669,75	-631.049,84	-649.981,34	-669.480,78	-689.565,20	-710.252,16	-731.559,72	-753.506,51
Materias auxiliares y E.	-1.142.790,30	-1.177.074,01	-1.212.386,23	-1.248.757,81	-1.286.220,55	-1.324.807,16	-1.364.551,38	-1.405.487,92	-1.447.652,56	-1.491.082,13
Mano de obra	-1.390.200,00	-1.431.905,00	-1.474.863,18	-1.519.109,08	-1.564.682,35	-1.611.622,82	-1.659.971,50	-1.709.770,55	-1.761.063,77	-1.813.895,68
Variación existencias MP	-24.500,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>MARGEN DE VENTAS</b>	<b>1.996.160,44</b>	<b>1.946.194,99</b>	<b>1.850.080,84</b>	<b>1.751.083,27</b>	<b>1.649.115,77</b>	<b>1.544.089,24</b>	<b>1.435.911,92</b>	<b>1.324.489,28</b>	<b>1.209.723,95</b>	<b>1.091.515,67</b>
Amortización	-301.769,21	-301.769,21	-301.769,21	-301.769,21	-301.769,21	-301.769,21	-301.769,21	-301.769,21	-301.769,21	-301.769,21
Costes comercialización	-149.865,00	-154.500,00	-154.500,00	-154.500,00	-154.500,00	-154.500,00	-154.500,00	-154.500,00	-154.500,00	-154.500,00
Costes de estructura	-244.750,06	-252.092,56	-259.655,34	-267.445,00	-275.468,35	-283.732,40	-292.244,37	-301.011,70	-310.042,05	-319.343,31
<b>RESULTADO OPERATIVO</b>	<b>1.299.776,18</b>	<b>1.237.833,23</b>	<b>1.134.156,30</b>	<b>1.027.369,07</b>	<b>917.378,21</b>	<b>804.087,64</b>	<b>687.398,34</b>	<b>567.208,37</b>	<b>443.412,70</b>	<b>315.903,15</b>
Gasto financiero LP	107.149,83	91.842,71	80.362,37	68.882,03	57.401,69	45.921,35	34.441,02	22.960,68	11.480,34	0,00
Gasto financiero CP	48.014,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>RESULTADO ANTES IMP.</b>	<b>1.144.611,49</b>	<b>1.145.990,52</b>	<b>1.053.793,93</b>	<b>958.487,03</b>	<b>859.976,52</b>	<b>758.166,28</b>	<b>652.957,33</b>	<b>544.247,69</b>	<b>431.932,36</b>	<b>315.903,15</b>
Impuestos	-400.614,02	-401.096,58	-368.827,88	-335.470,46	-300.991,78	-265.358,20	-228.535,06	-190.486,59	-151.176,32	-110.566,10
Beneficio disponible	743.997,47	744.893,84	684.966,05	623.016,57	558.984,74	492.808,08	424.422,26	353.761,00	280.756,03	205.337,05
Fondo de beneficio	743.997,47	1.488.891,31	2.173.857,36	2.796.873,93	3.355.858,67	3.848.666,75	4.273.089,02	4.626.850,02	4.907.606,05	5.112.943,10

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

## 2.2.9 Plan de tesorería

En el Plan de Tesorería se incluye el AÑO 0 como el momento en que se realizan las inversiones sin que haya comenzado la actividad.

Está compuesto por los siguientes conceptos:

### 2.2.9.1 Cobros

- a) **Ventas:** Suponen el cobro a clientes por el indio comercializado. En el año 0 no hay actividad y por tanto el resultado es 0 €.
- b) **Clientes:** Este concepto corresponde a lo que deben los clientes, cobrándose con efectos a los 30 días. Ver *apartado 2.2.7.3, Capital circulante*.  
Se resta al concepto anterior de **Ventas** pues es dinero que se deja de cobrar. Solo existe para el primer año pues para los siguientes el dinero a deber por los clientes es el mismo y por tanto la diferencia es nula.
- c) **Aportación propia:** Ver *apartado 2.2.7.2.2, Financiación del Capital fijo*. Únicamente se contabiliza el año 0.
- d) **Subvención:** Ver *apartado 2.2.7.2.2, Financiación del Capital fijo*. Únicamente se contabiliza el año 0.
- e) **Exigible a largo plazo:** Corresponde a lo que se tiene que devolver del préstamo a largo plazo cada año, y se deduce de los préstamos en el *Plan Financiero*. Ver *apartado 2.2.7.2.2, Financiación del Capital fijo*. Únicamente se contabiliza el año 0.
- f) **Exigible a corto plazo:** Igual que en el caso anterior para el préstamo a corto plazo. Ver *apartado 2.2.7.4, Financiación del Capital circulante*. Únicamente se contabiliza el año 0.

### 2.2.9.2 Pagos

- a) **Inmovilizado:** Corresponde al **Capital fijo** y sólo se contabiliza para el año 0.
- b) **Materias auxiliares y energía:** Ver *Cuenta de Resultados*.
- c) **Consumo de materia prima:** Ver *Cuenta de Resultados*.
- d) **Proveedores de materia prima:** Ver *apartado 2.2.7.3, Capital circulante*.
- e) **Gastos financieros y cuota de préstamo a largo plazo:** Ver *apartado 2.2.7.2.2, Financiación del Capital fijo*.
- f) **Gastos financieros y cuota de préstamo a corto plazo:** Ver *apartado 2.2.7.4, Financiación del Capital circulante*.
- g) **Mano de obra:** Ver *Cuenta de Resultados*.
- h) **Costes de estructura:** Ver *Cuenta de Resultados*.
- i) **Variación de existencias:** Corresponde a la Variación de existencias de materia prima. Ver *Cuenta de Resultados*.
- j) **Costes de comercialización:** Ver *Cuenta de Resultados*.
- k) **Impuestos:** Son los correspondientes a la *Cuenta de Resultados* del año anterior.

### 2.2.9.3 Caja inicial.

Corresponde a la **Caja final** del año anterior.

### 2.2.9.4 Caja periodo

Es la diferencia entre los cobros y los pagos. En el año 0 coincide con el **Capital Circulante**.

### 2.2.9.5 Caja final



Es la diferencia entre la **Caja inicial** y la **Caja periodo**.



TESORERÍA	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ventas	0,00	4.995.500,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00	5.150.000,00
Clientes (-)	0,00	-429.166,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Aportación propia	1.391.556,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Subvención	1.252.400,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Exigible a l/p	1.530.711,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Exigible a c/p	600.185,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>TOTAL COBROS</b>	<b>4.774.854,37</b>	<b>4.566.333,33</b>	<b>5.150.000,00</b>								
Inmovilizado	-4.174.668,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Materias auxiliares y E.	0,00	-1.142.790,30	-1.177.074,01	-1.212.386,23	-1.248.757,81	-1.286.220,55	-1.324.807,16	-1.364.551,38	-1.405.487,92	-1.447.652,56	-1.491.082,13
Consumo Materia Prima	0,00	-577.500,00	-594.825,00	-612.669,75	-631.049,84	-649.981,34	-669.480,78	-689.765,20	-710.252,16	-731.559,72	-753.506,51
Proveedores MP (+)	0,00	48.125,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gastos financieros l/p	0,00	-107.149,83	-91.842,71	-80.362,37	-68.882,03	-57.401,69	-45.921,35	-34.441,02	-22.960,68	-11.480,34	0,00
Cuota préstamo l/p	0,00	0,00	0,00	-191.338,98	-191.338,98	-191.338,98	-191.338,98	-191.338,98	-191.338,98	-191.338,98	-191.338,98
Gastos financieros c/p	0,00	-48.014,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cuota préstamo c/p	0,00	-600.185,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mano de obra	0,00	-1.390.200,00	-1.431.906,00	-1.474.863,18	-1.519.109,08	-1.564.682,35	-1.611.622,82	-1.659.971,50	-1.708.770,65	-1.761.063,77	-1.813.895,68
Costes de estructura	0,00	-244.750,06	-252.092,56	-259.655,34	-267.445,00	-275.468,35	-283.732,40	-292.244,37	-301.011,70	-310.042,05	-319.343,31
Variación de existencias	0,00	-24.500,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Costes de comercialización	0,00	-149.865,00	-154.500,00	-154.500,00	-154.500,00	-154.500,00	-154.500,00	-154.500,00	-154.500,00	-154.500,00	-154.500,00
Impuestos	0,00	0,00	-400.614,02	-401.096,68	-368.827,88	-335.470,46	-300.991,78	-265.358,20	-228.535,06	-190.486,69	-151.176,32
<b>TOTAL PAGOS</b>	<b>-4.174.668,59</b>	<b>-4.236.830,82</b>	<b>-4.102.854,30</b>	<b>-4.386.872,52</b>	<b>-4.449.910,61</b>	<b>-4.515.063,71</b>	<b>-4.582.395,27</b>	<b>-4.651.970,64</b>	<b>-4.723.857,14</b>	<b>-4.798.124,10</b>	<b>-4.874.842,94</b>
CAJA PERÍODO	600.185,78	329.502,51	1.047.145,70	763.127,48	700.089,39	634.936,29	567.504,73	498.029,36	426.142,86	351.875,90	275.157,06
CAJA INICIAL	0,00	600.185,78	929.688,29	1.976.833,99	2.739.961,47	3.440.050,86	4.074.987,15	4.642.591,88	5.140.621,24	5.566.764,09	5.918.639,99
CAJA FINAL	600.185,78	929.688,29	1.976.833,99	2.739.961,47	3.440.050,86	4.074.987,15	4.642.591,88	5.140.621,24	5.566.764,09	5.918.639,99	6.193.797,05

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	----------------------------------

## 2.2.10 Balance

### 2.2.10.1 Activo

- a) Inmovilizado: es el Capital Fijo, dividido en Material (Terrenos, Obra Civil, Maquinaria e Instalaciones), Inmaterial (Estudios previos y Puesta en marcha), y Ficticio (Constitución). No varía a lo largo de los años.  
Ver *Plan de tesorería*.
- b) Fondo de amortización: es la suma de las amortizaciones de cada año y el anterior. Por tanto es la amortización acumulada. Resta en el Activo.
- c) Clientes: lo constituye el saldo final de clientes. Ver *apartado 2.2.7.3, Capital circulante*.
- d) Existencias de materia prima y de producto terminado.
- e) Tesorería: corresponde a la **Caja final** del *Plan de Tesorería*.

### 2.2.10.2 Pasivo

- a) Aportación propia: Ver *Plan de Tesorería*.
- b) Subvención: Ver *Plan de Tesorería*.
- c) Fondo de beneficio: Ver *Cuenta de Resultados*.
- d) Proveedores de materia prima: Ver *Plan de Tesorería*.
- e) Exigible a largo plazo: Es lo que queda por devolver del préstamo a largo plazo cada año. Ver *apartado 2.2.7.2.2, Financiación del Capital fijo*.
- f) Exigible a corto plazo: Es lo que queda por devolver del préstamo a corto plazo cada año. Como se devuelve el primer año únicamente está presente en el año 0. Ver *apartado 2.2.7.4, Financiación del Capital circulante*.
- g) Impuestos: Ver *Cuenta de Resultados*.



BALANCE	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Inmovilizado	4.174.668,59	4.174.668,59	4.174.668,59	4.174.668,59	4.174.668,59	4.174.668,59	4.174.668,59	4.174.668,59	4.174.668,59	4.174.668,59	4.174.668,59
Fondo de amortización [-]	-301.769,21	-603.538,41	-905.307,62	-1.207.076,83	-1.508.846,04	-1.810.615,24	-2.112.384,45	-2.414.153,66	-2.715.922,86	-3.017.692,07	
Cuentas	429.166,67	429.166,67	429.166,67	429.166,67	429.166,67	429.166,67	429.166,67	429.166,67	429.166,67	429.166,67	429.166,67
Existencias Materias Primas	24.500,00	24.500,00	24.500,00	24.500,00	24.500,00	24.500,00	24.500,00	24.500,00	24.500,00	24.500,00	24.500,00
Existencias Producto terminado	111.150,74	111.150,74	111.150,74	111.150,74	111.150,74	111.150,74	111.150,74	111.150,74	111.150,74	111.150,74	111.150,74
Tesorería	600.185,78	929.688,29	1.976.833,99	2.739.961,47	3.440.050,86	4.074.987,15	4.642.591,88	5.140.621,24	5.566.764,09	5.918.639,99	6.193.797,05
<b>TOTAL ACTIVO</b>	<b>4.774.854,37</b>	<b>5.367.405,08</b>	<b>6.112.781,58</b>	<b>6.574.139,85</b>	<b>6.972.460,03</b>	<b>7.305.627,11</b>	<b>7.571.462,63</b>	<b>7.767.722,78</b>	<b>7.892.096,43</b>	<b>7.942.203,12</b>	<b>7.915.590,97</b>
Aportación propia	1.391.556,20	1.391.556,20	1.391.556,20	1.391.556,20	1.391.556,20	1.391.556,20	1.391.556,20	1.391.556,20	1.391.556,20	1.391.556,20	1.391.556,20
Subvención	1.252.400,58	1.252.400,58	1.252.400,58	1.252.400,58	1.252.400,58	1.252.400,58	1.252.400,58	1.252.400,58	1.252.400,58	1.252.400,58	1.252.400,58
Fondo de beneficio	743.997,47	1.488.891,31	2.173.857,36	2.796.873,93	3.355.858,67	3.848.666,75	4.273.089,02	4.626.850,02	4.907.606,05	5.112.943,10	
Proveedores MP	48.125,00	48.125,00	48.125,00	48.125,00	48.125,00	48.125,00	48.125,00	48.125,00	48.125,00	48.125,00	48.125,00
Exigible a largo plazo	1.530.711,82	1.530.711,82	1.339.372,84	1.148.033,86	956.594,88	765.355,91	574.016,93	382.677,95	191.338,98	0,00	
Exigible a corto plazo	600.185,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Impuestos	400.614,02	401.096,68	368.827,88	335.470,46	300.951,78	265.358,20	228.535,06	190.486,69	151.176,32	110.566,10	
<b>TOTAL PASIVO</b>	<b>4.774.854,37</b>	<b>5.367.405,08</b>	<b>6.112.781,58</b>	<b>6.574.139,85</b>	<b>6.972.460,03</b>	<b>7.305.627,11</b>	<b>7.571.462,63</b>	<b>7.767.722,78</b>	<b>7.892.096,43</b>	<b>7.942.203,12</b>	<b>7.915.590,97</b>

 <b>Universidad</b> <b>de Granada</b>  <b>Facultad de</b> <b>Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE</b> <b>VIABILIDAD</b>
---	---	--

## 2.2.11 TIR

El índice de evaluación del estudio económico será el TIR., tasa interna de rentabilidad, que representa el tipo de interés compuesto que se percibe, durante la vida de la inversión, por la inmovilización del capital invertido, es decir, a que interés se remunera el capital inmovilizado.

Para calcular el TIR se utiliza la siguiente fórmula:

$$I = \sum_{i=1}^n \frac{CF_i}{(1+r)^i}$$

Siendo:

I, la inversión inicial.

n, la Vida útil del Proyecto. En este caso 10 años.

CF<sub>i</sub>, el Flujo neto de caja en el año i

r, la tasa interna de retorno.

En este caso el TIR es del 17%.

Ver la página siguiente.



TIR	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Capital fijo	4.174.668,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Capital circulante	600.185,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Amortizaciones	0,00	301.769,21	301.769,21	301.769,21	301.769,21	301.769,21	301.769,21	301.769,21	301.769,21	301.769,21	301.769,21
Interés de préstamos	0,00	155.164,69	91.842,71	80.362,37	68.882,03	57.401,69	45.921,35	34.441,02	22.960,68	11.480,34	0,00
Beneficio disponible	0,00	743.997,47	744.893,84	684.966,05	623.016,57	558.984,74	492.808,08	424.422,26	353.761,00	280.756,03	205.337,05
Valor residual	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SUMA	-4.774.854,37	1.200.931,37	1.138.505,75	1.067.097,63	993.667,81	918.155,64	840.498,65	760.632,48	678.490,88	594.005,58	1.664.082,77

TIR                  17%

 <b>Universidad</b> <b>de Granada</b>  <b>Facultad de</b> <b>Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

## 2.2.12 Análisis de sensibilidad

Representa un estudio de la estructura de costes del proyecto, en el caso que nos ocupa se aprecia una clara relevancia de los gastos de fabricación sobre el beneficio obtenido mediante esta práctica industrial.

Esto se debe a los elevados requerimientos energéticos para esta alternativa, en especial el consumo de combustible para la generación de calor. Esto indica que posibles subidas de los combustibles o de la energía pueden derivar en un gran perjuicio económico para esta actividad.

Es probable que en un futuro cercano se incremente el precio de los combustibles lo cual acarrearía una disminución significativa de los beneficios.

Ver la página siguiente.



ESTUDIO DE SENSIBILIDAD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>TOTAL</b>	<b>4.556.171,72</b>	<b>4.554.403,32</b>	<b>4.626.672,12</b>	<b>4.660.029,54</b>	<b>4.694.508,22</b>	<b>4.730.141,80</b>	<b>4.766.964,94</b>	<b>4.805.013,31</b>	<b>4.844.323,68</b>	<b>4.884.933,90</b>
Mano de obra	30,51	31,17	31,88	32,60	33,33	34,07	34,82	35,58	36,35	37,13
Materias primas	12,68	12,95	13,24	13,54	13,85	14,15	14,47	14,78	15,10	15,43
Gastos de fabricación	25,08	25,62	26,20	26,80	27,40	28,01	28,63	29,25	29,88	30,52
Amortización	6,62	6,57	6,52	6,48	6,43	6,38	6,33	6,28	6,23	6,18
Costes de estructura	5,37	5,49	5,61	5,74	5,87	6,00	6,13	6,26	6,40	6,54
Gastos financieros	3,41	2,00	1,74	1,48	1,22	0,97	0,72	0,48	0,24	0,00
Beneficio disponible	16,33	16,21	14,80	13,37	11,91	10,42	8,90	7,36	5,80	4,20
<b>TOTAL</b>	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

## 2.3 *Justificación de la alternativa elegida*

Para comparar las diferentes alternativas y poder seleccionar la mejor de todas ellas es necesario realizar una matriz de efectos en la que se valorarán los parámetros más importantes que intervienen en la ejecución de un proyecto.

### 2.3.1 Parámetros de selección

Los parámetros que se han considerado son los siguientes:

- **Rentabilidad:** para medir este factor se utiliza la T.I.R. realizada para cada una de las alternativas. Este es el parámetro más importante ya que por muy interesante que sea una idea, si no es rentable no se puede llevar a cabo.
- **Impacto ambiental:** se basa principalmente en la emisión de contaminantes atmosféricos y vertidos líquidos. En el caso de una planta de recuperación de indio procedente del reciclado no es un factor predominante.
- **Inversión:** es la suma de los capitales fijo y circulante. Si la inversión del proyecto es muy elevada será más difícil de rentabilizar y más ayudas serán necesarias para poder financiarlo.
- **Eficacia del proceso:** hace referencia al rendimiento del proceso productivo. Cuanto mayor sea la eficacia mayor será la rentabilidad y menor el desaprovechamiento de las materias primas utilizadas.

### 2.3.2 Matriz de decisión

Esta es la herramienta que permite seleccionar la mejor alternativa. Para ello se basa en los parámetros ya comentados. Los pasos a seguir son:

- a) En primer lugar hay que determinar la importancia relativa de cada uno de los parámetros ya que no todos tienen el mismo valor. Para ello se asigna a cada factor un % sobre 100. Cuanto mayor sea el % mayor será su importancia.
- b) Determinar el grado de cumplimiento del factor en cuestión por parte de cada una de las alternativas. Esto se realiza asignando un valor de 1 a 10, de modo que el valor 1 ó próximo significa que esa alternativa es muy desfavorable respecto a ese factor; lógicamente, un valor 10 ó cercano quiere decir que esa alternativa cumple muy satisfactoriamente ese parámetro.
- c) Posteriormente se halla la importancia absoluta de cada parámetro para cada una de las alternativas multiplicando la importancia relativa de dicho factor por el valor asignado en el paso 2.
- d) Por último se calcula el total para cada una de las alternativas mediante la suma de las importancias totales de cada parámetro. La alternativa cuyo total sea mayor será la opción elegida para realizar el proyecto.

A continuación se muestra la matriz de decisión para cada una de las dos alternativas:

Parámetro	Importancia relativa	Alternativa 1	Importancia absoluta
Rentabilidad	35	7	245
Impacto ambiental	20	5	100

 <b>Universidad de Granada</b> . . . <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
--	--	------------------------------

Inversión	30	5	150
Eficacia del proceso	15	7	105
Total	100	---	<b>600</b>

La **alternativa 1** tiene un total de 600.

Parámetro	Importancia relativa	Alternativa 2	Importancia absoluta
Rentabilidad	35	5	175
Impacto ambiental	20	5	100
Inversión	30	6	180
Eficacia del proceso	15	5	75
Total	100	---	<b>530</b>

La **alternativa 2** tiene un total de 530.

### 2.3.3 Conclusiones

Tras realizar la matriz de decisión, en la que se han considerado factores económicos, técnicos y medioambientales, son de destacar los siguientes puntos:

- a) La alternativa más viable es la primera ya que tiene una mayor puntuación en base a los parámetros considerados.
- b) La primera alternativa tiene la mejor rentabilidad aunque precisa una inversión mayor, principalmente por el mayor coste de los equipos. Sin embargo, esta inversión es rentabilizada con prontitud.
- c) La segunda alternativa es fuertemente dependiente del precio del combustible, lo cual la hace desaconsejable debido a la inestabilidad de estos.

Por lo anterior, la alternativa desarrollada en el proyecto será la alternativa número uno: “Método para recuperar indio de alta pureza por lixiviación de chatarra de películas de ITO”.

 <b>Universidad de Granada</b> <b>Facultad de Ciencias</b>	Planta de recuperación de indio procedente del reciclado de pantallas LCD.	<b>ESTUDIO DE VIABILIDAD</b>
---	--	------------------------------

## **Bibliografía**

- Ashby, M. F. y Rayner Hunkin Jones, D.** (2012). Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications and Design. Ed. Elsevier.
- United Nations University.** (2008). Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)
- Asimlec. (2010).** Informe 2010 del macrosector tic en España.
- Takahashi, K., Sasaki, A., Dodbiba, G., Sadaki, J., Sato, N. Y Fujita, T.** (2009). Recovering Indium from the Liquid Crystal Display of Discarded Cellular Phones by Means of Chloride-Induced Vaporization at Relatively Low Temperature. Metallurgical and Materials Transactions A, Volume 40, Issue 4, 891-900.
- DOW METALS & MINING CO., LTD.**, Tokyo, Japan. *Method for Recovering Indium.* Nakamura, Y., Ogasawara, S., Komori, A., Aosaki, H. Int, Cl.5: C25C 1/22, US 2008/0190779 A1. 14 agosto 2008.
- Arieta-Araunabeña y M., Arnaiz, S.** (2007). Reciclado de pantallas de cristal líquido (LCD).
- Abril, E. R.** (1965). Metalurgia técnica y fundición. Ed. Alsina.
- McCabe, W. L. y Smith, J.C.** (1968). Operaciones básicas de ingeniería química. Barcelona: Reverté
- Vázquez Moreno, J. y Herranz Aguilar, J.C. (2012).** Números gordos en el proyecto de instalaciones. Ed. Cinter Divulgación Técnica.

### **Otras fuentes**

- Instituto Nacional de estadística (INE)
- Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS)
- United Nations University
- Fundación Ecotic.