

PRINCIPIOS DE DISEÑO DE PROCESOS LIMPIOS

Dr. Claudio A. Zaror

Departamento de Ingeniería Química.

Universidad de Concepción. Chile

Email: czaror@udec.cl

1) EL CONCEPTO DE PROCESOS LIMPIOS

Durante muchos años, gran parte de los esfuerzos de control ambiental en la industria, estuvieron centrados, principalmente, en el tratamiento de los residuos líquidos, gaseosos y sólidos. Sin embargo, las graves crisis ambientales sufridas por muchos países industrializados en las últimas décadas, han modificado drásticamente tales enfoques.

Los problemas ambientales generados por las emisiones de residuos de producción, por el excesivo consumo de recursos naturales y por los accidentes en el transporte y procesamiento de materiales peligrosos, han tenido repercusiones que van más allá de las fronteras de los países individuales. Ello se ha traducido en fuertes presiones económicas y legales, a nivel internacional, para lograr niveles de desempeño ambiental cada vez más exigentes, en todos los sectores industriales.

En particular, los crecientes costos asociados al tratamiento y vertido de residuos, han motivado la elaboración de nuevos enfoques de control ambiental. La Figura 1 muestra claramente, que los residuos generados en los procesos productivos son pérdidas netas de recursos materiales y energéticos, que no han sido incorporados en el producto final. Resulta lógico, por lo tanto, llevar a cabo todos los esfuerzos necesarios, **para reducir tales pérdidas de recursos e incrementar la productividad global del proceso**. De este modo, se logra una reducción de los residuos generados y también una disminución de los recursos consumidos por unidad de producto.

Este concepto de **eco-eficiencia** es uno de los pilares de las estrategias modernas de control ambiental, ya que al incrementar la eficiencia de utilización de los recursos, se reduce el impacto ambiental del proceso de producción:

$$\text{ECO-EFICIENCIA} = \frac{\text{PRODUCTOS}}{\text{RECURSOS CONSUMIDOS}}$$

Las nuevas estrategias para reducir el impacto ambiental derivado de la actividad industrial, se basan en un enfoque integral preventivo, que pone énfasis en una mayor eficiencia en la utilización de los recursos materiales y energéticos, incrementando simultáneamente la productividad y la competitividad.

Ello involucra la introducción de medidas tecnológicas y de gestión, orientadas a reducir los consumos de materiales y energía, prevenir la generación de residuos en su fuente misma, reducir los riesgos operacionales y otros posibles aspectos ambientales adversos, a través de todo el proceso de producción.

Esta estrategia preventiva e integral, tiene la ventaja de que considera el control ambiental como parte integral del proceso de producción, que surge como consecuencia de una gestión productiva más eficiente. Efectivamente, el control ambiental coincide con un mejor aprovechamiento de las materias primas y de la energía utilizadas, en base a un eficiente sistema de gestión, donde se aprovecha al máximo el potencial de la tecnología existente y se identifican, permanentemente, oportunidades de mejoramiento en todas las áreas y actividades de la empresa.

Las modificaciones tecnológicas e innovaciones a los procesos industriales aparecen como conclusión de un proceso de búsqueda de un mejor desempeño productivo, que persigue reducir costos e incrementar la eficiencia de dichos procesos, generando un aumento en los beneficios económicos de la empresa.

Todos estos elementos se integran en el concepto de Procesos Limpios¹. Lo que en la década de los 80 surgió como un nuevo paradigma de los países de mayor desarrollo industrial, se ha constituido en un principio fundamental para el desarrollo de la actividad industrial, en el contexto de una real sustentabilidad económica y ambiental.

Los Desafíos:

La Agenda 21 acordada en Río de Janeiro y las conclusiones del Tercer Foro de Desarrollo Productivo realizado en 1997, han fomentado la producción limpia como componente básico de una política de desarrollo económico-social. Estas políticas tienen como propósito general catalizar, incentivar y facilitar el aumento de la competitividad y el desempeño ambiental de las empresas, apoyando el desarrollo de la gestión ambiental preventiva para generar procesos de producción más limpios, incluyendo el uso eficiente de la energía y el agua. En concreto, ello implica:

- Promover la eficiencia de los procesos productivos, mejorando la competitividad de la empresa.
- Promover la prevención de la contaminación, minimizando la generación de residuos y emisiones lo más cercanamente a la fuente.
- Promover el uso eficiente de la energía y el agua.
- Incentivar la reutilización, la recuperación y el reciclaje de residuos
- Contribuir al desarrollo de tecnologías de abatimiento más eficientes, cuando éstas sean la única opción económicamente viable.

¹ Otros sinónimos utilizados comúnmente para expresar este concepto son :
“producción limpia”, “tecnologías limpias”, “procesos menos contaminantes”.

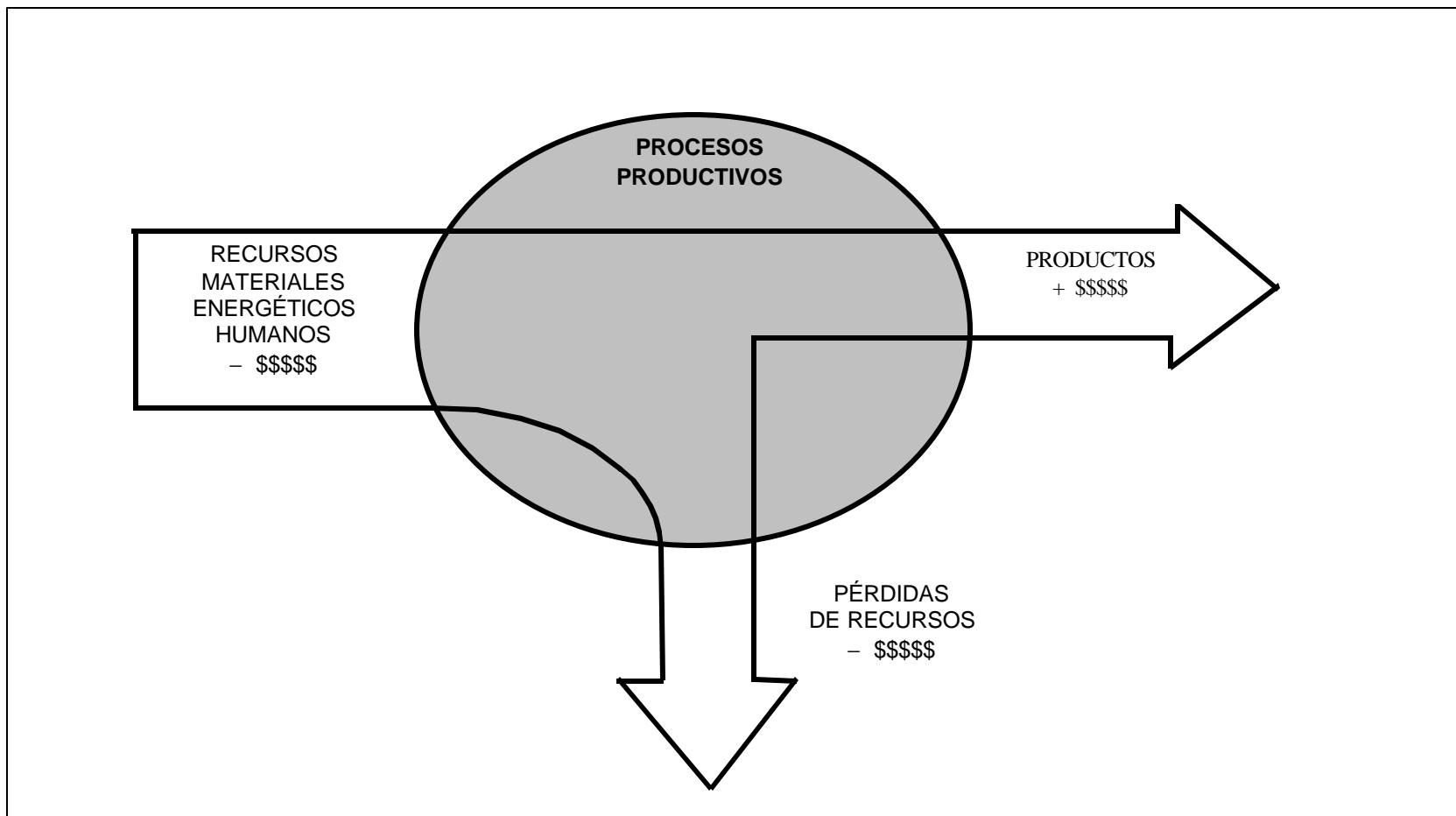


FIGURA 1: BALANCE DE RECURSOS EN LOS PROCESOS PRODUCTIVOS

Con ello se pretende enviar claras señales al sector industrial acerca de la necesidad de mejorar los procesos para un real aprovechamiento de todos los recursos, actuales y potenciales. Cada residuo debe ser visto como una oportunidad de nuevos negocios, de nuevos subproductos. Cada pérdida debe ser identificada y minimizada, pues atenta directamente contra la competitividad de la empresa. Cada producto fuera de especificación o sub-estándar debe ser visto como una amenaza a la existencia de la empresa.

2) DISEÑO DE PROCESOS LIMPIOS

El diseño de procesos limpios, se basa en el uso de las herramientas clásicas de la ingeniería, para concebir un esquema de producción, que considere tanto los aspectos técnico-económicos como los ambientales.

En este sentido, la experiencia acumulada en las últimas décadas ha permitido establecer algunos principios básicos orientadores, dentro de los cuales, se deben buscar las oportunidades para satisfacer los objetivos económicos y ambientales. La Tabla 1 resume tales principios técnicos generales, algunos de los cuales se exponen con mayor detalle en la Sección 4.

TABLA 1: PRINCIPIOS GENERALES PARA EL DISEÑO Y OPERACIÓN DE PROCESOS LIMPIOS

• Utilizar la evaluación de impacto ambiental como herramienta en todas las fases del diseño.
• Considerar los impactos ambientales inducidos por el proyecto, en todo el ciclo de vida del producto
• Minimizar la generación de residuos en su fuente, a partir de tecnologías de mayor eficiencia y de una gestión de producción adecuada.
• Seleccionar recursos materiales y energéticos con menor impacto ambiental potencial.
• Reducir los requerimientos materiales y energéticos, a través de la incorporación extensiva de procesos más eficientes y de sistemas de recuperación de recursos.
• Implementar sistemas de control robusto, que minimicen las desviaciones de las condiciones de operación fuera de los rangos aceptables.
• Privilegiar la reducción de riesgos de accidentes, durante todas las fases del proyecto.
• Implementar sistemas de tratamiento de residuos de alta eficiencia, con menores impactos ambientales secundarios.
• Adaptar las especificaciones de los productos, para facilitar la recuperación y el reciclado de los residuos derivados de su consumo.
• Segregar los diferentes flujos de materiales, de modo que sea posible la aplicación de los principios anteriores.
• Implementar sistemas de gestión integral: medio ambiente, aseguramiento de calidad, seguridad y salud ocupacional.

Los impactos ambientales asociados a cada alternativa de proceso, deben ser evaluados oportunamente y considerados en la selección de las opciones más atractivas, desde el punto de vista técnico, económico y ambiental. Esto se discute brevemente a continuación.

Importancia de la Gestión Ambiental

El desarrollo de procesos y tecnologías con menor impacto ambiental, ha ido acompañado de la generación de nuevos conceptos acerca de la gestión de procesos. La importancia de este aspecto ha sido ampliamente reconocida, ya que ninguna tecnología, por muy "limpia" que sea, podrá cumplir con su

objetivo de diseño, si no existe una gestión adecuada, que:

- Asegure un alto grado de compromiso, motivación y entrenamiento de todo el personal, en todos los niveles de la empresa,
- Desarrolle e implemente una política integral, que incluya los requerimientos de respeto al medio ambiente, aseguramiento de calidad, y altos estándares de seguridad y salud ocupacional,
- Permita un mejoramiento continuo de su accionar, adaptándose en forma proactiva a los cambios internos y externos.

3) LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL COMO HERRAMIENTA DE DISEÑO

Definiciones:

Impacto Ambiental²: *La alteración del medio ambiente, provocada directa o indirectamente por un proyecto o actividad en un área determinada.*

Aspecto Ambiental³: *Elemento de las actividades, productos o servicios de una organización, que puede interactuar con el ambiente. Representa cualquier tipo de materia, energía u otros recursos, que fluye desde el medio ambiente hacia el proceso industrial y viceversa, y que puede generar impacto ambiental.*

Evaluación de Impacto Ambiental: *Procedimiento que tiene por objetivo identificar, predecir e interpretar, los impactos ambientales que se producirían debido a la ejecución de un proyecto o actividad.*

La evaluación del impacto ambiental (EIA) es uno de los componentes esenciales del diseño de procesos limpios, ya que permite analizar los atributos ambientales, de las diferentes alternativas que surgen en la síntesis de un nuevo proceso.

Para los fines de diseño de procesos limpios, la EIA debería considerar el ciclo de vida completo, es decir “desde la cuna a la tumba”. Los recursos naturales (materiales y energéticos) son utilizados en una larga cadena de transformaciones, hasta producir un bien o servicio para el mercado de consumo. En cada etapa de este ciclo existen aspectos ambientales que afectan al medio ambiente y pueden producir impactos no deseables. La Figura 2 ilustra los principales aspectos ambientales del proceso productivo que pueden generar impactos directos e indirectos sobre el medio ambiente.

La metodología de EIA se encuentra ampliamente documentada en la literatura especializada (ver las referencias recomendadas). En términos generales, la aplicación de la EIA en el diseño de procesos implica:

- Identificar los aspectos ambientales del proyecto.
- Identificar los factores ambientales potencialmente afectados.
- Predecir y evaluar los impactos generados.
- Identificar las medidas necesarias para eliminar o minimizar los impactos no deseados.

Ello requiere, conocer las relaciones causa-efecto entre aspectos e impactos ambientales y contar con modelos matemáticos para fines predictivos.

La Tabla 2 resume los atributos que deben ser considerados en la evaluación ambiental de un proceso dado, en relación a los recursos materiales y energéticos, a la tecnología y a los productos finales. Es

² Definición de acuerdo a la Ley 19.300

³ Definición de acuerdo a la Norma ISO 14000

fundamental dar prioridad a la evaluación de impacto ambiental durante la síntesis misma del proceso, para así identificar y cuantificar los impactos ambientales, poniendo énfasis a aquellos aspectos que inciden directamente en la salud y seguridad de la población, y en la sustentabilidad de la actividad económica. La Figura 3 ilustra el procedimiento general utilizado para el diseño de procesos limpios.

Al incorporar la dimensión ambiental al ejercicio de diseño, los impactos deberían ser evaluados y valorados monetariamente, para ser incorporados en el análisis técnico-económico del proyecto. En el análisis convencional de los atributos económicos del proyecto, el ingeniero utiliza los costos y beneficios privados, para determinar la rentabilidad privada. La identificación y valoración de los impactos ambientales, permite cuantificar las externalidades asociadas al proyecto. De este modo, se puede estimar el costo (y/o beneficio) externo, para efectos de cálculo del costo/beneficio social del proyecto. Al incrementar la inversión (y/o el costo de producción) debido a la incorporación de tecnologías de abatimiento para reducir el impacto ambiental de los residuos, aumenta el costo privado y se reduce el costo externo. Estos conceptos, revisados brevemente en la sección 6, son claves en la toma de decisiones sobre el nivel de control ambiental "óptimo", requerido para minimizar el costo social asociado a los aspectos ambientales del proyecto. Sin embargo, es importante señalar que la valoración económica de los impactos ambientales es un área de gran complejidad, que se encuentra en pleno desarrollo, y no existen procedimientos sencillos para ello. Por ejemplo, la cuantificación económica del impacto debido al uso de recursos naturales y energéticos se puede hacer en base a los costos de reposición, los costos de oportunidad por usos alternativos, el valor como recurso estratégico, etc.

Para fines de diseño preliminar, es suficiente utilizar criterios relativos para valorar los impactos, de acuerdo a su magnitud e importancia ambiental, o a una valoración económica aproximada indirecta. En algunos casos, tales como en el análisis de los impactos asociados a las emisiones de residuos, se puede utilizar los costos de operación, para tratar los residuos dando cumplimiento a las normas de emisión correspondientes. De manera similar, los impactos potenciales debido a situaciones de emergencia derivadas de accidentes, se pueden estimar en base al daño esperado como consecuencia del evento accidental. Ello puede ser obtenido utilizando los procedimientos de análisis de riesgos ampliamente documentados en la literatura especializada (ver las referencias recomendadas).

Generalmente, en las primeras fases de la síntesis de procesos, se genera un alto número de alternativas. Por lo tanto, el objetivo de la evaluación preliminar es seleccionar aquellas que sean más atractivas desde los puntos de vista técnico, económico y ambiental. Para ello, se puede utilizar un mecanismo sencillo para hacer un "ranking" de opciones, donde se comparen los indicadores de rentabilidad económica (ej.: valor actualizado neto, tasa interna de retorno) con los indicadores de impacto ambiental y se seleccionen aquellas opciones de alto retorno y bajo impacto ambiental. Es necesario tener presente que la EIA de un proceso tiene un alto contenido de incertidumbre y de subjetividad. Debido a ello, es fundamental que todas las opciones sean estudiadas usando criterios comunes de evaluación.

3.1) Producción Limpia en Procesos Existentes

En muchos casos, los ingenieros enfrentan la tarea de mejorar el desempeño de empresas que llevan años de operación y que no presentan los estándares ambientales requeridos. El mejoramiento del desempeño ambiental de una empresa se logra mediante la implementación de:

- Medidas de gestión
- Modificaciones tecnológicas.

Tal como se observa en la Figura 4, en una primera fase se pueden alcanzar beneficios ambientales significativos a través de medidas de muy bajo costo, destinadas a mejorar la capacidad de gestión. Las modificaciones mayores implican grandes inversiones, por lo que sólo se deben implementar una vez que se hayan agotado las medidas de gestión tendientes a obtener el máximo potencial de la base tecnológica existente.

En la gran mayoría de los casos, la implementación de medidas de gestión va acompañada de

modificaciones tecnológicas menores relativamente sencillas y de bajo costo, destinadas a:

- Reemplazar y/o reparar aquellas unidades críticas que afectan la eficiencia operacional, la calidad del producto, la seguridad y el desempeño ambiental.
- Evitar pérdidas obvias de materiales y energía.
- Mejorar la capacidad para medir las principales variables de proceso e implementar sistema de control donde sea necesario.
- Facilitar la gestión y tratamiento de los residuos mediante una segregación racional que privilegie un mejor aprovechamiento de los recursos.

Para llevar a cabo tales medidas, es necesario identificar las principales debilidades y fortalezas de la empresa en materia ambiental, seguridad y salud ocupacional, incluyendo las oportunidades y amenazas que enfrenta.

Típicamente, la revisión (auditoría) inicial puede comprender los siguientes objetivos:

- Identificar los requisitos legales y reglamentarios relacionados con medio ambiente, seguridad y salud ocupacional. Interesan tanto los requisitos actuales, como aquellos que se prevén a mediano plazo, en el país e internacionalmente.
- Identificar los aspectos ambientales significativos asociados a las actividades de la empresa, los principales peligros operacionales y evaluar los niveles de riesgos respectivos. Verificar el cumplimiento con la normativa ambiental.
- Identificar aquellas actividades y/o unidades críticas desde los puntos de vista del ambiente, seguridad y salud ocupacional.
- Evaluar el desempeño ambiental, incluyendo seguridad y salud ocupacional, en base a criterios desarrollados internamente, normas externas, reglamentos, códigos de práctica y conjuntos de principios y guías pertinentes.
- Identificar las prácticas y procedimientos de gestión ambiental, aseguramiento de calidad y seguridad existentes en la empresa.
- Identificar opciones de mejoramiento ambiental, seguridad y salud ocupacional
- Evaluar los puntos de vista de las partes interesadas internas y externas.
- Identificar aquellos elementos dentro de la estructura orgánica de la empresa que pueden ayudar o impedir el mejoramiento en el desempeño ambiental.

En la literatura especializada se detallan los componentes de un sistema de gestión moderno y la metodología para la realización de auditorías ambientales; además, se entregan orientaciones para su implementación, en el contexto de las Normas ISO 14000 (ver las referencias recomendadas).

TABLA 2: ATRIBUTOS A CONSIDERAR EN EL DISEÑO DE PROCESOS LIMPIOS

ACERCA DE LAS MATERIAS PRIMAS
<ul style="list-style-type: none"> • Abundancia de materias primas en el sistema. Fuentes y tasas de renovación. • Impactos ambientales durante la extracción, transporte y almacenamiento de dichas materias primas. • Niveles de toxicidad, reactividad, inflamabilidad, volatilidad y otras características relevantes para la salud, la seguridad y el ambiente. • Presencia de componentes potencialmente contaminantes que no son consumidos durante el proceso de manufactura y que pueden generar residuos no deseados. Características de dichos componentes. • Potencial reciclable de los residuos.
ACERCA DE LOS RECURSOS ENERGÉTICOS
<ul style="list-style-type: none"> • Requerimientos energéticos del proceso, fuentes primarias de energía y su impacto ambiental. • Disponibilidad local de los recursos energéticos. • Eficiencias de utilización energética. • Impactos ambientales asociados con su generación y consumo, riesgos de accidente, etc.. • Valor estratégico de los recursos energéticos requeridos.
ACERCA DE LOS RECURSOS TECNOLÓGICOS
<ul style="list-style-type: none"> • Eficiencia de utilización de los recursos materiales y energéticos. • Controlabilidad y estabilidad operacional. • Riesgos operacionales; áreas críticas del proceso; factores de seguridad utilizados; materiales peligrosos, etc.. • Nivel de complejidad tecnológica. Requerimientos de entrenamiento, mantención y gestión de producción. • Sistemas de tratamiento de residuos gaseosos, líquidos y sólidos; estabilidad operacional; efectos potenciales de compuestos inhibidores en los residuos; residuos secundarios; cambios de fase.
ACERCA DE LOS PRODUCTOS
<ul style="list-style-type: none"> • Naturaleza del producto; composición, estabilidad, peligrosidad. • Riesgos en el almacenamiento, transporte y consumo de los productos. • Residuos secundarios generados en el consumo. Características, peligrosidad, riesgos asociados a su recolección y vertido. Potencial reciclable. Mercado potencial. Costos de recolección y transporte, incentivos económicos, etc..

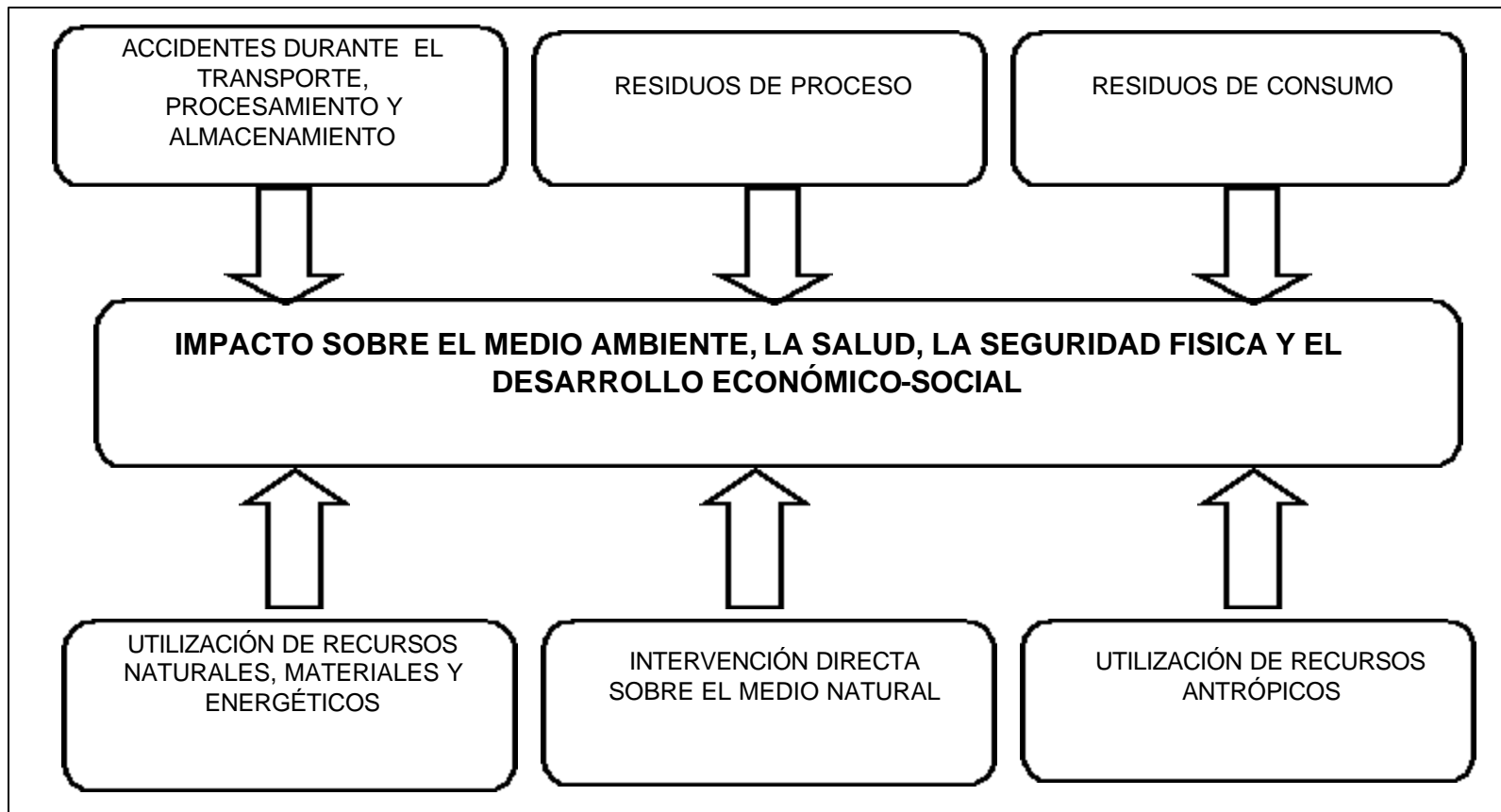


FIGURA 2: PRINCIPALES ASPECTOS AMBIENTALES DE LA ACTIVIDAD PRODUCTIVA

ASPECTOS AMBIENTALES DE LA ACTIVIDAD PRODUCTIVA

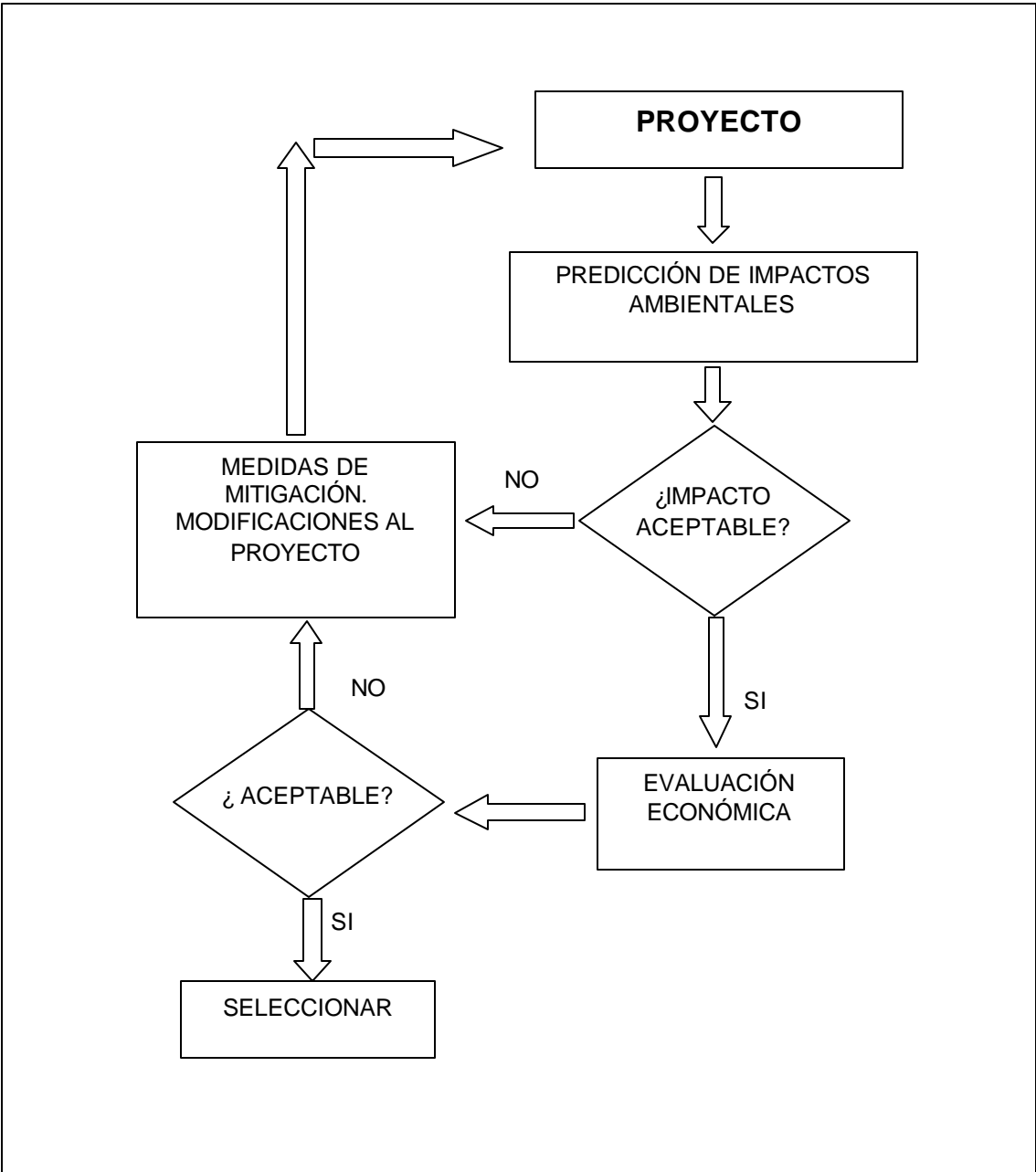


FIGURA 3: DISEÑO DE PROCESOS LIMPIOS

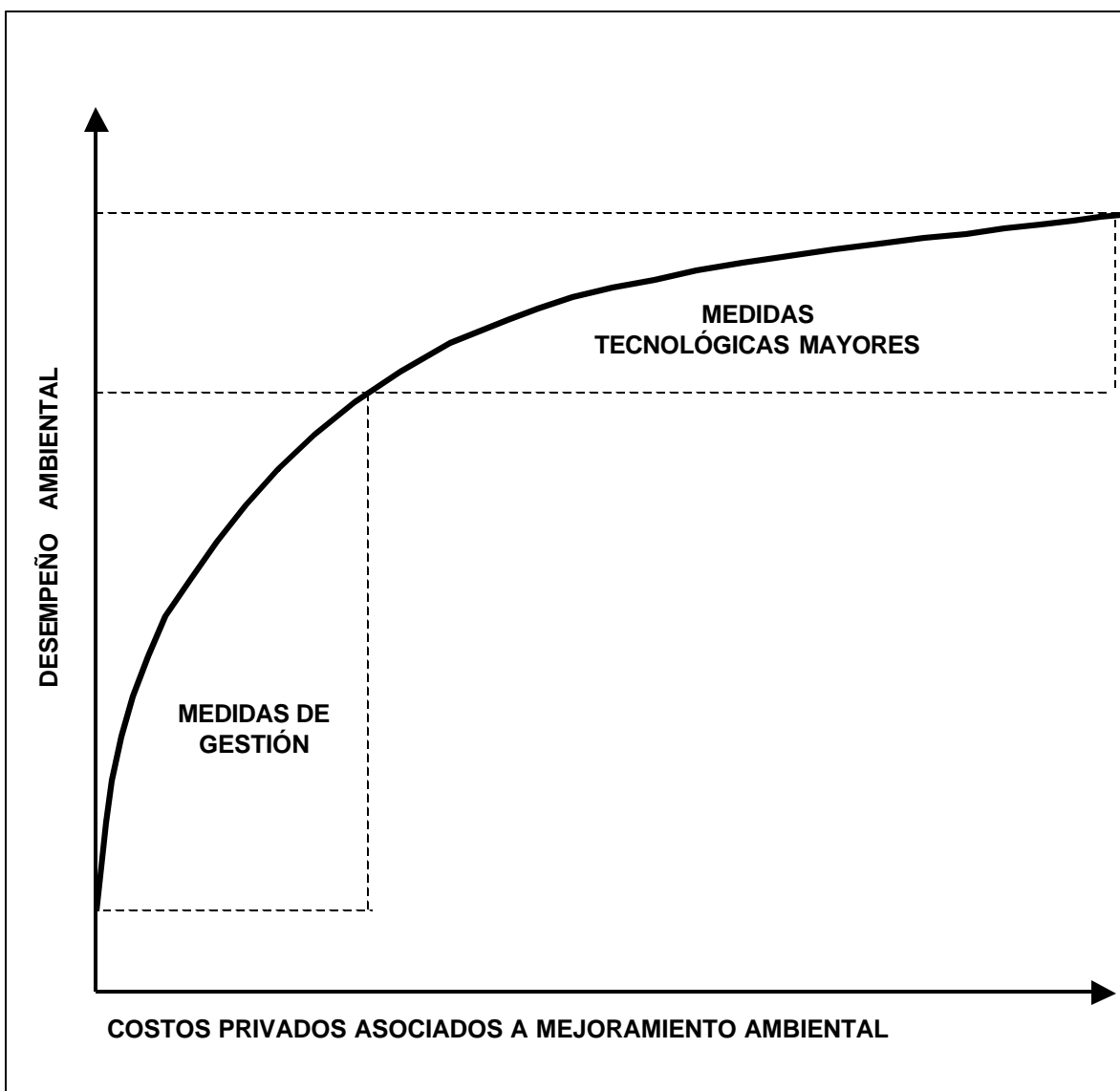


FIGURA 4 : EFECTO DE LAS MEDIDAS DE MEJORAMIENTO AMBIENTAL

4) ESTRATEGIAS PARA LA REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES DE RESIDUOS INDUSTRIALES

Las emisiones de residuos materiales y energéticos se pueden reducir por diferentes vías complementarias, cuyos principios básicos son:

- Prevenir la generación del residuo en su fuente misma.
- Reciclar y reutilizar aquellos residuos inevitables, con valor potencial de uso.
- Conservar energía y agua.
- Segregar los desechos para una mejor reutilización y/o tratamiento.
- Utilizar sistemas de tratamiento de mayor eficiencia de depuración, para líneas residuales segregadas.
- Integrar conceptos ambientales a la gestión de producción.

A continuación se revisará brevemente algunos de los componentes claves de una estrategia moderna de control ambiental basada en estos conceptos, ilustrados en la Figura 5.

4.1) Reducción de Residuos

La reducción del volumen de residuos generados tiene un impacto directo, tanto en el costo de tratamiento final, como en la productividad global del proceso. Las opciones existentes para lograr tal objetivo implican medidas de tipo tecnológico y de gestión.

El primer curso de acción a seguir para reducir las emisiones de residuos consiste en prevenir su generación o minimizarlos en su fuente misma, utilizando algunas de las opciones ilustradas en la Figura 5. En seguida, aquellos residuos que no puedan ser prevenidos, deben ser gestionados para facilitar su recuperación y reutilización o reciclado⁴. Finalmente, los residuos que no puedan seguir dicho destino deberán ser tratados para su posterior disposición final, de acuerdo a las normas vigentes. Los residuos segregados pueden ser tratados en sistemas de tratamiento de mayor eficiencia depurativa.

En general, existen dos mecanismos generales a través de los cuales se puede lograr una reducción de las emisiones de residuos:

1. **Medidas de Prevención:** En la mayoría de los casos, el manejo cuidadoso de las operaciones, una buena supervisión, un alto nivel de entrenamiento y motivación, la mantención preventiva y, en general, prácticas adecuadas, pueden conducir a una reducción sustancial de las pérdidas materiales y energéticas. Es importante recalcar la importancia que tiene la mantención preventiva de los equipos clave y la ejecución de auditorías ambientales periódicas. Estas últimas permiten identificar claramente aquellas operaciones y procedimientos causantes de pérdidas de recursos.
2. **Modificaciones al Proceso:** Durante el diseño de los procesos y equipos, se debe tener presente minimizar las pérdidas de materiales y energía, y la carga contaminante de las emisiones finales al ambiente. Cuando se trata de instalaciones industriales que ya están en su fase operacional, se debe identificar las modificaciones necesarias para lograr dichos objetivos. Normalmente, dichas modificaciones son técnicamente sencillas y de bajo costo.

Es muy importante recuperar todo recurso potencialmente utilizable, presente en los residuos, mediante medidas de segregación y separación apropiadas. Los residuos recuperados pueden ser reutilizados en el proceso o transformados para producir nuevos productos. Por ejemplo:

⁴ La reutilización y el reciclaje son procesos mecánicos, manuales o automáticos, mediante los cuales se puede recuperar diferentes tipos de residuos. La reutilización es una técnica de reaprovechamiento de un material o producto, sin cambiar su forma o naturaleza original. El reciclaje, por su parte, es la transformación de ciertos materiales en materia prima para procesos productivos. Ambos procesos se presentan como una alternativa para reducir los volúmenes de residuos a ser dispuestos, transformándolos en un insumo más dentro de la cadena productiva que los generó. Estos procesos no son aplicables a todos los residuos, debido a que algunos no son recuperables, otros no tienen demanda, o porque no existe la tecnología necesaria para su tratamiento.

- En la industria láctea, se puede recuperar en forma higiénica el suero de leche para su posterior comercialización como concentrado o producto seco. La proteína del suero de leche puede comercializarse como suplemento alimenticio de alto valor. La lactosa del suero puede ser fermentada para producir enzimas (ej.: pectinasa)
- Las grasas del procesamiento de animales pueden tener mercado como materia prima para la industria química.
- Las levaduras y granos residuales de la industria cervecera pueden ser usados como alimento animal.
- Las cáscaras de coco u otros residuos lignocelulósicos pueden ser transformados en carbón activado de alta calidad a través de procesos termoquímicos.
- Los lodos de tratamiento biológico pueden ser transformados en abono agrícola, mediante compostado.
- Los residuos de madera pueden ser utilizados como materia prima para producción de fibra, o como combustible para generación de vapor y energía eléctrica.
- La fibra recuperada de los efluentes de la máquina papelera puede ser reciclada, utilizada como combustible o para fabricación de cartones.
- El H_2S generado en los procesos de hidrogenación catalítica del petróleo, puede ser separado del resto de los gases y utilizado para producir sulfidrato de sodio, azufre elemental o sulfatos.
- Los residuos líquidos de curtiembre que contienen cromo pueden ser segregados y procesados para recuperarlo.
- Los residuos de pescado de la industria conservera pueden ser utilizados como materia prima para la producción de harina de pescado.
- El SO_2 de los residuos gaseosos de las plantas refinadoras de mineral de cobre sulfurado puede ser separado y utilizado para producción de H_2SO_4 .

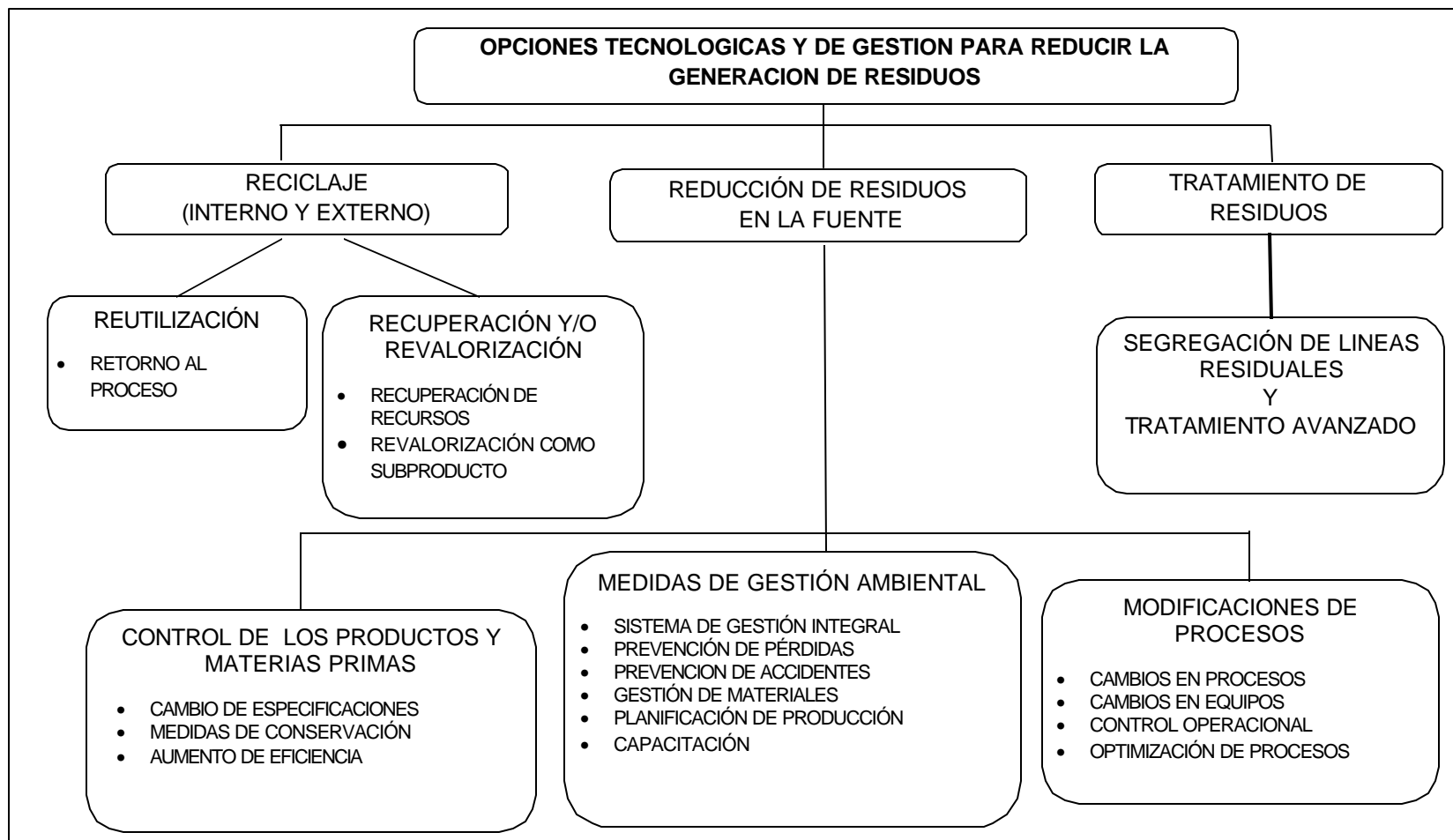


FIGURA 5: ALTERNATIVAS PARA REDUCIR LAS EMISIONES DE RESIDUOS

En el caso de la industria de alimentos, es importante mantener prácticas de segregación adecuadas, para asegurar los estándares de higiene y la alta concentración requeridos para posibilitar la recuperación de los materiales de valor.

La factibilidad de estos procesos está determinada por consideraciones técnicas y económicas, tales como, escala de producción, costos de recuperación y procesamiento secundario, precios, etc.. Los dos primeros juegan un papel determinante. Además, se debe considerar la reducción de los costos de tratamiento, debido a la eliminación de parte de la carga contaminante original. Este aspecto se discute brevemente en la sección 6, al final de este texto.

4.2) Medidas Prácticas para la Reducción de los Residuos

Existen innumerables ejemplos de modificaciones a procesos industriales que han generado significativos incrementos en la productividad y una drástica reducción en la generación de residuos. Algunas de las medidas de interés, implementadas en la industria de procesos, se enumeran a continuación:

a) Reducción de Pérdidas Innesarias de Materiales

- Mejorar los sistemas de carga y almacenamiento (tanques con control de nivel; uso de cañerías, válvulas y bombas que no presenten pérdidas de líquidos).
- Instalar sistemas más efectivos de control de calidad de materias primas e insumos, para evitar el uso de materiales que no cumplan con las especificaciones del proceso (composición, propiedades físico-químicas, presencia de contaminantes potenciales, etc.).
- Establecer procedimientos de mantención para evitar el deterioro de los controladores, y equipos de almacenamiento y transporte de materiales que pueden ser fuente de pérdidas
- Implementar sistemas eficientes de control de inventarios, para coordinar el volumen de las adquisiciones con los requerimientos de producción, teniendo en cuenta la vida útil de los recursos (muy importante en el caso de materiales biodegradables y/o químicamente inestables); además, se debe contar con sistemas de identificación de materiales y sistemas de adquisición y procesamiento de datos que faciliten la gestión.
- Reducir las pérdidas entre lotes (en operaciones discontinuas), recuperando los materiales antes de las operaciones de lavado, después de la descarga del producto.
- Seleccionar sistemas de válvulas y cañerías con baja retención de líquido durante el drenaje.
- Reducir las pérdidas durante las operaciones transitorias de la planta (puesta en marcha y detención, cambios de niveles de producción, cambios en las materias primas y condiciones de operación, etc.).

b) Reducción de los Requerimientos Energéticos

- Implementar una mejor integración energética (ej. precalentamiento de las corrientes de alimentación, utilizando corrientes de alta temperatura que requieren ser enfriadas, diseño mejorado de los sistemas de intercambiadores de calor).
- Utilizar los desechos combustibles para generar energía *in-situ*. No incinerar materiales con contenido halogénico o alto contenido de compuestos de azufre. Mantener sistemas eficientes para controlar las emisiones de combustión.
- Usar aislación adecuada en cañerías y estanques de almacenamiento de fluidos a temperaturas extremas.

c) Selección de Materiales de Menor Impacto Ambiental

- Usar materias primas e insumos que no generen residuos no deseados (ej. combustibles con bajo contenido de azufre y cenizas).
- Seleccionar solventes que sean recuperables o que no contaminen las corrientes residuales no recuperables.
- Seleccionar materiales que, debido a sus propiedades, puedan ser utilizados con mayor eficiencia o ser recuperados económicamente.

d) Modificaciones al Proceso de Transformación

- Mejorar el diseño de los reactores, para permitir una mayor productividad y utilización de los recursos materiales y energéticos.
- Uso de herramientas de modelación y optimización, para seleccionar las condiciones de operación, con vistas a minimizar las pérdidas.
- Implementar controladores que permitan mantener las condiciones de operación óptimas.

e) Implementar Sistemas de Separación y Purificación Eficientes

- Reducir las pérdidas de materiales en los sistemas de lavado de los productos intermedios (ej. lavadores de difusión radial de alta eficiencia).
- Evitar la generación y emisión de componentes orgánicos volátiles durante las operaciones de secado y/o eliminación de solventes (ej.: usando secado indirecto con sistemas de depuración de los gases residuales).
- Eliminar agua u otros solventes, usando sistemas que faciliten su recuperación y reduzcan las emisiones.
- Recuperar los solventes en los procesos de extracción líquido-líquido.
- Reducir el contenido de agua de los residuos sólidos.

f) Reducción del Consumo de Aguas y del Volumen de Efluentes Líquidos

- Implementar sistemas de uso de agua en contracorriente, usando las aguas limpias sólo en áreas donde sea estrictamente necesario.
- Reducir el consumo de agua de lavado, usando sistemas de alta presión, selección adecuada de detergentes, pre-lavado en seco, etc..
- Reciclar y reutilizar el agua; recuperar las aguas de enfriamiento y condensados.
- Segregar las corrientes de aguas limpias (reutilizables) de aquellas contaminadas.

g) Segregación de Líneas Residuales

- Separar corrientes que contengan materiales que sean recuperables, de aquellas que no lo sean. Ello permite recuperar recursos.
- Separar corrientes con materiales tóxicos, patogénicos o explosivos, para una gestión efectiva.
- Separar líneas de alto volumen y baja concentración, para reutilización de aguas.
- Separar los residuos biodegradables, para facilitar su tratamiento biológico en sistemas de menor volumen.
- Separar las líneas que contengan material combustible, sin contenido halogénico y con bajo contenido de azufre, para aprovechar su contenido energético.

h) Sistemas de Tratamiento de Residuos

- Implementar sistemas de tratamiento adecuados a la naturaleza de los desechos.
- Considerar el tratamiento de residuos al mismo nivel de importancia que las operaciones del proceso principal. Usar herramientas avanzadas de diseño, modelamiento, simulación, optimización y control. Mantener una operación óptima y estable, con alta eficiencia de remoción.
- Control efectivo de las emisiones gaseosas y líquidas.
- Tratamiento y disposición de sólidos, con mínimo impacto ambiental.
- Identificar residuos secundarios generados durante el tratamiento. Diseñar sistemas para su manejo y tratamiento posterior.

i) Reducir los Riesgos de Accidentes

- Gestión segura de los materiales peligrosos presentes en el proceso.

- Realizar análisis de riesgos periódicos.
- Contar con planes de prevención, medidas para afrontar emergencias, planes de contingencia.
- Sistemas eficientes de entrenamiento de personal en todos los aspectos operacionales asociados a medio ambiente y seguridad.
- Implementar un programa sistemático de mantención preventiva de equipos y controladores críticos.
- Privilegiar aquellos diseños que minimicen los riesgos de accidentes (incendio, explosión o emanaciones tóxicas).

j) Implementar un Sistema de Gestión Integral

- Implementar un sistema de gestión que tenga como objetivo llevar a cabo las políticas de la empresa en materias de medio ambiente, calidad, seguridad y salud ocupacional.
- Entrenamiento e información.
- Mantener procedimientos documentados y actualizados.
- Mantener niveles de instrumentación adecuados para una gestión efectiva.
- Evaluación de desempeño ambiental periódica.
- Mantener actualizada la información sobre tendencias en la legislación.
- Sugerir cambios en los procesos y especificaciones de las materias primas y productos, para un mejoramiento del desempeño ambiental.
- Mantención preventiva de los equipos e instrumentos críticos.
- Mejoramiento continuo.

4.3) Segregación de Residuos

Como se mencionó anteriormente, la segregación de las líneas residuales facilita un manejo más racional y permite diseñar sistemas de tratamiento, de acuerdo a las características específicas de cada línea. La segregación de residuos permite reducir los costos de capital de los sistemas de tratamiento y vertido, debido a la disminución del volumen de desechos que requieren atención.

A continuación se presenta algunas categorías generales para residuos líquidos, sólidos y gaseosos, en el contexto de establecer medidas de segregación.

Residuos Líquidos:

En general, las categorías generales de residuos líquidos, aplicables a toda industria, corresponden a:

- **Aguas de Lavado de Equipos e Instalaciones:** Constituyen una fracción significativa de la demanda de agua en la industria de procesos. En particular, el sector agro-alimenticio es un importante consumidor de aguas de lavado, ya que se requiere un alto nivel de higiene en sus operaciones. Las aguas residuales del lavado contienen compuestos disueltos y sólidos suspendidos que reflejan la naturaleza de los materiales utilizados en los procesos. En muchos casos, se incluyen detergentes y compuestos químicos biocidas, utilizados para mantener condiciones de higiene en el equipamiento. Por su naturaleza, dichas aguas constituyen la mayor fuente de contaminación del efluente final y deben ser tratadas antes de su vertido a los cuerpos receptores.
- **Aguas de Lavado de Materias Primas y Productos:** Las operaciones de lavado de materias primas y productos son muy frecuentes en la industria de alimentos sólidos de origen agrícola, donde es necesario limpiar la materia prima previo a su procesamiento y asegurar las condiciones de higiene del producto final. En otros casos, la materia prima se trata con agua para mantener un alto contenido de humedad, como por ejemplo el riego de trozas de madera en la industria forestal. Las aguas residuales de estas operaciones contienen compuestos solubles y sólidos suspendidos provenientes de los materiales sometidos a lavado.
- **Aguas de Limpieza de Derrames:** Esta fuente de residuos líquidos es muy importante en aquellos casos donde los derrames corresponden a compuestos químicos tóxicos, reactivos, inflamables o

corrosivos. Esta fuente de agua residual está asociada a fallas en el funcionamiento de los equipos involucrados en el almacenamiento, transporte y procesamiento de materiales (ej.: cañerías, bombas, correas transportadoras, estanques, reactores, etc.). Se debe priorizar la recuperación de estos materiales, estableciendo las medidas de contención apropiadas y evitando que se mezclen con otras líneas líquidas. Estos eventos se pueden prevenir, mediante un correcto dimensionamiento de los equipos, un efectivo control operacional y una adecuada mantención preventiva.

- **Aguas de Lavado de Gases:** Estas son frecuentes en aquellas industrias que generan gases solubles o condensables, los que pueden ser recuperados a través de absorción en medio acuoso. Las aguas residuales de este proceso contienen parte de los compuestos absorbidos, además de aditivos que se haya utilizado para incrementar la solubilidad.
- **Aguas de Procesamiento:** Aquí se incluyen aquellas aguas utilizadas en procesos de cocción, escaldado, impregnación, transporte hidráulico, reacción en medio acuoso, flotación y lixiviación de minerales, u otras que implican un contacto directo con las materias primas, insumos y productos intermedios. Las aguas residuales de estas operaciones son fuente de pérdidas de materiales y son altamente atractivas para la recuperación de tales recursos. Se incluyen aquí las aguas provenientes de los laboratorios de investigación y desarrollo, control de calidad u otros que pueden generar residuos líquidos con alta carga de reactivos químicos.
- **Aguas de Enfriamiento / Calentamiento:** Debido a su alto calor específico y calor latente de vaporización, el agua es el principal medio de transporte de energía calórica en la industria de procesos. Estas aguas no deberían contener materiales disueltos provenientes del proceso, ya que el intercambio de calor se efectúa, normalmente, a través de paredes que separan el agua del medio a enfriar o calentar. Sin embargo, en muchos casos, ellas presentan un nivel de temperatura demasiado alto para su vertido directo en los medios receptores, debiendo ser enfriadas previamente mediante torres o lagunas de enfriamiento. Por otra parte, estas aguas contienen un potencial energético que puede ser recuperado a través de una adecuada integración en el proceso. Esto es particularmente relevante, para aquellas industrias que utilizan extensivamente el agua como agente térmico (por ejemplo, refinación del petróleo, producción de celulosa y papel).
- **Aguas Sanitarias:** Estas aguas son las que provienen de los servicios sanitarios de la planta, casino, cafetería, etc.. Normalmente, son descargadas a los sistemas de alcantarillado locales o tratadas internamente. Contienen organismos fecales y pueden constituir un riesgo de infección en la planta si son manejadas en forma inadecuada. En la mayoría de las plantas modernas, estos efluentes se mantienen totalmente segregados de aquellas líneas residuales que presentan un potencial para recirculación, reutilización y/o recuperación de recursos.
- **Aguas para el Control de Incendios:** Aquellas industrias que procesan materiales combustibles se encuentran expuestas al peligro de incendio. En caso de producirse dicha emergencia, se consumirán importantes cantidades de agua para combatir el fuego, generando aguas residuales con alta carga contaminante. Dichas aguas no se producen como parte de la operación normal de la planta y se debe contar con planes de contingencia para su adecuada gestión.

Residuos Sólidos:

Los residuos sólidos de origen industrial pueden generarse a partir de diferentes fuentes:

- **Materias primas no utilizables:** Generalmente, ello es debido a que están fuera de especificación o constituyen pérdidas durante el procesamiento. Son un objetivo primario de gestión, ya que son un claro indicativo de fallas en el sistema de aseguramiento de calidad y en el control de procesos.
- **Residuos provenientes de partes no utilizables de las materias primas:** Son componentes de la material prima que no pueden ser incorporados directamente en el producto final; por ejemplo, la corteza en la industria forestal. En algunos casos, pueden ser usados como recurso en otros procesos o, cuando sea posible, reducidos mediante una selección apropiada de la materia prima.

- **Productos elaborados o semielaborados, fuera de especificación:** En general reflejan fallas en los sistemas de control de procesos y en los procedimientos operacionales. Si no tienen valor comercial, se deben reducir mediante un buen control de las condiciones de operación.
- **Residuos finales de los procesos:** Son residuos generados en los procesos, tales como, escorias y cenizas de combustión, adsorbentes agotados, catalizadores desactivados, compuestos sólidos intermedios sin valor.
- **Sólidos residuales secundarios:** Se generan en los sistemas de tratamiento de residuos líquidos (ej.: lodos de sedimentación, lodos biológicos) y/o gaseosos (ej. cenizas y polvos de los filtros, precipitadores o ciclones).
- **Envases y otros contenedores de materias primas e insumos.** Se debe privilegiar el reciclado de los envases a los proveedores. En muchos casos, son la principal fuente de residuos sólidos peligrosos (ej.: envases de solventes orgánicos, de compuestos biocidas, de soluciones con metales pesados, etc.).

Residuos Gaseosos

- **Gases de combustión:** La mayor parte de los residuos gaseosos de origen industrial son gases de combustión, generados en hornos, calderas y motores de combustión interna, donde se utilizan combustibles orgánicos (ej. gas natural, leña, petróleo, diesel, carbón, biomasa, etc). Dichos gases son emitidos a la atmósfera a través de chimeneas, previo tratamiento depurativo para cumplir con las normas respectivas.
- **Gases de Proceso:** En otros casos, los gases residuales se derivan directamente del procesamiento de las materias primas, ofreciendo interesantes oportunidades para su segregación y tratamiento diferenciado. Por ejemplo:
 - Mercaptanos y otros sulfuros reducidos (TRS) generados en los procesos de producción de celulosa kraft. Se pueden recolectar de las diferentes fuentes e incinerar en hornos especiales.
 - Aminas volátiles, generadas durante la pirólisis de proteínas en el tratamiento térmico de harina de pescado. Pueden ser recolectadas e incineradas.
 - Acido sulfídrico generado en el hidrotreatmento del petróleo. Su recuperación permite su utilización como materia prima para fabricación de sulfhidrato de sodio, azufre, o sulfato.
 - Dióxido de azufre generado en la piro-refinación de cobre. La opción más utilizada es producir ácido sulfúrico a partir de dichos óxidos.

Todas estas categorías de residuos constituyen opciones de segregación que pueden facilitar su manejo. Es importante identificar y segregar aquellos residuos peligrosos, es decir, aquellos que sean tóxicos, inflamables, corrosivos o reactivos. Su separación del resto de los residuos, tanto sólidos como líquidos, permite una mejor gestión a más bajo costo. Además, facilita la identificación de opciones para reducir su tasa de generación en la fuente misma.

La naturaleza de la segregación depende también de factores económicos y técnicos, los cuales deben ser tomados en consideración en etapas preliminares del ejercicio de diseño.

La Tabla 3 enumera algunos criterios para segregar los residuos:

TABLA 3: CRITERIOS PARA LA SEGREGACIÓN DE RESIDUOS

CRITERIOS PARA SEGREGACIÓN
Componentes Tóxicos
Solventes Orgánicos
Grasas/Aceites
Iones Metálicos Pesados
Material Orgánico Biodegradable
Materiales Recalcitrantes (no-biodegradables)
Acidos/bases Fuertes
Residuos Líquidos con Alto Contenido de Sólidos Suspendidos
Proteínas y otros materiales valiosos
Compuestos con Alto Poder Calorífico

En general, se pueden identificar 3 objetivos en la segregación de líneas residuales, los que se revisan brevemente a continuación:

a) Recuperación de Recursos Materiales

Es frecuente encontrar que algunas líneas residuales contienen una considerable carga de compuestos que pueden ser recuperados para su reutilización en el proceso, comercialización como subproductos o procesamiento para generar nuevos productos de mayor valor agregado. La recuperación de dichos recursos materiales resulta atractiva en aquellos casos donde los costos asociados a los procesos de separación y purificación son inferiores a los beneficios por concepto de ahorro de recursos e ingresos por comercialización.

Los procesos de separación se encuentran ampliamente implementados a nivel industrial y aprovechan las diferencias de tamaño, solubilidad, volatilidad, carga electrostática, densidad, u otras propiedades físico-químicas de los compuestos a separar. En general, a medida que aumenta la concentración de los compuestos a recuperar, los procesos de separación presentan menores dificultades técnicas, con costos de operación más bajos. La segregación de las líneas residuales de interés permite mantener una concentración más alta de los compuestos de valor y, a su vez, evitar la contaminación de dichas corrientes con compuestos no deseados provenientes de otras operaciones de la planta.

b) Recirculación y Reutilización de Agua

Es frecuente encontrar líneas residuales cuyas características físico-químicas les permiten ser utilizadas en otras áreas del proceso. En muchos casos, dichas aguas pueden ser reutilizadas directamente, mientras que en otras situaciones se requiere su condicionamiento a través de una operación relativamente simple y de bajo costo (ej.: eliminación de sólidos gruesos, neutralización, enfriamiento).

Por ejemplo, en la industria de envasado de frutas, se puede usar agua fresca en las etapas finales del proceso (ej.: lavado de los productos), y luego reutilizarla en las operaciones precedentes (ej.: transporte hidráulico y lavado de materias primas). Así mismo, el lavado preliminar de los equipos e instalaciones de proceso se puede llevar a cabo usando agua de enfriamiento y otras líneas residuales con baja carga contaminante. Estos aspectos se presentan con más detalle en la siguiente sección.

Finalmente, se debe tener en consideración que el cierre de los circuitos de agua se encuentra limitado por la acumulación de materia y energía térmica. Se debe extraer parte de los materiales y energía acumulados para mantener niveles aceptables, compatibles con los requerimientos de calidad de las operaciones donde dicha agua se reutilizará. La purga debe ser calculada en base a un balance de materia y energía en torno al sistema de recirculación.

c) Tratamiento Depurativo de Mayor Efectividad

Las mayores exigencias impuestas a las emisiones de residuos, en términos tanto de la carga contaminante como de su concentración en el residuo final, han tenido como consecuencia un incremento significativo en los costos de tratamiento. En este sentido, la segregación de las líneas residuales permite reducir los flujos volumétricos a tratar, requiriendo equipos de menor tamaño y de más bajo costo.

El diseño conceptual de sistemas de tratamiento para corrientes segregadas debe tomar en consideración los aspectos económicos del proceso, ya que la segregación implica una mayor complejidad en el sistema de almacenamiento y transporte de aguas residuales. A su vez, se abre una gran oportunidad para introducir operaciones unitarias de mayor nivel de sofisticación y efectividad, como por ejemplo:

- Tratamientos físicos y químicos avanzados.
- Procesos biológicos de alta eficiencia.
- Oxidación catalítica de compuestos orgánicos
- Destrucción térmica a alta temperatura.
- Estabilización y solidificación, etc.

Ello obliga a introducir herramientas de diseño y optimización de procesos comúnmente utilizadas en ingeniería de reactores.

Ejemplo: Tratamiento segregado de residuos líquidos:

La Tabla 4 muestra el resultado de un estudio preliminar de líneas residuales en una industria de fibra. Las corrientes rotuladas A, B y C representan los efluentes de aguas de enfriamiento, aguas de lavado de materias primas y aguas de destintado, respectivamente. En la Tabla aparecen los flujos volumétricos y las concentraciones y flujos máxicos promedio de materia orgánica biodegradable (medida como DBO₅) y sólidos suspendidos (SS). Además, se incluyen los valores límites establecidos de acuerdo a las normas locales.

TABLA 4: CARACTERIZACION DE LINEAS RESIDUALES

	Flujo	DBO ₅		S.S.	
		kg/m ³	kg/h	kg/m ³	kg/h
Efluente A	60	0,10	6,0	0,02	1,2
Efluente B	30	1,00	30,0	1,00	30,0
Efluente C	50	1,00	50,0	0,10	5,0
Efluente General A+B+C	140	0,61	86,0	0,26	36,2
Valores Límites Aceptados	-	0,10	14,0	0,10	14,0

La Figura 6 presenta dos alternativas de tratamiento. La primera, considera el tratamiento del efluente general mediante un sistema convencional de separación de sólidos suspendidos, seguido de un tratamiento biológico aeróbico. La segunda opción, propone el tratamiento diferenciado de los efluentes segregados, de acuerdo a sus características y a los requerimientos de la norma de vertidos. En la Figura 6 se incluyen los flujos máxicos de DBO₅ y S.S. a través de los procesos propuestos. Los requerimientos de depuración en cada uno de los casos evaluados son perfectamente alcanzables con unidades convencionales de sedimentación primaria y lodos activados.

En este ejemplo, se puede observar que la segregación de las corrientes permite una reducción de tamaño de 79% y 44% para el sedimentador primario y el bioreactor, respectivamente. Estos resultados son ilustrativos de las importantes reducciones en los costos de capital asociados al tratamiento de efluente mediante una segregación adecuada de las corrientes residuales.

6.5) MEDIDAS DE CONSERVACIÓN DE AGUA

La escasez de agua alcanza niveles críticos en muchas regiones debido a cambios climáticos y sequías prolongadas. Generalmente, el consumo de agua industrial constituye un aspecto ambiental altamente significativo debido a:

- La presión que ello puede ejercer sobre sistemas hídricos frágiles.
- La competencia con otros usuarios por el recurso hídrico (por ejemplo, usos agrícolas, fuente de agua potable, fuente de energía eléctrica, usos recreativos).

Más aún, el costo de tratamiento de los residuos líquidos está directamente asociado al volumen de agua a tratar. Como consecuencia, existe un creciente incentivo a nivel mundial para invertir en sistemas que permitan reducir el consumo de agua. Estos esquemas, normalmente, incluyen:

- Medidas para una reducción efectiva del consumo en su fuente.
- Recuperación, recirculación y reutilización de las aguas de proceso.

La reducción del consumo de agua constituye uno de los principales desafíos de diseño en la industria de procesos. La Tabla 5 enumera una serie de medidas recomendadas normalmente para reducir el consumo de agua.

Estas medidas deben ser aplicadas a las diferentes categorías de aguas residuales mencionadas anteriormente, en la sección 4.3. En particular, los requerimientos de aguas de lavado pueden ser reducidos drásticamente si se incorporan medidas para disminuir las pérdidas innecesarias de materiales líquidos, tales como aquellas recomendadas en la sección 4.2.

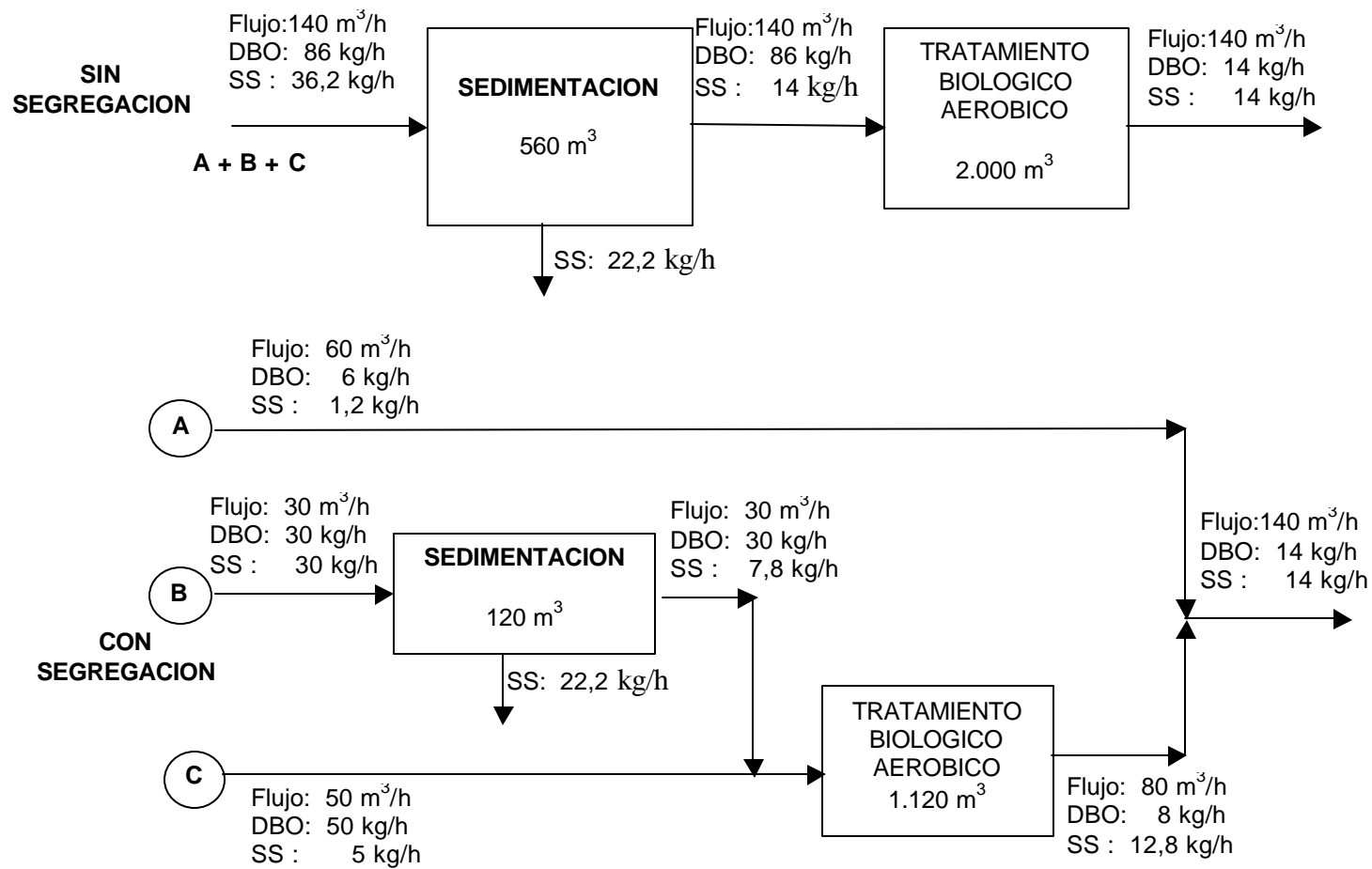


FIGURA 6.6: TRATAMIENTO DIFERENCIADO DE EFLUENTES SEGREGADOS

TABLA 5: MEDIDAS PARA CONSERVACIÓN DE AGUAS INDUSTRIALES ⁵

MEDIDAS PARA CONSERVACIÓN DE AGUAS
<ul style="list-style-type: none">• Usar el agua en forma cuidadosa; sólo el mínimo necesario.• Mantener los residuos sólidos separados de los residuos líquidos y eliminarlos en forma concentrada, reduciendo así los requerimientos de agua de lavado.• Usar agua a alta presión en volúmenes reducidos, en las operaciones de limpieza. Usar los detergentes en la proporción apropiada y seleccionar aquellos que requieran de un mínimo enjuague.• Reciclar el agua en aquellos casos en que los requerimientos de higiene lo permitan. Para estos efectos, tal vez sólo se requiera de operaciones sencillas tales como: enfriamiento, neutralización o eliminación de sólidos gruesos.• Usar controladores automáticos para volumen, temperatura y presión. Los controles manuales resultan en mayores pérdidas. Usar válvulas que se cierran automáticamente cuando se detiene el flujo de agua.• Estudiar cada proceso, para identificar los cambios que sean requeridos para reducir los requerimientos de agua.

Es importante destacar que una de las medidas más efectivas para reducir el consumo de agua se basa en la reutilización de aguas residuales en diferentes operaciones, consumiendo agua fresca sólo en aquellas áreas u operaciones donde sea estrictamente necesario. Este aspecto representa uno de los principales objetivos de una gestión racional del recurso agua en la industria.

La Figura 7 ilustra un ejemplo típico del uso de agua de lavado en contracorriente aplicado al lavado de pulpa en la secuencia de blanqueo en la industria de celulosa kraft ECF. La implementación de tales sistemas en contracorriente, permite una reducción del consumo de agua de 20-30 m³/ton celulosa, respecto a los sistemas convencionales.

El ejemplo anterior puede ser aplicado a la industria de envasado de frutas, donde se debe usar agua fresca para lavar el producto en las etapas finales del proceso. Dado que el contenido contaminante de dicha agua de lavado, es relativamente bajo, ésta se puede reutilizar en operaciones precedentes que no requieran agua limpia (ej.: transporte y lavado de la materia prima).

El requerimiento de agua de enfriamiento o calentamiento puede ser reducido implementando principios de integración energética y un adecuado diseño de los sistemas de aislación térmica. El precalentamiento de corrientes de alimentación usando fluidos de alta temperatura que requieren ser enfriados, se esquematiza en la Figura 8 para un proceso de fermentación continua, donde la alimentación se precalienta con el medio de cultivo proveniente de la unidad de esterilización. Dicho sistema permite eliminar totalmente la necesidad de agua de enfriamiento. En otros casos, las aguas de

⁵ Recomendadas por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA)

enfriamiento pueden ser recirculadas al sistema de intercambio de calor o reutilizadas en el proceso, luego de su condicionamiento térmico en torres de enfriamiento, tal como se ilustra en las Figuras 9 y 10.

Es importante tener en cuenta que la recirculación de agua en los procesos industriales está limitada por la acumulación de material orgánico e inorgánico disuelto, riesgos de contaminación microbiana y otros cambios no aceptables en las propiedades del agua recirculada (ej.: características organolépticas, color, etc.). En esos casos, es fundamental diseñar un sistema de purga y *make-up* que mantenga la concentración de los materiales acumulables dentro de límites aceptables.

Ejemplo: La Industria Papelera

Tradicionalmente, la industria papelera estuvo asociada a un alto consumo de agua (100-200 m³/ton papel), principalmente en la operación de la máquina papelera. En la actualidad, las plantas modernas incluyen innumerables sistemas de recirculación interna, lo que ha permitido reducir el consumo de agua a menos de 20 (m³/ton papel), con una marcada tendencia hacia reducciones aún mayores. Las medidas que han permitido tales reducciones son comunes a un amplio sector de la industria de procesos.

En la fabricación del papel, la principal fuente de aguas residuales proviene de la máquina papelera. El agua blanca⁶ más rica se obtiene de las charolas situadas bajo la primera parte de la tela de la máquina *Foudrinier*. Esta agua es reciclada directamente a los estanques de mezcla, a los batidores o a otro punto como agua de proceso. Por su parte las aguas más pobres son obtenidas en la fosa situada bajo la tela. Sin embargo, la recirculación de la casi totalidad de las aguas blancas genera sistemas altamente complejos, lo que se agudiza en el caso de fábricas integradas de pulpa y papel. Se debe considerar también que el cierre involucra contar con agua aceptable desde el punto de vista de calidad y cantidad en las distintas etapas de proceso donde ella es necesaria.

Una de las primeras alternativas de reutilización de agua es la recirculación de las aguas blancas ricas, provenientes de la fosa de la tela metálica y de la fosa del rodillo cabezal. Dichas aguas pueden utilizarse en la regulación de consistencia en todos los sistemas de pasta. A esto se debe agregar el uso de las aguas clarificadas en los rociadores de la máquina papelera, principalmente en los rociadores de las telas, de la caja de entrada, de los rodillos ranurados, de los recortadores, de los separadores y del rodillo maestro.

Otros de los aspectos relevantes es el manejo del gran volumen de agua selladora de las bombas de vacío. En algunos casos, se utiliza el agua clarificada del recuperador, teniendo en consideración que el pH de dicha agua no debe ser inferior a 5 para evitar la corrosión de la caja de acero dulce de las bombas. Existen sistemas separados de recirculación para las bombas de vacío, los que permiten reunir el agua de sello de todas las bombas en un recipiente situado bajo éstas, y recircular el agua hacia las bombas previo enfriamiento a niveles bajo 50°C (ver Figura 10). Para el caso de las bombas de alto vacío se recomienda utilizar agua fresca fría, la que luego puede ser reutilizada como agua de sello para las bombas de menor vacío.

⁶ En general las aguas blancas están constituidas por fibra residual, materia soluble, y un alto porcentaje de materia no fibrosa en suspensión, tal como los pigmentos, almidones y colorantes. La cantidad de material sólido varía dependiendo del tipo de papel que se esté fabricando, por ejemplo puede ir desde menos del 5% para papeles pesados, a más del 50% en papeles tissue de peso ligero, en un sistema cerrado. En el caso del papel periódico, dependiendo de la velocidad de la máquina papelera, estas pérdidas pueden llegar a más de 40% .

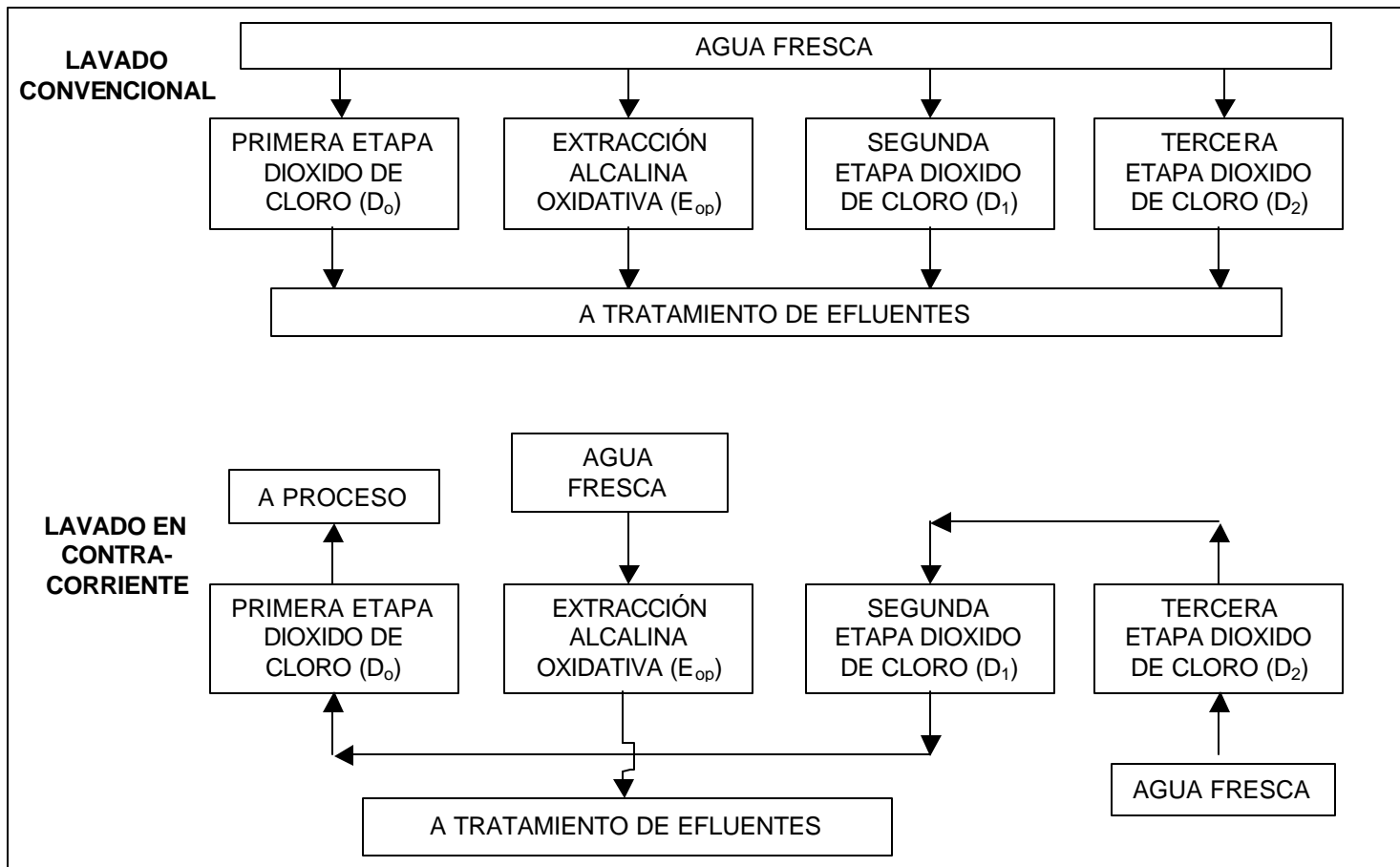


FIGURA 7: SISTEMA DE LAVADO DE PULPA CELULOSICA EN SECUENCIA DE BLANQUEO ECF

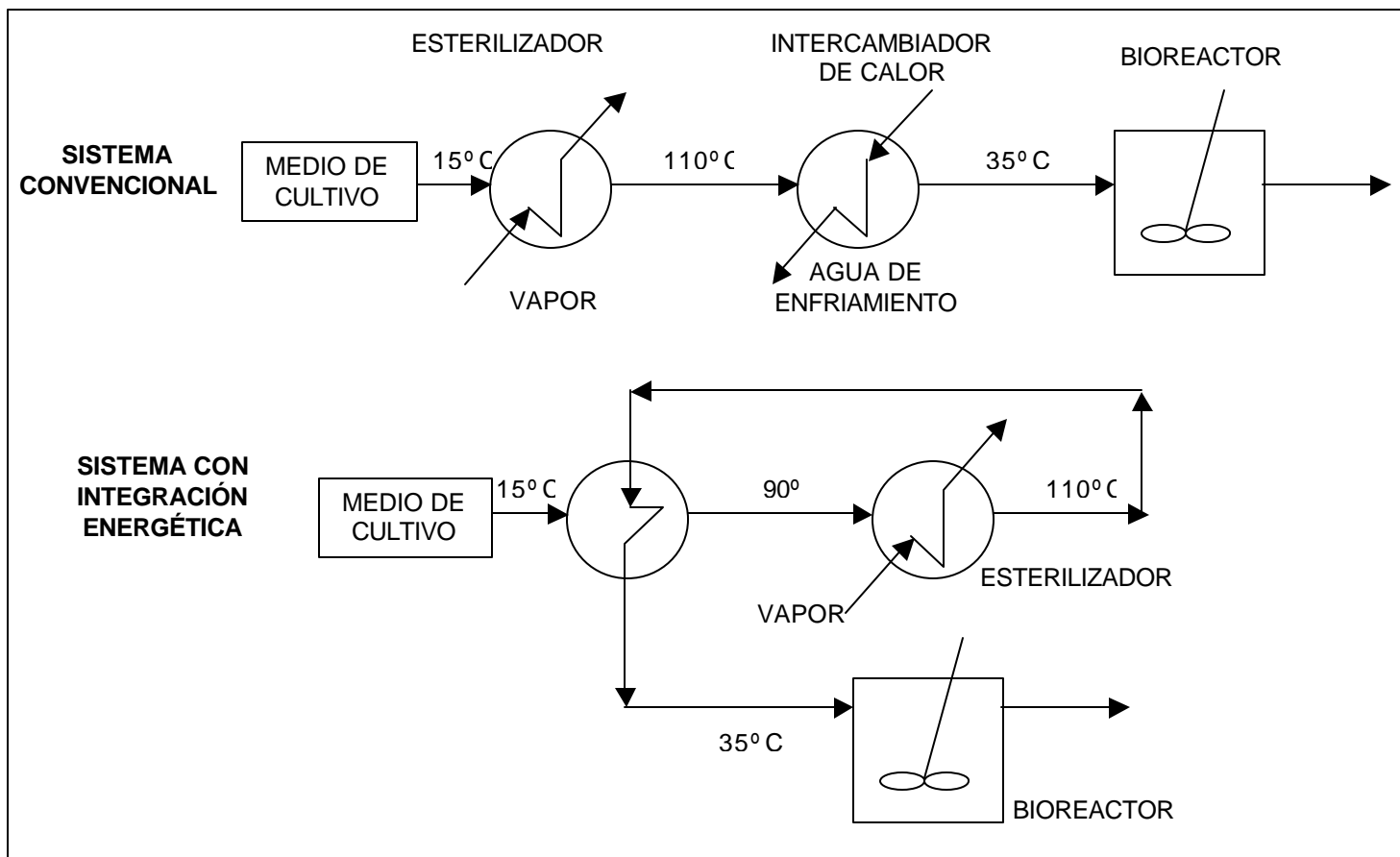


FIGURA 6.8: INTEGRACIÓN ENERGÉTICA EN UN SISTEMA DE FERMENTACIÓN INDUSTRIAL

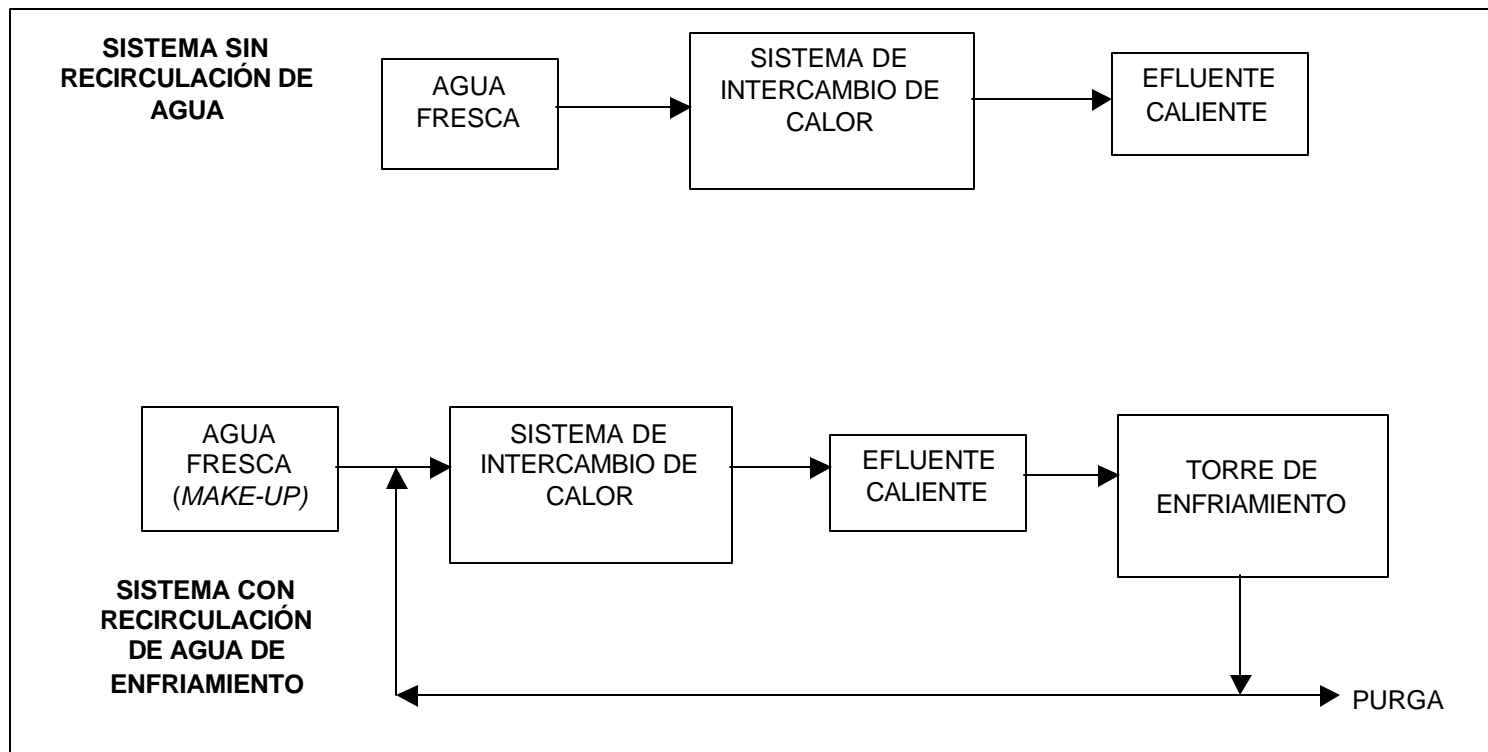


FIGURA 6.9: SISTEMA DE INTERCAMBIO DE CALOR SIN Y CON RECIRCULACIÓN DE AGUA DE ENFRIAMIENTO

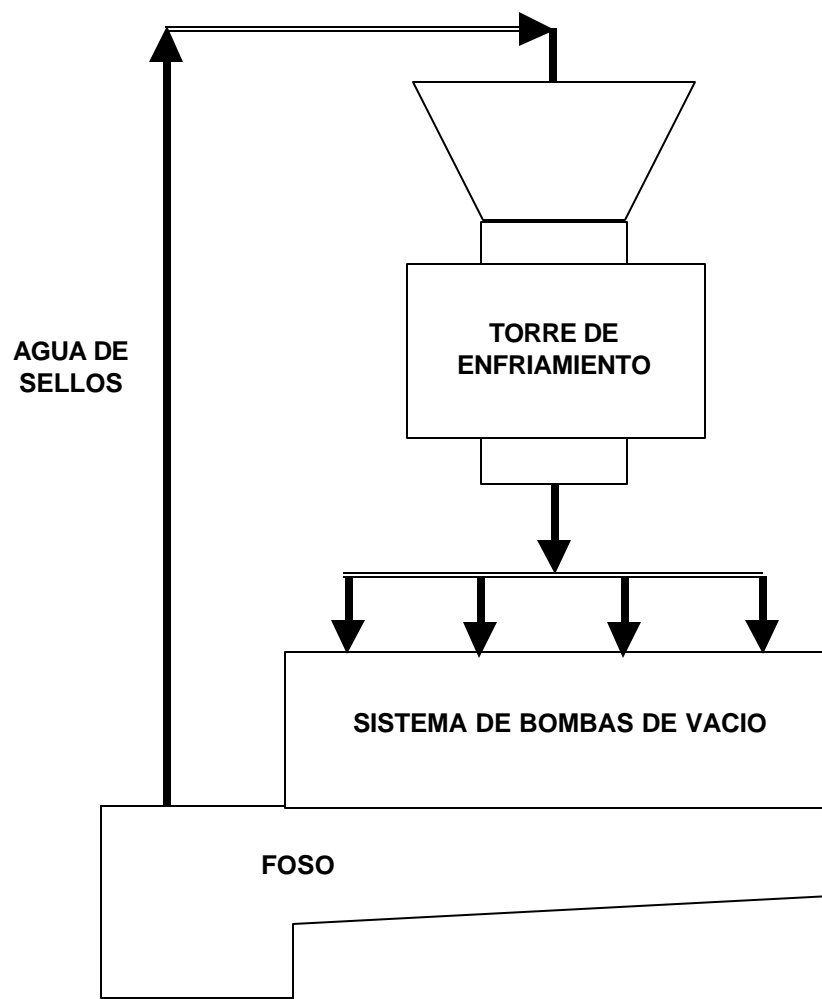


FIGURA 6.10: SISTEMA CERRADO DE AGUA DE SELLOS PARA BOMBAS DE VACIO, CON TORRE DE ENFRIAMIENTO

6) CONSIDERACIONES ECONÓMICAS

La evaluación económica juega un papel muy importante en la toma de decisiones, en el contexto del diseño de procesos limpios. Una vez que los impactos ambientales asociados a una opción de proceso son aceptables, se debe proceder a evaluar su factibilidad económica. La evaluación económica de un proyecto se basa tradicionalmente en un análisis de costos y beneficios. En el caso de proyectos de mejoramiento ambiental, los costos y beneficios deben cubrir todos aquellos aspectos afectados, positiva o negativamente, por la implementación de las medidas propuestas. En este sentido, es fundamental identificar correctamente tales costos y beneficios, ya que ello determina el resultado del análisis y la toma de decisiones.

La siguiente lista puede servir como guía para identificar los costos y beneficios, además de aquellos considerados tradicionalmente en todo proyecto productivo:

a) Beneficios Potenciales

- Ahorro de materias primas.
- Ahorro de energía (electricidad, combustible, etc.).
- Ahorro en el consumo de agua.
- Aumento de la productividad global (reducción de pérdidas materiales, aumento de producción, reducción de fallas en equipos, reducción de accidentes, operación estable, mejor gestión de procesos, etc.).
- Retorno adicional, debido a la recuperación y venta de subproductos.
- Disminución del costo de tratamiento y/o disposición final de los residuos.
- Disminución de los costos de operación de la planta de tratamiento.
- Disminución en costos legales asociados a problemas ambientales y de seguridad (multas, indemnizaciones, seguros).
- Mejor imagen de la empresa

b) Costos Potenciales

- Inversiones asociadas a modificaciones en el proceso, unidades más sofisticadas, nuevos sistemas de control, etc..
- Aumento de los costos de producción, al utilizar materias primas e insumos de menor potencial de impacto, pero más caras.
- Costos de nuevos programas de entrenamiento, mantención preventiva, gestión ambiental, personal adicional, etc..

Esta lista no pretende ser completa, pero constituye una guía adecuada para identificar costos y beneficios directamente asociados a medidas de control ambiental.

c) Costos Privados y Costos Sociales

Al considerar los aspectos económicos asociados a un proyecto de mejoramiento ambiental, es importante distinguir entre los costos (o beneficios) privados y los costos (o beneficios) sociales. Los primeros se refieren a aquellos costos (y beneficios) que recaen directamente sobre los proponentes o ejecutantes del proyecto. Por su parte, los costos (o beneficios) sociales incluyen, además, las externalidades al proyecto. Las externalidades son aquellos costos o beneficios, derivados de las acciones del proyecto, que recaen sobre la comunidad, el Estado u otros individuos o instituciones. Por ejemplo, el costo resultante del deterioro de la calidad del aire debido a las emisiones de una industria es un costo externo que recae sobre las personas afectadas por ese deterioro ambiental. Si la empresa incorpora un sistema de control de emisiones, con vistas a evitar la contaminación, se reduce el costo externo, a expensas de un incremento del costo privado.

A medida que el proyecto incorpora medidas más sofisticadas y de mayor requerimiento de inversión, con vistas a un control ambiental más efectivo, se puede esperar una reducción de los costos externos asociados a los impactos ambientales.

Tal como se ilustra en la Figura 11, a medida que incrementan las exigencias de protección ambiental, se reducen los costos asociados al deterioro ambiental, pero a expensas de un aumento de los costos privados. De acuerdo a ello, existiría un nivel de exigencia ambiental donde el costo social alcanza un valor mínimo.

Estos aspectos deben ser considerados en detalle en los procesos de elaboración de normas ambientales, ya que se deben establecer los estándares buscando minimizar los costos sociales, entre otros criterios.

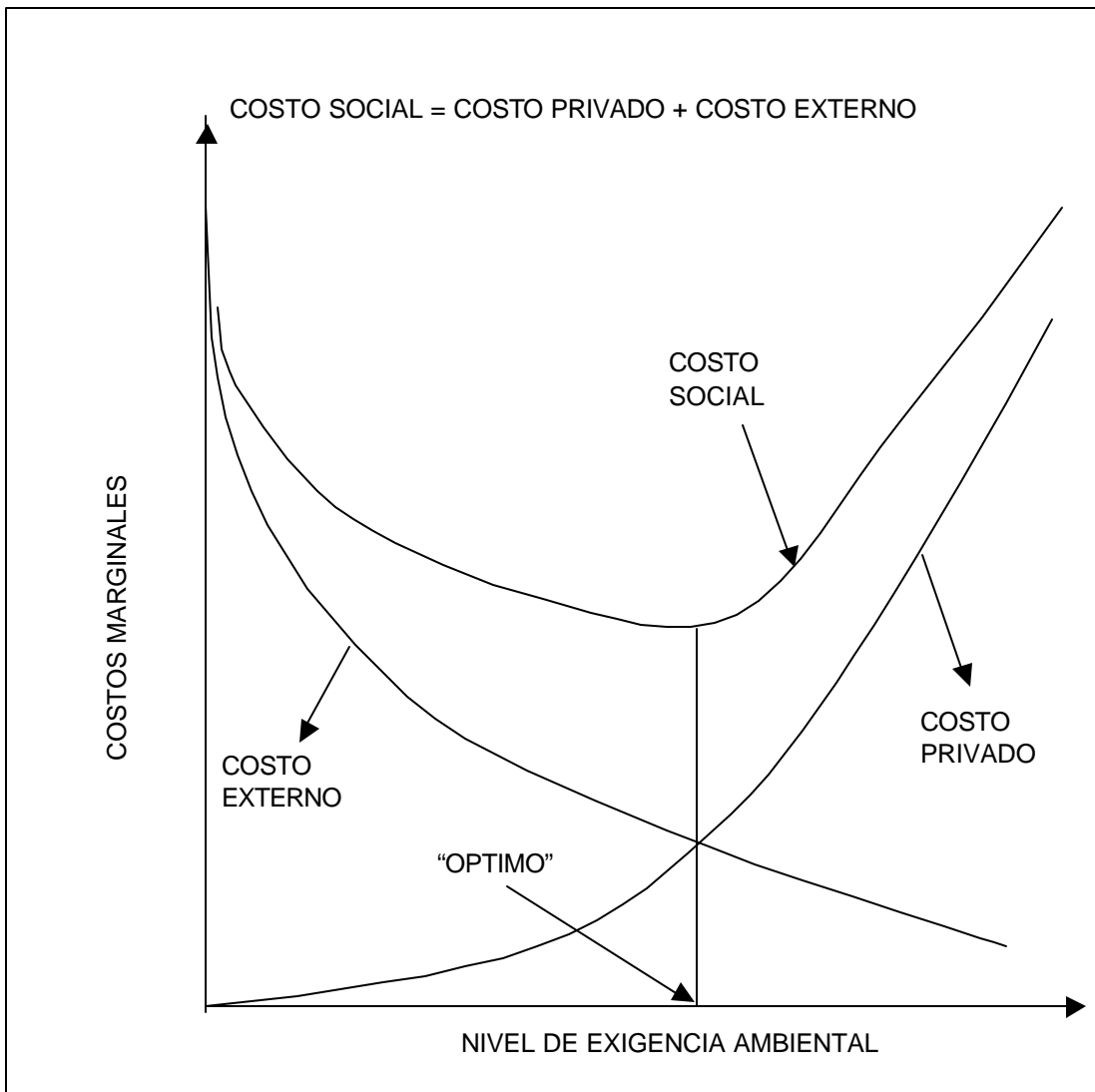


FIGURA 11 : NIVEL DE EXIGENCIA AMBIENTAL "OPTIMO"

BIBLIOGRAFÍA

- Cheremisinoff P.N. "Waste Reduction for Pollution Prevention", Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford (1989).
- Conesa V. "Guía metodológica para la evaluación de impacto ambiental", Mundi Prensa, Madrid 1993
- Conesa V., "Auditorías medioambientales: Guía Metodológica", Mundi Prensa, Madrid 1995
- Fiksel J. "Ingeniería de Diseño Medioambiental: Desarrollo Integral de Productos y Procesos Ecoeficientes". McGraw Hill. Madrid (1997)
- Freeman H.M. "Manual de Prevención de la Contaminación Industrial" McGraw Hill, México (1988)
- Masters G.M., "Introduction to Environmental Engineering and Science", Prentice-Hall , 1991
- PNUMA - ONUDI "Manual de Auditoría y Reducción de Emisiones y Residuos Industriales", Informe Técnico N° 7, Naciones Unidas, New York (1994)
- Santamaría J.M., Braña P.A., "Análisis y reducción de riesgos en la industria química", MAPFRE, Madrid, 1994
- Zaror C.A., "Introducción a la Ingeniería Ambiental para la Industria de Procesos". Editorial Universidad de Concepción, Serie Monografías. ISBN-956-227-252-4. Concepción. Chile. 2002

Algunas direcciones Internet de interés:

- www.conama.cl,
- www.cepis.org.pe,
- www.epa.gov,
- www.iso.ch,
- www.cnpl.cl,
- www.achs.cl