

FIGURA 10.1: CARGAS AMBIENTALES DE UN SISTEMA DE PRODUCCION

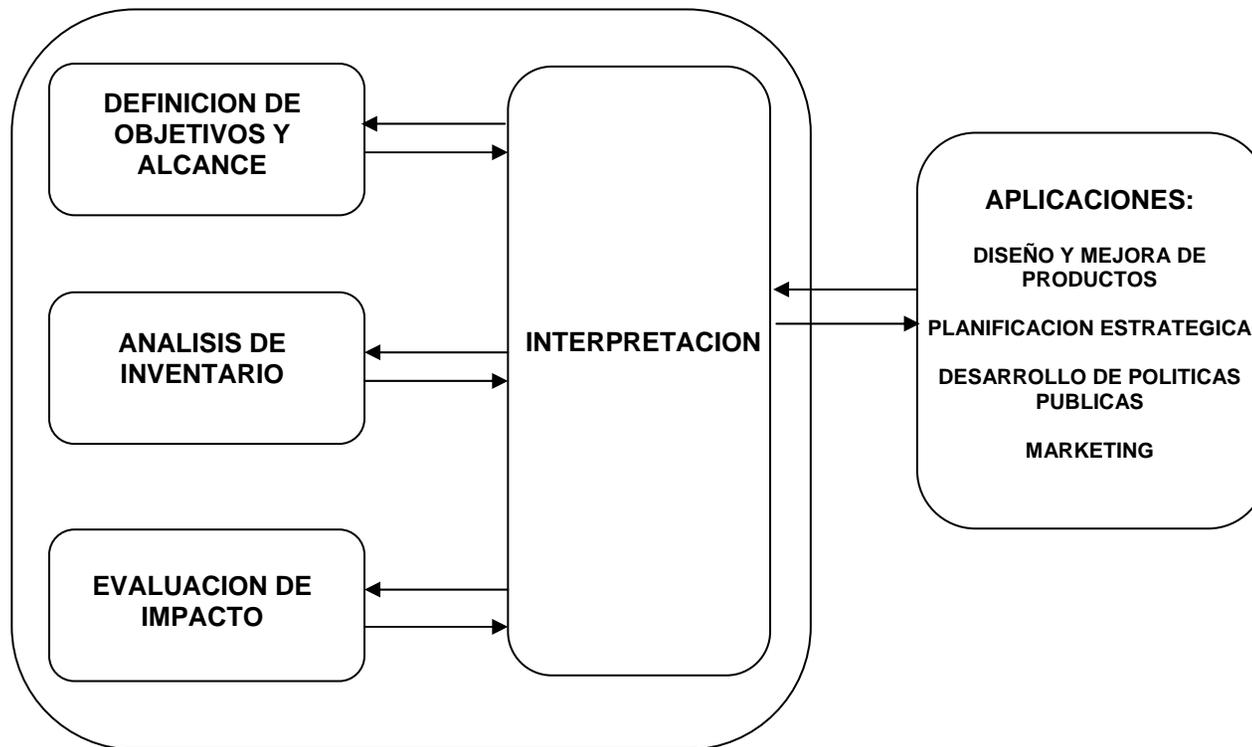


FIGURA 10.2 MARCO DEL ANALISIS DEL CICLO DE VIDA

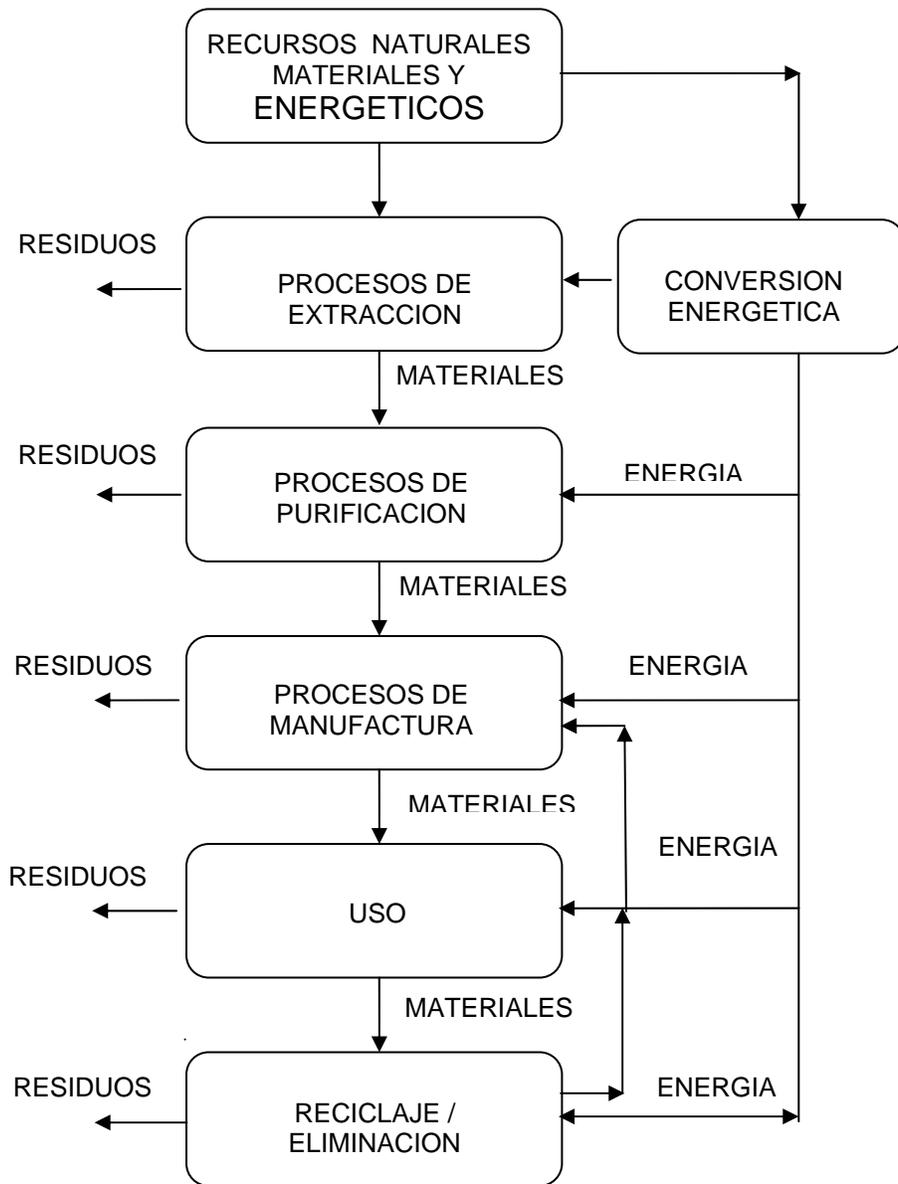


FIGURA 10.3: CICLO DE VIDA DE UN PRODUCTO

10.2) METODOLOGIA DEL ANALISIS DEL CICLO DE VIDA

En su expresión más general, el análisis del ciclo de vida consiste de 4 componentes:

- a) **Definición de objetivos y alcance:** se debe precisar los objetivos que motivan el estudio, así como los límites del sistema a analizar e identificar los componentes del ciclo de vida (ej. extracción, transporte, almacenamiento, producción, consumo, reciclaje, disposición final de residuos, etc) (ver Figura 10.3).
- b) **Análisis de inventario:** se desarrolla aquí los balances de materia y energía a través de los diferentes componentes del ciclo de vida.
- c) **Evaluación de los impactos ambientales potenciales:** debe considerar la salud y seguridad de las personas, y las cargas ambientales. Se debe identificar y caracterizar, previamente, los compartimentos ambientales a incluir en el análisis y su relación con las etapas del ciclo de vida del producto.
- d) **Interpretación:** en base al análisis anterior, se debe identificar y evaluar medidas de mejoramiento que permitan reducir aquellos impactos de mayor relevancia.

10.3) DEFINICION DE OBJETIVOS Y ALCANCE

El primer paso en el desarrollo de un ACV es la definición de los objetivos del estudio. Se debe especificar las razones que impulsaron el trabajo y la información que se espera obtener como resultado. Debido a su naturaleza global, un ACV podría ser interminable y debe establecerse límites a su extensión. La definición de los límites del sistema a estudiar es una de las etapas críticas del ACV. Al respecto, se debe considerar los siguientes aspectos para definir el alcance del ACV:

a) **Función del sistema:**

Se deben describir las funciones que definen el sistema en estudio. Esto es importante en aquellos casos donde el producto puede cumplir varias funciones. Por ejemplo, un computador multimedia puede ser utilizado como procesador de información y, además, puede servir para comunicación telefónica/fax. Si el ACV se realiza para comparar ambientalmente varios sistemas, se debe garantizar que cumplan la misma función.

b) **Unidad funcional:**

La unidad funcional se refiere a la base de cálculo sobre la cual se efectuarán los balances de materias y energía. En el caso de ACV comparativos, se debe seleccionar una unidad funcional que refleje la función que interesa comparar. Por

ejemplo, el ACV para comparar dos tipos de detergentes puede considerar, como unidad funcional, el “lavado de 1000 kg de ropa de algodón”.

c) Límites del sistema:

Se debe identificar el conjunto de procesos unitarios o subsistemas que permiten producir el producto en estudio. Ello incluye la obtención de los recursos primarios, todos los procesos de fabricación y transporte de los componentes del producto y sus materias primas, además de todas las fases del ciclo de vida del producto terminado (ver Figura 10.3). Es necesario decidir qué procesos y etapas del sistema se van a incluir en el estudio, así como los criterios que se utilizan para tal decisión y su compatibilidad con los objetivos del ACV. Por ejemplo, se puede excluir del análisis los componentes que se encuentren bajo un % límite (ej. menor de 0,5% del peso del producto). Es importante establecer los límites geográficos de las actividades a incluir en el ACV, ya que pueden ser afectadas por condiciones locales (ej. los sistemas de generación de energía eléctrica, los sistemas de transporte, los sistemas de tratamiento y disposición de residuos).

10.4) ANALISIS DE INVENTARIO

El análisis de inventario es un balance de materia y energía del sistema, aunque puede incluir otros parámetros, tales como: utilización del suelo, radiaciones, ruido, vibraciones, biodiversidad afectada, etc. Comprende la recopilación de los datos y la realización de los cálculos adecuados para cuantificar las entradas y salidas del sistema estudiado (ver Figura 10.1):

- Entradas:** son las materias primas y las fuentes de energía
- Salidas:** son las emisiones al aire, al agua y al suelo, y los productos

Parte de los flujos materiales y energéticos proceden de la naturaleza o se destinan a ella, mientras que otros flujos tienen su origen o destino en la tecnósfera. Algunos ejemplos se presentan en la Tabla 10.1 siguiente:

TABLA 10.1: ORIGEN Y DESTINO DE FLUJOS MATERIALES Y ENERGETICOS

FLUJO	DESTINO/ORIGEN	MEDIO
Residuo líquido tratado	Destino: Vertido al mar	Natural
Combustible diesel	Origen: Refinería de petróleo	Tecnósfera
Agua de procesos	Origen: Río	Natural
Residuos sólidos	Destino: Procesamiento de residuos	Tecnósfera
Gases de incineración de residuos sólidos	Destino: Emisión a la atmósfera	Natural

El análisis de inventario es un proceso iterativo, ya que existe los nuevos datos y el mayor conocimiento obtenido durante el desarrollo del trabajo permiten redefinir con mayor precisión las fases del ciclo o los flujos materiales y energéticos.

El procedimiento recomendado para realizar el análisis de inventario incluye las siguientes etapas:

- Construcción del diagrama de flujo
- Establecer la calidad de los datos (niveles de precisión requeridos)
- Definir los límites del sistema
- Recolección de los datos y cálculos de balances
- Redefinición de los objetivos y alcances

Una vez construido el diagrama de flujo, el sistema se subdivide en subsistemas y estos a su vez en procesos unitarios, para facilitar los cálculos de balance. Los balances de materia y energía se deben ordenar en forma sistemática, especificando las entradas y salidas, y sus destinos/orígenes, tal como se muestra en la Tabla 10.2.

TABLA 10.2: BALANCE DE MATERIALES Y ENERGIA EN ANALISIS DE INVENTARIO

ENTRADAS		
	Desde la Naturaleza	Desde la Tecnósfera
Materias primas		
Insumos		
Agua		
Combustibles		
Electricidad		
SALIDAS		
	Hacia la Naturaleza	Hacia la Tecnósfera
Productos		
Residuos a tratamiento		
Emisiones líquidas		
Emisiones gaseosas		
Emisiones sólidas		

Generalmente, se especifica las unidades de medida (ej., toneladas, kJ), los niveles de incertidumbre de los datos y las fuentes. En el caso de los flujos energéticos, se debe identificar las cantidades de energía térmica y de combustible utilizado, y el consumo eléctrico. Algunos valores típicos de emisiones asociadas al consumo de gas natural y petróleo diesel se presentan en las Tablas 10.3, 10.4 y 10.5.

Es importante señalar que el consumo de combustible en el transporte depende del medio utilizado, del tipo de combustible, de la carga y del recorrido. Por ejemplo, para transporte mediante camiones en base a diesel, se considera un consumo

específico en el rango 0,8-2,2 (MJ /km /ton), mientras que el transporte por ferrocarril eléctrico presenta un consumo de 0,1-0,3 (MJ /km /ton).

TABLA 10.3: EMISIONES ASOCIADAS A LA OBTENCIÓN Y COMBUSTION DE GAS NATURAL

EMISIONES AL AIRE		(kg/ ton gas natural)
Material particulado		0,018
CO ₂		2.364
CO		0,58
Hidrocarburos volátiles		28,9
NO _x		4,3
SO ₂		2,0
N ₂ O		3,1
EMISIONES AL AGUA		(kg/ ton gas natural)
Sólidos disueltos		0,16
Aceite		0,04
EMISIONES AL SUELO		(kg/ ton gas natural)
Residuos sólidos		3,5
OTROS DATOS DE INTERES		
Poder calorífico (MJ/m ³)		36,6
Densidad (kg/m ³)		0,795

TABLA 10.4: EMISIONES ASOCIADAS A LA OBTENCIÓN Y COMBUSTION DE DIESEL

EMISIONES AL AIRE		(kg/ ton diesel)
Material particulado		4,2
CO ₂		3.341
CO		20,3
Hidrocarburos volátiles		16,8
NO _x		55,4
SO ₂		7,9
N ₂ O		0,05
Aldehidos y otros orgánicos volátiles		0,09
Amoníaco		0,02
EMISIONES AL AGUA		(kg/ ton diesel)
Sólidos disueltos		12,7
Aceites		0,2
Sólidos suspendidos		0,006
DBO		0,006
DQO		0,05
N total		0,008
EMISIONES AL SUELO		(kg/ ton diesel)
Residuos sólidos		1,6
OTROS DATOS DE INTERES		
Poder calorífico (MJ/kg)		42,5
Densidad (kg/m ³)		840

TABLA 10.5 : DATOS PARA EL ANALISIS DE INVENTARIO ASOCIADO AL TRANSPORTE MEDIANTE CAMIONES

	Larga distancia (20-40 ton)	Transporte local (7-14 ton)	Asociadas a la producción de combustible
Consumo de combustible (kg diesel/ km/ ton carga)	0,02	0,05	2,81 (MJ/kg diesel)
Emisiones	(g / km /ton carga)	(g / km /ton carga)	(g/kg diesel)
Material particulado	0,09	0,22	0,02
CO ₂	66	161	170
CO	0,31	0,75	0,004
NO _x	0,81	1,98	0,17
SO ₂	0,085	0,21	0,60
Hidrocarburos volátiles	0,08	0,20	0,34

A pesar de que la definición de los límites del sistema es una decisión que se toma al inicio del ACV, es esencial precisar tal definición en el análisis de inventario. Los límites pueden ser fijados de acuerdo a criterios de tipo geográfico. Ello es importante, en la medida que al extender los límites geográficos se pierde precisión y se incrementa la incertidumbre de los resultados. En muchos ACV se prefiere fijar los límites en áreas donde se conozca la naturaleza de las actividades incluidas en el estudio; por ejemplo, considerar solamente aquellas que se realizan dentro del país. La selección de tales fronteras de estudio puede afectar significativamente los resultados del ACV. Por ejemplo, como ya se mencionó, pueden existir grandes diferencias en los consumos energéticos y emisiones asociadas a sistemas de transporte alternativos, o a diversos sistemas de generación de energía eléctrica (ej: termoeléctrica, hidroeléctrica, nuclear). Al respecto, se recomienda separar los resultados relativos a consumo eléctrico y explicitar las fuentes utilizadas.

Junto a los límites geográficos, es importante definir los límites temporales. Por ejemplo, en el caso de los residuos depositados en vertederos, las emisiones gaseosas derivadas de la descomposición de los residuos dependen de la escala de tiempo considerada, ya que los materiales poseen diferente estabilidad frente a la acción microbiana u otros agentes degradativos. Estos aspectos metodológicos aún no han sido resueltos y se encuentran en plena evolución.

Finalmente, se debe mencionar que existe controversia respecto a la inclusión de las emisiones y los requerimientos materiales y energéticos, asociados a la construcción de la infraestructura productiva y a la fabricación de los equipos utilizados en los procesos. En general, tales aspectos ambientales se excluyen de los ACV de productos elaborados, a menos que se desee comparar alternativas que presenten grandes diferencias en la intensidad de recursos infraestructurales y de equipamiento.

Asignación de Cargas Ambientales

En el caso de sistemas que desarrollan más de una función o que fabrican más de un producto, se debe distribuir los aspectos ambientales entre los productos que genera. La asignación de las cargas ambientales a diferentes productos es necesaria en los siguientes casos:

- Procesos con salidas múltiples, donde se generan diferentes productos, algunos de los cuales cruzan los límites del sistema.
- Procesos con entradas múltiples, donde es difícil establecer relaciones de causalidad entre entradas y emisiones.
- Procesos con reciclo de lazo abierto, donde los residuos que salen de un sistema son utilizados como materias primas para otro sistema, fuera de los límites del sistema en estudio.

Tomemos como ejemplo, una refinería de petróleo que produce gasolinas de diferentes tipos, petróleo combustible, diesel, gas licuado, etileno, propileno, etc., a partir de petróleo crudo ¿Cuál de estos productos es el causante de las emisiones generadas durante el proceso (ej. SO₂, CO₂)? En este caso, las cargas ambientales deben distribuirse entre los productos de acuerdo a criterios de asignación claramente especificados.

Cuando no es posible establecer una relación de causalidad, entre el producto y las cargas ambientales, se debe recurrir a métodos de asignación basados en valor económico, cantidad física (ej. masa, concentración) o una combinación de ambos. Por ejemplo, las cargas ambientales derivadas del proceso de refinación de petróleo se pueden distribuir proporcionalmente a la masa de productos generados, o proporcionalmente al valor comercial de cada producto.

10.5) EVALUACION DE IMPACTO AMBIENTAL DEL CICLO DE VIDA

Una vez completada la fase de inventario, es necesario evaluar los impactos producidos por las cargas ambientales identificadas en éste. El inventario puede constar de cientos de datos de consumos y emisiones para un gran número de compuestos, lo que es muy difícil de interpretar. En la práctica del ACV, se habla de **impactos ambientales potenciales**, ya que las actividades o subsistemas del sistema en estudio están ubicadas en diferentes lugares y se pueden llevar a cabo en distintas épocas. En muchos casos, no se trata de sistemas localizados en una ubicación espacial específica, ni de consumos y emisiones que se efectúa en el mismo instante de tiempo. Por lo tanto, no es correcto suponer que los impactos totales se obtienen de una simple sumatoria de los impactos esperados en cada subsistema. Ello es más crítico en el caso de impactos muy locales o de ámbito temporal reducido. Sin embargo, en el caso de impactos globales o de efectos prolongados (ej. calentamiento global, agotamiento del ozono estratosférico), es posible sumar las contribuciones de cada fase del ciclo de vida.

La evaluación de impacto ambiental en el contexto de un ACV aún es materia de debate. Sin embargo, existe cierto consenso respecto a los elementos que constituyen la evaluación de impacto en un ACV, a saber: Clasificación, Caracterización y Valoración.

10.5.1) Clasificación

En esta fase las cargas ambientales se clasifican de acuerdo a diferentes categorías de impacto, según el tipo de efecto ambiental esperado. Las categorías de impacto se agrupan de acuerdo a 3 áreas de protección ambiental, según la proposición de SETAC (adoptada por la mayoría de las metodologías de ACV en uso actual):

- Recursos Naturales
- Salud humana
- Salud ecológica

La Tabla 10.6 muestra una lista de categorías de impacto, utilizadas en la fase de clasificación de un ACV, asociadas a las entradas y salidas de materiales y energía.

TABLA 10.6 CATEGORIAS DE IMPACTO PARA EL ACV

Categorías de Impacto	Relacionada con:	Alcance Espacial	Unidad de Medida
1. Recursos Abióticos	Entradas	Global, Local	¿?
2. Recursos Bióticos	Entradas	Global, Local	¿?
3. Suelo	Entradas	Local	¿?
4. Salud humana: Impactos toxicológicos	Salidas	Global, Local	¿?
5. Salud humana: Impactos no toxicológicos	Salidas	Global, Local	¿?
6. Impactos ecotoxicológicos	Salidas	Global, Local	¿?
7. Alteración de hábitats /biodiversidad	Salidas	Regional, Local	¿?
8. Calentamiento Global	Salidas	Global	Kg CO ₂
9. Agotamiento de la capa de O ₃	Salidas	Global	Kg CFC 11
10. Acidificación	Salidas	Regional, Local	Kg SO ₂
11. Eutrofización	Salidas	Regional, Local	Kg PO ₄ ⁻³
12. Formación de foto-oxidantes	Salidas	Regional, Local	Kg eteno

En el caso de los recursos abióticos, se puede subdividir entre recursos materiales y energéticos, o entre recursos renovables y no renovables, explicitando los recursos hídricos. Los impactos no toxicológicos sobre la salud humana se refieren a impactos físicos, alteraciones psicológicas, efectos por radiación, ruidos, malos olores, infecciones, u otros.

10.5.2) Caracterización

En esta fase, se aplica modelos a cada categoría de impacto para obtener indicadores ambientales. Por ejemplo, en la categoría de impacto acidificación, se incluye las emisiones de gases que pueden tener efecto sobre el pH del agua o del suelo, tales como SO₂, NO_x, HCl, HF y NH₃. Cada uno de estos contaminantes posee una capacidad diferente para alterar el pH en un sistema acuático/terrestre. Por lo tanto, se utiliza factores de ponderación, que permiten expresar el potencial acidificante sobre una base común. Dichos factores son estimados en base a las características químicas de los compuestos. Factores similares pueden ser derivados para otras categorías de impacto, tal como se describe más adelante.

Estos factores de ponderación permiten calcular la suma de todos los contaminantes que están dentro de una misma categoría de impacto, obteniendo así un valor total expresado en base a un solo compuesto equivalente. Por ejemplo, la contribución total al impacto acidificación, expresada en términos de kg de SO₂ equivalentes, se calcula como:

$$\text{Acidificación (kg SO}_2\text{)} = m_{\text{SO}_2} + f_{\text{NO}_x} m_{\text{NO}_x} + f_{\text{HCl}} m_{\text{HCl}} + f_{\text{NH}_3} m_{\text{NH}_3}$$

donde m_k representa la masa del contaminante k y f_k es el factor de ponderación correspondiente.

Esta forma de cálculo para estimar la contribución total de las entradas y salidas, a una categoría de impacto dada, se puede generalizar de la siguiente forma:

$$C_M = \sum C_{MK} = \sum M_k f_{MK}$$

donde C_M es la contribución total a la categoría de impacto M de todas la entradas y salidas relevantes; M_k es la masa o energía emitida o consumida por la entrada o salida K , y f_{MK} es el factor de ponderación respectivo.

Los diferentes métodos propuestos en la literatura especializada varían en la forma como se calculan los factores de ponderación. A continuación, se revisa brevemente los diferentes enfoques utilizados para llevar a cabo la selección de los factores de ponderación para caracterizar los impactos ambientales en cada categoría.

a) Categoría de Impacto: Recursos Materiales y Energéticos:

Generalmente, el agotamiento y uso de los recursos naturales y energéticos se trata en forma separada, especificando la naturaleza renovable o no renovable de tales recursos:

- Recursos materiales renovables
- Recursos materiales no renovables
- Recursos energéticos renovables
- Recursos energéticos no renovables

En cada caso, se puede incluir una gran variedad de materiales y formas energéticas, por lo que se deben agregar utilizando factores de ponderación que reflejen la importancia relativa de cada uno de ellos respecto a su impacto sobre el inventario de recursos naturales.

Las guías nórdicas (Nordic Council, 1995) revisan una serie de enfoques utilizados para llevar a cabo la agregación.

- ***Agregación en base a recursos totales.***

Este método consiste en asignar un factor de ponderación unitario a cada uno de los materiales y formas de energía considerados, de modo que se obtiene la masa (kg) y la energía totales (kJ). A pesar de su simpleza, permite identificar aquellas actividades con mayor importancia en cuanto al uso intensivo de recursos. La debilidad de este enfoque es que no toma en cuenta la fragilidad o estado de escasez de cada recurso.

- ***Agregación, considerando las reservas globales:***

Aquí se calcula el factor de ponderación en base a las reservas físicas existentes en la actualidad, lo que permite considerar la “escasez” del recurso. Existen 4 variantes para el cálculo de los factores de ponderación considerando las reservas:

Considerando sólo las reservas: $f_{MK} = 1 / R_{MK}$

Considerando las reservas y consumo: $f_{MK} = U_{MK} / R_{MK}$

Considerando las reservas y consumo(modificado): $f_{MK} = U_{MK} / R_{MK}^2$

Considerando los costos de reposición del recurso: $f_{MK} = V_{MK}$

Donde R_{MK} son las reservas mundiales explotables del recurso K, U_{MK} corresponde al consumo anual mundial de dicho recurso y V_{MK} es una función del valor monetario (expresado en UCA, “unidades de carga ambiental”) requerido para recuperar el recurso utilizado.

Algunos valores sugeridos por el Nordic Council of Ministers (NCM) se muestran en la Tabla 10.7 a modo de ilustración.

TABLA 10.7: DATOS PARA EL CALCULO DE FACTORES DE PONDERACION PARA IMPACTOS SOBRE LOS RECURSOS NATURALES

	R_{MK}	R_{MK}/U_{MK} (años)	V_{MK} (UCA/kg)
Petróleo	$1,24 \cdot 10^{14}$ kg	40	0,4
Gas Natural	$1,09 \cdot 10^{14}$ m ³	60	0,4
Cobre	$3,50 \cdot 10^{11}$ kg	36	30,2
Zinc	$1,47 \cdot 10^{11}$ kg	21	21,3
Estaño	$4,33 \cdot 10^9$ kg	28	1.170,0

Fuente: NCM (1995)

b) Categoría de impacto: Salud Humana – Impacto Toxicológico:

Existen diversos métodos para estimar los factores de ponderación correspondientes a esta categoría de impacto.

- **Enfoque utilizando un concepto de Volumen Crítico:**

El factor de ponderación se calcula como: $f_k = 1/Q_k$

Donde Q_k es un estándar de calidad ambiental correspondiente al contaminante K para el medio receptor aire, agua o suelo. En el caso del agua, se utiliza el estándar de calidad de agua potable, mientras que en el caso del aire se usan los niveles máximos de inmisión o los límites de exposición ocupacional.

Normalmente, Q_k posee unidades de concentración másica (ej. g/m³), resultando un factor de ponderación con unidades (m³/g); por lo tanto, al multiplicar por la cantidad total de contaminante (g), se obtiene un resultado con unidades de volumen (m³). Por esa razón, se denomina método de volumen crítico.

TABLA 10.8: ESTÁNDARES DE CALIDAD DE AIRE PARA CALCULO DE VOLUMEN CRITICO

Contaminantes atmosféricos	Q_k (g/m ³)
Material Particulado	$7,0 \cdot 10^{-5}$
CO	$8,0 \cdot 10^{-3}$
NO _x	$3,0 \cdot 10^{-5}$
NH ₃	$5,0 \cdot 10^{-5}$
HCl	$1,0 \cdot 10^{-4}$
SO ₂	$3,0 \cdot 10^{-5}$
H ₂ S	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Hidrocarburos	$1,5 \cdot 10^{-2}$

Fuente: NCM (1995)

TABLA 10.9: ESTANDARES DE CALIDAD DE AGUA PARA CALCULO DE VOLUMEN CRITICO

Contaminantes	Q_K (g/m ³)
Sólidos suspendidos	$2,0 \cdot 10^{-2}$
DBO ₅	$2,0 \cdot 10^{-2}$
NH ₃	$1,0 \cdot 10^{-3}$
Grasas y Aceites	$2,0 \cdot 10^{-2}$
Organoclorados lipofílicos	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Compuestos Fenólicos	$5,0 \cdot 10^{-5}$
Hidrocarburos Totales	$1,0 \cdot 10^{-2}$

Fuente: NCM (1995)

- **Enfoque utilizando factores toxicológicos:**

Método CML: El Centro de Ciencias Ambientales de Leiden-Holanda (CML) ha desarrollado un conjunto de metodologías para apoyar el ACV. En relación al cálculo de los factores de ponderación para impactos toxicológicos sobre la salud humana, CML sugiere un método basado en criterios toxicológicos (ie. factores de potencia para compuestos cancerígenos, dosis diarias límite). Los factores propuestos, expresados en unidades (kg peso/kg contaminante), cubren un amplio rango de compuestos. La contribución total del contaminante a los impactos toxicológicos humanos, C_K , se obtiene sumando las contribuciones de dichos efectos en el agua (W), aire (A) y suelo (S):

$$C_K = M_{KA} f_{KAire} + M_{KW} f_{KAgua} + M_{KS} f_{KSuelo}$$

Donde los factores f_K son los factores de ponderación, para cada compartimento ambiental (ver Tabla 10.10). Al calcular la contribución total de los contaminantes al efecto toxicológico, se obtiene valores con unidades de (kg peso humano). Esto se interpreta como los kilos de peso de un individuo afectados por el contaminante.

TABLA 10.10: FACTORES DE PONDERACION PARA IMPACTO TOXICOLOGICO (METODO CML) Fuente: NCM (1995)

	f_{KAire}	f_{Kagua}	f_{KSuelo}
	kg peso/kg contaminante		
As	$4,7 \cdot 10^3$	1,4	$4,3 \cdot 10^{-2}$
Cd	$5,8 \cdot 10^2$	2,9	$1,9 \cdot 10^{-2}$
Hg	$1,2 \cdot 10^2$	4,7	$1,5 \cdot 10^{-1}$
Ni	$4,7 \cdot 10^2$	$5,7 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$
NH ₄ ⁺	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	-
NO ₃ ⁻	$9,1 \cdot 10^{-3}$	$7,8 \cdot 10^{-4}$	-
NOx	$7,8 \cdot 10^{-1}$	-	-
Fenol	$5,5 \cdot 10^{-1}$	$4,8 \cdot 10^{-2}$	$6,2 \cdot 10^{-1}$
Clorobencenos	$1,9 \cdot 10^{-1}$	5,7	-
Atracina	6,7	$5,7 \cdot 10^{-1}$	3,2

Método Tellus: El Tellus Institute desarrolló un procedimiento basado en el factor de potencia cancerígena (en kg equivalente a isoforeno) y la dosis de referencia oral para contaminantes no-cancerígenos (en kg equivalente a xileno). El método Tellus permite combinar los efectos cancerígenos y no-cancerígenos en un solo factor de ponderación combinado, en base a una equivalencia de 3 unidades de xileno por cada unidad de isoforeno (ver Tabla 10.11).

TABLA 10.11: FACTORES DE PONDERACION PARA IMPACTO TOXICOLOGICO (METODO TELLUS)

	$f_{\text{CANCERIGENO}}$	$f_{\text{NO CANCERIGENO}}$	$f_{\text{COMBINADO}}$
	kg isoforeno (equivalente)	kg xileno (equivalente)	
NH ₃	-	2,0	2,0
As	$1,3 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^3$	$2,0 \cdot 10^4$
Benceno	7,0	-	22,0
Cd	$1,6 \cdot 10^3$	$4,0 \cdot 10^3$	$4,4 \cdot 10^3$
Ni	$2,2 \cdot 10^2$	$1,0 \cdot 10^2$	$3,7 \cdot 10^2$
Pentaclorofenol	-	67,0	67,0
Fenol	-	3,0	3,0
2,3,7,8 TCDD	$3,9 \cdot 10^7$	-	$1,2 \cdot 10^8$
Tolueno	-	7,0	7,0

Fuente: NCM (1995)

c) Categoría de impacto: Calentamiento Global.

Los factores de ponderación utilizados tienen base científica y están ampliamente aceptados. Se expresan en términos de kg de CO₂ equivalente:

TABLA 10.12: FACTORES PARA CARACTERIZAR EL POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL

Compuesto	Factor de Ponderación (kg CO ₂ equiv./kg)
CO ₂	1
CH ₄	62
N ₂ O	290
CFC-11	5.000

Fuente: NCM (1995)

d) Categoría de impacto: Agotamiento de la capa de ozono.

Al igual que en el caso del calentamiento global, estos factores están avalados por una base científica. Se expresan en base a equivalente de CFC-11, como se muestra en la Tabla 10.13.

TABLA 10.13: FACTORES PARA CARACTERIZAR LOS IMPACTOS POR AGOTAMIENTO DE LA CAPA DE OZONO

Compuesto	Factor de Ponderación (kg CFC11 equiv/kg)
CFC 11	1
CFC 114	0,80
HCFC 22	0,055
HCHC 141	0,11

Fuente: NCM (1995)

e) Categoría de impacto: Acidificación.

Tal como se mencionó anteriormente, los factores de ponderación permiten expresar el potencial de acidificación en términos de equivalente a kg SO₂ :

TABLA 10.14: FACTORES PARA CARACTERIZAR LOS IMPACTOS DE ACIDIFICACIÓN

Compuesto Acidificante	Factor de Ponderación (kg SO ₂ equiv./kg)
SO ₂	1
NO _x	0,70
HCl	0,88
NH ₃	1,88

Fuente: NCM (1995)

f) Categoría de impacto: Eutrofización.

Aquí se incluye, además, el efecto de demanda de oxígeno debido a emisiones de compuestos orgánicos biodegradables. Se incluyen las emisiones de DBO₅, N total al agua, P total al agua y N total al aire:

TABLA 10.15: FACTORES PARA CARACTERIZAR EL POTENCIAL DE EUTROFIZACION

Compuesto	Factor de Ponderación (kg PO ₄ ⁻³ equiv./kg)
PO ₄ ⁻³	1
N total al agua	0,42
N total al aire	0,13
DQO	0,022

Fuente: NCM (1995)

g) Categoría de impacto: Formación de foto-oxidantes.

En este caso, se considera sólo el potencial para formar ozono en presencia de óxidos de nitrógeno y luz solar. En la Tabla 10.16 se presenta algunos valores típicos para caracterizar el potencial de formación de fotooxidantes:

TABLA 10.16: FACTORES PARA CARACTERIZAR EL POTENCIAL FORMACION DE FOTOOXIDANTES

Compuesto	Factor de Ponderación (kg eteno equiv./kg)
Eteno	1
Alcanos (promedio)	0,40
Cetonas (promedio)	0,33
Esteres (promedio)	0,22
Olefinas (promedio)	0,91
Hidrocarbano (promedio)	0,337
Aromáticos (promedio)	0,761

Fuente: NCM (1995)

10.6) VALORACIÓN

Aquí se evalúa cuantitativamente o cualitativamente la importancia relativa de las distintas categorías de impacto. Si la valoración es cuantitativa, se utiliza factores de valoración en base a criterios socioeconómicos. Ello permite obtener un perfil ambiental ponderado que facilita el cálculo de un índice ambiental global para el sistema en estudio. Los factores de ponderación para las distintas categorías pueden basarse en valores monetarios (ej. costos de los daños ocasionados al medio, costos para la prevención de las emisiones). En el seno de ISO se está evaluando si es pertinente incluir la valoración en la evaluación de los impactos en el ACV, dada la falta de rigurosidad científica de esta fase.

10.7) UN EJEMPLO: ANALISIS DE INVENTARIO DE LA PRODUCCION DE CELULOSA KRAFT BLANCA

La producción de celulosa kraft blanca constituye uno de los principales rubros de la industria forestal chilena. Esta actividad implica una intensiva utilización de recursos naturales (ej.: suelo, agua), genera importantes cantidades de residuos, y tiene gran impacto en el ciclo del carbono. A continuación se presentan los resultados del análisis de inventario de esta actividad, recientemente publicado por González (1999)¹. El objetivo de este análisis de inventario es entregar información sobre los flujos de materiales y energía a través de los principales componentes del ciclo de vida. En este caso, se evalúa comparativamente el uso de pino y eucalipto como materia prima, ya que ambas especies constituyen la única fuente de fibra celulósica en Chile. El estudio considera la utilización de la tecnología de mayor potencial de implementación en la actualidad:

- Cocción extendida
- Predesignificación con oxígeno
- Blanqueo libre de cloro elemental (ECF).

¹ González P. Desarrollo de un Modelo Conceptual para la toma de decisiones en Gestión Ambiental de la Industria de Pulpa Química Kraft Blanca. Tesis para optar al Grado de Doctor en Ciencias Ambientales. Centro EULA. Universidad de Concepción. Chile. (1999).

Para mayores detalles de la descripción del proceso de producción de celulosa kraft blanca, ver el Capítulo 4.

El ciclo de vida de la celulosa comienza en el recurso forestal, donde los compuestos lignocelulósicos son producidos a partir de la fotosíntesis. Este subsistema forestal provee la materia prima para el procesamiento industrial, donde se genera la pulpa celulósica. En el caso chileno, la celulosa se comercializa principalmente en el extranjero y se destina a diferentes usos como fuente de fibra papelera, material adsorbente u otros. Finalmente, los residuos generados por el consumo final se pueden reciclar, incinerar o disponer en vertederos. En este estudio, los límites del sistema se fijan en aquellas actividades que se realizan en Chile, es decir, la generación de materia prima forestal y la producción de pulpa blanca. Los diferentes componentes de los subsistemas forestal e industrial se ilustran en la Figura 10.4. Los otros componentes del ciclo de vida (ej. producción de reactivos, producción de papel, disposición final de residuos) son evaluados en forma general, con vistas a analizar los consumos energéticos y las emisiones de CO₂.

Las Tablas 10.17 y 10.18 resumen los principales resultados del análisis de inventario, correspondientes a los subsistemas forestal e industrial, respectivamente. Estos valores corresponden a las cargas ambientales asociadas al todo el Ciclo de Vida de la producción de pulpa química kraft blanca. Ellos están referidos a una base de cálculo de 365.000 (ton celulosa/año), siendo esta la producción típica de las plantas nacionales actuales. Cabe señalar que más del 50% de la madera de pino cosechada se destina directamente como materia prima para pulpa, mientras que el resto se utiliza en aserrío donde un 30% se puede recuperar como residuo pulpable. Por su parte, casi la totalidad de la madera de eucalipto se destina a producción de pulpa.

En la Tabla 10.17 se observa que las plantaciones de eucalipto demandan sólo un tercio de la extensión de terreno requerida por las plantaciones de pino, para sostener una producción de pulpa similar. Ello se debe al menor ciclo de rotación del eucalipto (10 años, comparados con 20 años para el pino), y a su mayor densidad y contenido de celulosa. Esto último conlleva a que los requerimientos de área a plantar anualmente para el eucalipto son inferiores al 60% de lo necesario para el pino. Por esta misma razón, los consumos de pesticidas y nutrientes usados en establecimiento de una plantación con eucalipto son proporcionalmente menores que para el caso del pino.

El mayor contenido de lignina presentado por el pino resulta en un menor rendimiento de proceso, por lo que se requiere 15% menos madera de eucalipto que de pino, para una misma cantidad de pulpa química blanca. En consecuencia, el procesamiento del pino consume mayores cantidades de reactivos de proceso, principalmente aquellos asociados al blanqueo (ej.: cloro, clorato, metanol, ácido sulfúrico), lo que se traduce en mayores emisiones de contaminantes organoclorados.

TABLA 10.17 ANÁLISIS DE INVENTARIO. SUBSISTEMA SILVÍCOLA
Base de Cálculo 365.000 (Ton. Pulpa Química Kraft Blanca por Año)

SUBSISTEMA SILVICOLA	EUCALIPTO	PINO
	(toneladas/año)	(toneladas/año)
Vivero		
Principales entradas:		
Requerimientos de suelo (ha)	2,6	6,7
Agua para riego	1.300	2.300
Fijación Neta de CO ₂	14.300	24.400
Pesticidas (como agente activo)	0,04	0,12
Nutrientes (como NPK)	7,8	13,3
Requerimientos de Energía (MJ/año)	0,1 10 ⁶	0,3 10 ⁶
Principales Salidas:		
Plantas (plantas/año)	7,8 10 ⁶	13,3 10 ⁶
Emisión CO ₂ (combustible fósil)	6,4	19
Residuos Sólidos	0,1	0,22
Establecimiento de la Plantación		
Principales entradas:		
Uso de Suelo para Rotación Sustentable (ha)	49.000	166.000
Area a plantar (ha / año)	4.900	8.300
Fijación Neta de CO ₂	1.530.000	3.086.900
Pesticidas (como agente activo)	70	170
Nutrientes (como NPK)	190	330
Requerimientos de Energía (MJ/año)	1,8 10 ⁶	3,1 10 ⁶
Principales salidas:		
Emisión CO ₂ (combustible fósil)	115	195
Residuos Sólidos	3,4	8,3
Poda, Raleo y Cosecha		
Principales entradas:		
Requerimientos de Energía (MJ/año)	45 10 ⁶	102 10 ⁶
Area a cosechar (ha / año)	4.900	8.300
Principales Salidas:		
Madera pulpable (ton ssc/año)	735.000	627.500
Madera a aserradero (ton ssc/año)	0	812.240
Emisiones CO ₂ (combustible fósil)	2.700	6.540
Emisiones de CO ₂ (renovable)	26.800	383.000
Emisiones de NO _x	16	39

Fuente: González (1999)

TABLA 10.18. ANÁLISIS DE INVENTARIO. SUBSISTEMA INDUSTRIAL
Base de Cálculo 365.000 (Ton. Pulpa Química Kraft Blanca por Año)

SUBSISTEMA PROCESAMIENTO INDUSTRIAL	EUCALIPTO	PINO
	Tonelada/año	Tonelada/año
Principales Entradas		
Requerimientos de Terreno (hectáreas)	50	50
Requerimientos de Madera de pulpable (ton)	735.000	871.000
Requerimientos de agua de Proceso	14 10 ⁶	16 10 ⁶
Requerimientos de Energía Neta (MJ/año):		
Industria de Proceso	670 10 ⁶	910 10 ⁶
Transporte de Materias Primas y Productos	156 10 ⁶	309 10 ⁶
Producción de Reactivos Químicos	95 10 ⁶	138 10 ⁶
Sulfato de Sodio	1.800	1.800
Hidróxido Sodio	8.000	9.900
Carbonato de Calcio	8.000	9.900
Oxido de Calcio	730	730
Cloro	0	0
Clorato de Sodio	3.520	6.700
Metanol	1.070	2.050
Acido Sulfúrico	3.600	6.900
Oxígeno	7.420	7.600
Peróxido de Hidrógeno	730	730
Principales Salidas		
Pulpa	365.000	365.000
Madera Aserrada	0	406.000
Venta Energía Eléctrica (MJ/año)	432 10 ⁶	972 10 ⁶
Descarga de Residuos Líquidos	13 10 ⁶	15 10 ⁶
DQO en RIL	3.080	7.595
AOX en RIL	81	144
Emisiones de CO ₂ (fósil)	68.830	100.120
Emisiones de CO ₂ (renovable)	813.100	1.490.000
Emisiones de SO ₂	790	940
Emisiones de Material Particulado	440	550
Emisiones de TRS	170	200
Emisiones de NO _x	1.310	1.500
Emisiones de HAP	110	180
Residuos Sólidos	11.000	12.400

Fuente: González (1999)

Por su parte, los requerimientos de agua del procesamiento industrial son responsables de la casi totalidad del consumo en todo el ciclo de vida. Se debe señalar que el agua requerida para mantener el crecimiento de los árboles se obtiene en su totalidad de los procesos hidrológicos naturales (ej. lluvias, escorrentía); los valores mostrados en la Tablas 10.17 y 10.18 sólo incluyen el agua suministrada artificialmente. Por otro lado, las principales emisiones atmosféricas se generan en el subsistema industrial y corresponden a SO₂, NO_x, TRS y compuestos orgánicos volátiles peligrosos (HAP).

La actividad forestal tiene una gran importancia en el ciclo del carbono ya que durante el crecimiento del árbol se fija el CO₂ atmosférico en la biomasa forestal, gracias al proceso de fotosíntesis. Por otra parte, durante las actividades de cosecha, procesamiento industrial, y transporte se genera CO₂ debido principalmente al consumo de combustibles fósiles y derivados de la madera. La Tabla 10.19 presenta el balance de CO₂ asociado al sistema de estudio. En ella se puede observar que existe un excedente de fijación mayor para el pino que para el eucalipto. La mayor captación neta de CO₂ en el pino se debe a que se requiere una mayor cantidad de biomasa para elaborar los productos y, además, se genera una gran cantidad de producto aserrado que mantiene el carbono fijado. Estos excedentes representan una interesante contribución al ciclo global del carbono y son equivalentes al CO₂ emitido anualmente por un parque automotriz de 83.000 y 152.000 vehículos, para el caso del eucalipto y pino, respectivamente (lo cual es equivalente a la combustión de 214.000 y 400.000 toneladas de gasolina, respectivamente). Si se considera las emisiones generadas en la producción de papel (fuera del sistema en estudio), el excedente de CO₂ fijado se reduce en 28% y 16% para eucalipto y pino, respectivamente.

TABLA 10.19. BALANCE CO₂, CONSIDERANDO EL CICLO DE VIDA COMPLETO

Etapa del Ciclo	CO ₂ (ton/año)	
	Eucalipto	Pino
Subsistema Silvícola	-1,515 10 ⁶	-2,72 10 ⁶
• Fijación	-1,544 10 ⁶	-3,11 10 ⁶
• Emisión	+0,029 10 ⁶	+0,39 10 ⁶
Transporte	+0,009 10 ⁶	+0,019 10 ⁶
Subsistema Industrial	+0,872 10 ⁶	+1,568 10 ⁶
Balance sin producción de papel	-0,633 10⁶	-1,137 10⁶
Producción de papel	+0,18 10 ⁶	+0,18 10 ⁶
Balance con producción de papel	-0,453 10⁶	-0,957 10⁶

Fuente: González (1999)

Para efectos de completar el ciclo del carbono dentro del concepto “de la cuna a la tumba”, se considera las emisiones de CO₂ generadas por la incineración final de la totalidad de la pulpa celulósica. Estas emisiones corresponden a 0,54 ton CO₂/año, para ambas materias primas. Por lo tanto, el balance global de CO₂ para todo el ciclo es de +0,087 y -0,417 ton CO₂/año, para el eucalipto y pino respectivamente. Para el caso del eucalipto, el CO₂ emitido a lo largo de todo el ciclo de vida supera en

5,5% al CO₂ fijado en el subsistema silvícola. Por el contrario, el pino mantiene un excedente de fijación neto de CO₂ correspondiente a un 14% del CO₂ total emitido en el ciclo de vida, aún cuando se incinere el 100% del papel producido. Dicho excedente de fijación de CO₂ se reduciría a cero con la incineración de 0,21 10⁶ (ton madera/año), es decir, un 52% de la madera aserrada producida en el subsistema industrial del pino.

La Tabla 10.20 presenta los consumos y generación de energía para todo el ciclo de vida de producción de pulpa. Es importante tener en cuenta que en el procesamiento industrial, una parte de la energía se obtiene de la combustión de los residuos combustibles y licor negro generados en el procesamiento de las materias prima. Además, se genera un excedente energético que es exportado como energía eléctrica.

TABLA 10.20. BALANCE DE ENERGÍA, CONSIDERANDO EL CICLO DE VIDA COMPLETO

Etapa del Ciclo	ENERGIA (MJ/año)	
	Eucalipto	Pino
Consumo subsistema silvícola	-46,9 10 ⁶	-105,4 10 ⁶
Consumo Transporte	-156 10 ⁶	-309 10 ⁶
Consumo en producción de celulosa	-670 10 ⁶	-910 10 ⁶
Consumo en producción de químicos	-95 10 ⁶	-138 10 ⁶
Total Consumo	-967,9 10⁶	-1462,4 10⁶
Generación excedente en producción de celulosa	+432 10 ⁶	+972 10 ⁶
Balance neto	-535 10⁶	-490 10⁶

Fuente: González (1999)

Se observa que el procesamiento de pino requiere 30% más energía que el eucalipto. Por su parte, una planta de pulpa en base a pino puede generar el doble de energía eléctrica excedente que en el caso del eucalipto, debido a la mayor cantidad de residuos sólidos combustibles y al mayor contenido orgánico del licor negro generado por el procesamiento del pino. Sin embargo, el balance total de energía del sistema estudiado demuestra que existe un déficit energético a lo largo de todo ciclo de vida, equivalente a 1,47 y 1,34 GJ/ton de pulpa, para eucalipto y pino respectivamente.

A partir de este análisis de inventario se puede completar las siguientes fases del ACV. Este ejemplo permite visualizar la importancia de tipo de análisis ya que entrega información acerca de la relevancia ambiental de cada una de las actividades del ciclo de vida, facilitando la identificación de medidas de mejoramiento en las áreas de mayor impacto.

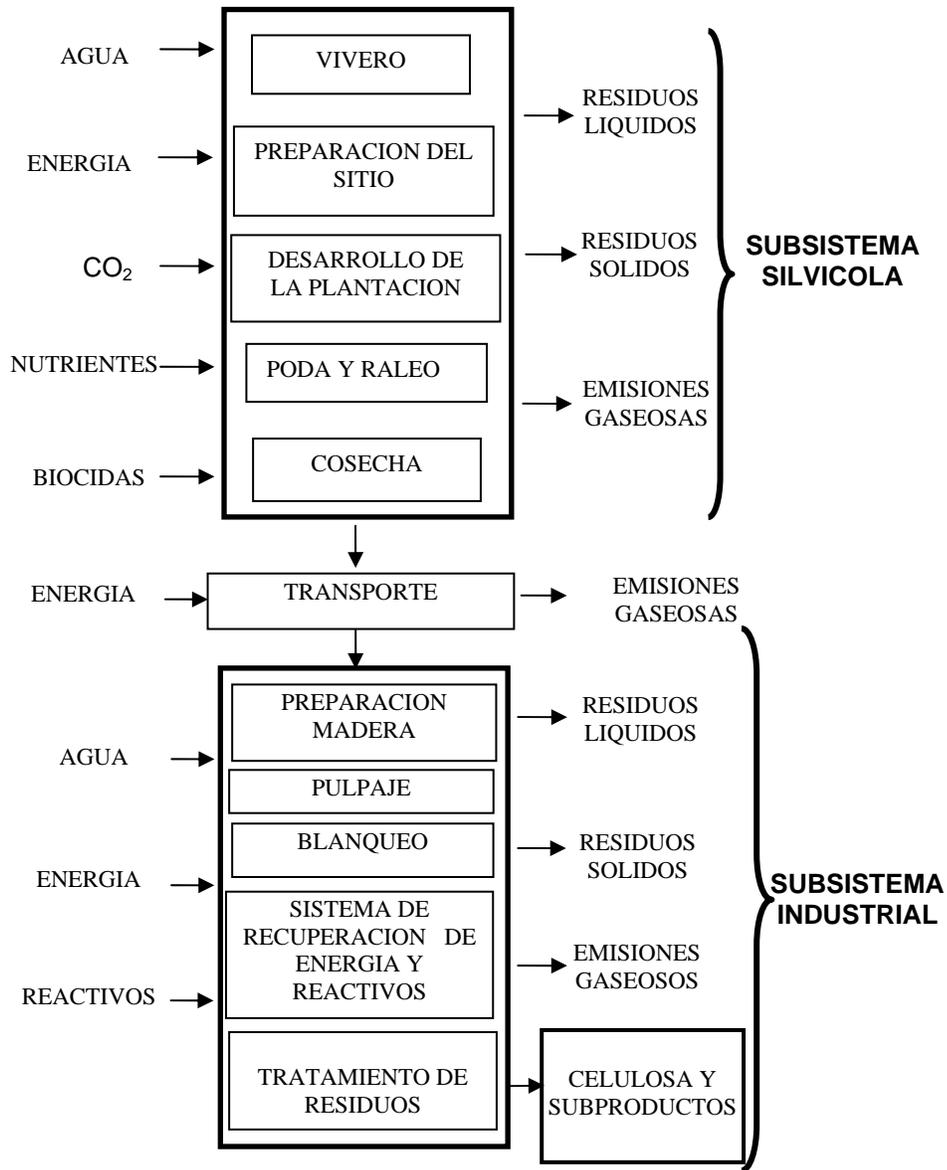


FIGURA 10.4: PRODUCCION DE PULPA KRAFT BLANCA

BIBLIOGRAFIA

Fullana P., Puig R. "Análisis del Ciclo de Vida". Ed. Rubes. Barcelona (1997).

González P. Desarrollo de un Modelo Conceptual para la toma de decisiones en Gestión Ambiental de la Industria de Pulpa Química Kraft Blanca. Tesis para optar al Grado de Doctor en Ciencias Ambientales. Centro EULA. Universidad de Concepción. Chile (1999).

Heijungs R. *Environmental Life Cycle Assessment of Products*, Centre of Environmental Science, Leiden (1992)

Henn C., Fava J, "LCA and Resource Management", cap. 14 en "Environmental Strategies Handbook", R.V. Kolluru, McGraw Hill NY (1994).

Nordic Council of Ministers, "Nordic Guidelines on Life Cycle Assessment", The Nordic Council, Stockholm (1995).

SETAC, "Guidelines for LCA: A Code of Practice", Society for Environmental Toxicology and Chemistry, Bruselas, (1993).

CAPÍTULO 11

PRINCIPIOS DE ANÁLISIS DE RIESGO PARA LA INDUSTRIA DE PROCESOS

11.1) INTRODUCCIÓN

Una historia de la vida real...

“El Sr. Kulshresh miró el rostro plácido de su hijo mayor, quién dormía en su lecho junto a sus tres hermanos menores. Se sintió orgulloso y feliz al verlo allí, transformado en un joven candidato a la carrera de medicina, en la Universidad de Nueva Delhi. ¡Cómo han pasado los años, desde que él también era un estudiante, lleno de ilusiones y temores! La voz de su esposa lo sacó de sus reflexiones y recordó que mañana tendría que regresar muy temprano a su trabajo, en la capital. Recordó, también, que ya era tiempo de comprar los regalos de Navidad para los niños, y enviar las tarjetas a la larga lista de amigos y parientes. Sus piernas difícilmente podían sostenerlo, después de las agitadas horas de fútbol en las festividades del colegio local. Había sido un domingo especial, con toda la vecindad reunida en torno a comidas familiares, juegos infantiles y actividades deportivas. Una vez en su cama, apagó la luz, y se dejó llevar hacia su sueño. Lo último que escuchó fue el reloj del comedor marcando la medianoche y el sonido distante de una sirena... tal vez de la planta Union-Carbide ubicada a unas pocas cuadras de su hogar. A la mañana siguiente, todos los canales de televisión alrededor del mundo informaron que se había producido un accidente en una fábrica de un exótico lugar de la India. Una nube tóxica de 25 toneladas de gas isocianato de metilo, escapó de su lugar de almacenamiento, dispersándose en un entorno de 50 km². Las cifras preliminares estimaron alrededor de 2.500 muertos y más de 100.000 heridos. El Sr. Kulshresh, su esposa, sus cuatro hijos, sus vecinos y muchos otros habitantes de Bophal nunca despertaron de su sueño esa helada noche del 17 de diciembre de 1984, para saber lo que sucedió. Nunca podrán declarar a los periodistas o a los jueces su verdad...”

Esta corta y triste historia se ha repetido por muchas décadas, con distintos personajes, diferentes escenarios y argumentos. Al contarla en estas páginas, he querido rendir un pequeño homenaje a los 500 muertos de la inflamación de gasolina derramada por la ruptura de un poliducto en Cubatao (Brasil) en febrero de 1974; a los 28 muertos debido a la explosión de 80 toneladas de ciclohexano en Flixborough (Gran Bretaña) en junio de 1974; a los 215 muertos de la explosión de 45 m³ de propileno en el Camping de Los Alfaques (España) en julio de 1978; a los 452 muertos, 100 desaparecidos y 4.200 heridos de la explosión de balones de LPG en San Juan de Ixhuatepec (México) en noviembre de 1984; a los 200 muertos y 1.500 heridos de la explosión de combustibles vertidos en la red de alcantarillado urbano en Guadalajara (México) en abril de 1992; a los incontables muertos y heridos del accidente nuclear de Chernobyl... y a los miles y miles de seres humanos que cada año son víctimas de las consecuencias de emisiones tóxicas, de explosiones, de incendios, y de exposiciones a sustancias

corrosivas o radioactivas en todo el mundo, la gran mayoría de los cuales ni siquiera aparecen en los titulares de los noticieros. A este catálogo del horror, habría que agregar los costos económicos debido a las evacuaciones masivas, a la secuela de destrucción de infraestructura urbana e industrial y de daños al medio ambiente natural, derivados de accidentes industriales en todo el mundo, incluyendo aquellos ocurridos durante el transporte y el almacenamiento de productos y materias primas. Basta mencionar los serios impactos derivados de la contaminación del medio marino debido a los accidentes sufridos por los petroleros Amoco-Cádiz en 1978 y EXXON Valdez en 1989, que produjeron el derrame al mar de 220.000 y 40.000 toneladas de crudo, respectivamente, dejando centenares de kilómetros de costa contaminados, y una mortandad masiva de especies marinas. Muchos de estos daños representan pérdidas económicas directas, por costos asociados a las operaciones de limpieza y restitución del entorno, indemnizaciones, multas y otros cargos. Sólo en la explosión de Guadalajara, se estima un daño del orden de US\$ 7.000 millones. Por ello no debería extrañar que, durante 1985, las industrias norteamericanas invirtieran cerca de US\$ 8.000 millones en medidas para incrementar la seguridad de las instalaciones y proteger la integridad de sus trabajadores.

Es interesante constatar que algunos accidentes han motivado fuertes modificaciones legales, aún cuando no han tenido consecuencias en términos de vidas humanas. En Europa, la Planta de Icmesa en Seveso (Italia), protagonizó un serio accidente en julio de 1976, cuando una reacción química fuera de control provocó el venteo a la atmósfera de cerca de 2 kg de tetraclorodibenzodioxina (TCDD). Dicha sustancia tiene un fuerte potencial mutagénico y presenta una dosis letal de 0,1 mg, para una persona normal. Como consecuencia, se produjo una vasta contaminación del suelo, daños a la salud de la población (alteraciones cutáneas, abortos espontáneos) y daños económicos considerables. La masiva evacuación de la población del área afectada evitó una catástrofe mayor. Este accidente dio origen a la Directiva Seveso de la Comunidad Europea, que establece normativas acerca de la identificación de peligros y evaluación de riesgos por parte de las industrias, el desarrollo de planes de emergencia internos y externos, mecanismos de información y entrenamiento del personal, entre otros.

El accidente de la Planta nuclear de Three Mile Island (Pennsylvania,EEUU), ocurrido en marzo de 1979, fue la primera gran crisis (conocida públicamente) sufrida por la industria nuclear, ante los ojos de cientos de millones de televidentes, quienes observaron la evacuación de 200.000 personas que habitaban el área afectada. El horror nuclear amenazaba con desencadenarse a través de "su opción pacífica", y no debido a la explosión de misiles enemigos. Afortunadamente, este accidente no tuvo consecuencias en términos de vidas humanas, pero afectó seriamente la confianza de la población respecto a la seguridad de las instalaciones nucleares. Su espectacularidad y potencial de daño, lanzó fuertes señales de alarma en el mundo industrializado; sin embargo, ello no fue suficiente para evitar la gran catástrofe ocurrida en Chernobyl (Ucrania), siete años más tarde...

En Chile, existen innumerables ejemplos de daños al medio ambiente y a la salud de las personas producidos por eventos accidentales, muchos de los cuales se

deben a una pésima gestión de seguridad. Bastaría mencionar los incendios ocurridos en los últimos años en plantas industriales ubicadas en zonas urbanas densamente pobladas (por ejemplo, la fábrica Molybac de Santiago), el incendio de la Bahía de San Vicente en Talcahuano, la contaminación del Río Loa con vertidos de relaves de la minería, el problema generado por el acopio de plomo en el Norte, los cotidianos accidentes de tránsito que involucran camiones cargados con sustancias peligrosas, los daños a la salud provocados por la inadecuada manipulación de biocidas de uso agrícola, etc. Ello ha despertado la conciencia pública en relación con los riesgos asociados a la actividad productiva.

Peligro y Riesgo

Es importante comenzar este capítulo con las definiciones de dos conceptos utilizados con frecuencia, pero no siempre de manera correcta: peligro y riesgo.

Peligro: *Se utiliza para designar una condición física o química, que puede causar daños a las personas, el ambiente o la propiedad (Ej.: incendio, explosión, intoxicación). Diccionario Larousse: "Situación en la que es posible que ocurra un mal". (Inglés: hazard).*

Riesgo: *Implica la posibilidad de sufrir pérdidas económicas o daños a las personas, al ambiente o a la propiedad, expresada en función de la probabilidad de ocurrencia del evento y la magnitud de las consecuencias. Dic. Larousse: "Estar expuesto a la desgracia". (Inglés: risk).*

Ningún sistema tecnológico, por muy sofisticado que sea, desde el punto de vista técnico, está a salvo de lo imprevisto o de la falibilidad de la intervención humana. La complejidad y la envergadura de los desarrollos tecnológicos, están limitados por la imposibilidad de tener en cuenta todos los eventuales casos de fallo, no ya de la tecnología propiamente tal, sino de la interrelación hombre-máquina. Todos los grandes accidentes industriales de este siglo, presentan una característica común: la acción del hombre aparece como la causa primaria e inmediata¹.

En el caso de la industria de procesos, muchos de los materiales utilizados poseen una gran reactividad y toxicidad, lo que sumado a las altas temperaturas y presiones frecuentemente encontradas en los procesos, implican un alto potencial de daño. El transporte, almacenamiento y procesamiento de tales materiales, presenta niveles de riesgos que, en muchos casos, no son evaluados adecuadamente ni son considerados en la toma de decisiones. Mientras mayor sea nuestro conocimiento acerca de los peligros asociados a la actividad productiva, de los eventos indeseados que puedan tener lugar, de sus causas y de sus consecuencias, mayor será nuestra capacidad para **prevenir** su ocurrencia o **mitigar** sus consecuencias.

En este contexto, el desafío que enfrentan los profesionales involucrados en el diseño y operación de una planta industrial es claro:

¹ Sobre este tema, se recomienda el texto: P. Lagadec. "La Civilización del Riesgo". Editorial Fundación MAPFRE (1983).

No sólo se debe satisfacer los requerimientos de rentabilidad económica, calidad, cantidad de productos y protección ambiental, sino que también se debe garantizar que los niveles de riesgos involucrados en las diferentes etapas del proceso sean aceptables.

De aquí surge una pregunta obvia e ineludible: ¿Cuál es el nivel de riesgos aceptable? Este tema ha sido objeto de amplio debate en los países industrializados a partir de los años 70. La percepción pública respecto a los peligros asociados a la actividad industrial, ha sido modelada a la luz de muchos accidentes, tales como aquellos mencionados en párrafos anteriores. Vivimos rodeados de peligros en cada ámbito, en cada actividad, en todo momento. Aceptamos la existencia de una amplia gama de peligros, mientras que tendemos a rechazar otros. Tal como lo expresó J.D. Rimington, Director General de Health and Safety Executive (GB)², *toleramos* la existencia de cierta circunstancia peligrosa, cuando existen claros beneficios derivados de dicha situación, y cuando tenemos la certeza de que se puede mantener bajo control. Muchas situaciones potencialmente peligrosas se *aceptan* como parte del diario vivir, particularmente, aquellas sobre las cuales el individuo ha tomado una decisión voluntaria. En aquellos casos donde la situación de peligro ha sido impuesta externamente, sin que el individuo tenga capacidad de decisión, la actitud de rechazo aparece como la primera respuesta. Tal actitud hacia el riesgo proviene de un balance de *Riesgos vs. Beneficios*, que cada uno de nosotros efectúa, consciente o inconscientemente, dentro de los marcos de referencia cultural, ético y psicológico personal. Evidentemente, la calidad de la información respecto a la naturaleza de los peligros, la probabilidad de ocurrencia de los eventos indeseados y de sus consecuencias, jugará un papel fundamental en la actitud que el individuo asuma. Es importante reconocer la gran complejidad del tema, y el importante componente de subjetivismo involucrado en la percepción de los peligros y sus riesgos asociados. La gestión de seguridad en una empresa debe considerar tales características para lograr una mayor efectividad en el control preventivo de accidentes e incidentes.

² J.D. Rimington, "Overview of Risk Assessment", *Trans.I.Chem.E.*, vol.71, part B, pp.112-115 (1993).

11.2) ANÁLISIS DE RIESGO COMO HERRAMIENTA DE DISEÑO Y GESTIÓN

Para poder decidir si el riesgo asociado a una actividad es aceptable o no, se requiere estimar de alguna manera el nivel de peligro potencial, en términos del daño a las personas, a los bienes y al ambiente, así como la probabilidad de que tal peligro se materialice. Para ello, se debe llevar a cabo un **análisis de riesgo**, cuyos resultados permitan tomar las medidas de gestión y/o tecnológicas que se requiera. La Norma Británica BS 8800 define el análisis de riesgo como:

Análisis de Riesgo: *Es el proceso de estimar la magnitud del riesgo y decidir si dicho riesgo es aceptable o tolerable.*

En general, el análisis de riesgo para la prevención de accidentes sigue las siguientes etapas:

TABLA 11.1: ETAPAS DEL ANÁLISIS DE RIESGO

ETAPAS DEL ANÁLISIS DE RIESGO	PREGUNTAS A RESOLVER
1) Identificación de los peligros y de los eventos que pueden llevar a la materialización de tales peligros.	<i>¿Qué accidentes pueden ocurrir?</i>
2) Análisis de los mecanismos que dan lugar a estos eventos.	<i>¿Porqué y cómo pueden suceder?</i>
3) Estimación de los efectos (severidad) debido a la materialización de dichos eventos.	<i>¿Cuales son las consecuencias?</i>
4) Estimación de la probabilidad de ocurrencia de tales eventos.	<i>¿Con qué frecuencia podría ocurrir un accidente?</i>
5) Estimar el riesgo y determinar su aceptabilidad o tolerabilidad.	<i>¿Es aceptable o tolerable el riesgo?</i>

El análisis de riesgo se ha constituido en una poderosa herramienta de gestión, donde se utiliza el conocimiento acerca de los procesos para identificar los potenciales accidentes que pueden ocurrir, sus causas, sus consecuencias y su frecuencia estimada. Los resultados de dicho análisis permiten jerarquizar diferentes opciones para reducir los riesgos de mayor envergadura.

La aplicación del análisis de riesgo debe comenzar desde las primeras etapas del diseño de un proceso (ingeniería conceptual), de modo que las modificaciones necesarias para reducir el nivel de riesgo sean incorporadas en las etapas sucesivas (ingeniería básica e ingeniería de detalle) (ver la Figura 11.1).

Las consecuencias derivadas de un potencial accidente y su probabilidad de ocurrencia permiten estimar el riesgo asociado. Normalmente, el riesgo se estima como:

$$\text{RIESGO} = \text{CONSECUENCIAS} \times \text{PROBABILIDAD}$$

El riesgo asociado a una circunstancia peligrosa puede ser alto, debido a que las consecuencias del accidente pueden ser muy altas y/o debido a que exista una alta probabilidad de ocurrencia. Es importante comparar las medidas para reducir el riesgo con los beneficios que se deriven de ellas, para así decidir cuales son más apropiadas, tanto por su efectividad, como por sus atributos económicos. Si las consecuencias se expresan monetariamente, entonces el riesgo representa el costo esperado, asociado al accidente. Al incrementar las inversiones en medidas de reducción de riesgos, se reducen las consecuencias de un accidente y/o disminuye su probabilidad de ocurrencia. Ello permite efectuar una evaluación de "costo-beneficio".

Tal como lo muestra la Figura 11.2, existe un nivel de seguridad "óptimo", donde el costo total (costo de las medidas de seguridad más el costo asociado a accidentes) alcanza un valor mínimo. Es importante incluir todos los factores de costo en el cálculo monetario de las consecuencias. Se debe considerar todos aquellos aspectos que impliquen costos debido a un accidente, tales como: pérdida de mercado, pérdidas por disminución de la producción, daño a la imagen de la empresa, costos legales, etc..

La implementación de un sistema de gestión de seguridad trae considerables beneficios iniciales en materia de prevención de riesgos. Ello se debe a que se obtiene un mayor conocimiento de los peligros existentes, de los eventos iniciadores y propagadores, de los niveles de riesgo involucrados y de las medidas necesarias para su control. Ello se ve reflejado en la Figura 11.2, donde se ilustra la importante reducción en el costo potencial, asociado a las circunstancias peligrosas, a través de inversiones relativamente bajas. Si se desea avanzar hacia un estado de mucho mayor seguridad operacional (es decir, de menor riesgo), se requerirá inversiones en nuevos equipos, cambios en los procesos, sistemas de control y emergencia más sofisticados, etc..

Desgraciadamente, resulta difícil efectuar un análisis de riesgo expresado en términos económicos precisos. En la práctica, en la mayoría de los casos se recurre a una estimación de riesgos en base cualitativa o utilizando escalas numéricas relativas. En tal caso, es fundamental que se establezca claramente los criterios acerca de los niveles de riesgo. Un buen ejemplo se encuentra incluido en la Norma BS 8800, donde se clasifica los riesgos de acuerdo a 5 categorías: Bajo, Tolerable, Moderado, Sustancial e Intolerable, de acuerdo a los criterios presentados en Tabla 11.2. En este caso, se define como "Riesgo Tolerable" aquel riesgo que ha sido reducido al más bajo nivel posible, dentro de los medios "prácticamente razonables". En este mismo ejemplo, se establece claramente las acciones que emanan para cada categoría de riesgo definida aquí.

TABLA 11.2: CRITERIOS PARA DEFINIR CATEGORÍAS DE RIESGOS Y ACCIONES RECOMENDADAS, DE ACUERDO A LA NORMA BS 8800

CONSECUENCIA	PROBABILIDAD DE OCURRENCIA	NIVEL DE RIESGO
Daño Leve (1)	Probabilidad Baja (1)	Bajo (trivial)
Daño Leve (1)	Probabilidad Media (2)	Tolerable
Daño Leve (1)	Probabilidad Alta (3)	Moderado
Daño Moderado (2)	Probabilidad Baja (1)	Tolerable
Daño Moderado (2)	Probabilidad Media (2)	Moderado
Daño Moderado (2)	Probabilidad Alta (3)	Sustancial
Daño Extremo (3)	Probabilidad Baja (1)	Moderado
Daño Extremo (3)	Probabilidad Media (2)	Sustancial
Daño Extremo (3)	Probabilidad Alta (3)	Intolerable
NIVEL DE RIESGO	ACCIONES	
Riesgo Bajo (trivial) (1)	No se requiere acciones adicionales	
Riesgo Tolerable (2)	No se requiere controles adicionales. Se recomienda buscar medidas de bajo costo para reducir aún más el riesgo. Se requiere monitoreo para asegurar que los controles existentes se mantengan.	
Riesgo Moderado (3,4)	Se debe hacer esfuerzos para reducir el riesgo, pero sin incurrir en costos de prevención excesivos. En aquellos casos donde existan consecuencias potenciales con daños extremos, se recomienda hacer una nueva evaluación de la probabilidad de ocurrencia, para decidir acerca de nuevas medidas de control.	
Riesgo Sustancial (6)	No se recomienda iniciar las operaciones hasta que el riesgo no haya sido reducido. En caso de operaciones en curso, éstas deberían cesar. Se debe destinar recursos importantes para reducir el riesgo.	
Riesgo Intolerable (9)	La operación no debe comenzar ni continuar, hasta que el riesgo haya sido reducido. Se debe destinar todos los recursos necesarios para tal objetivo.	

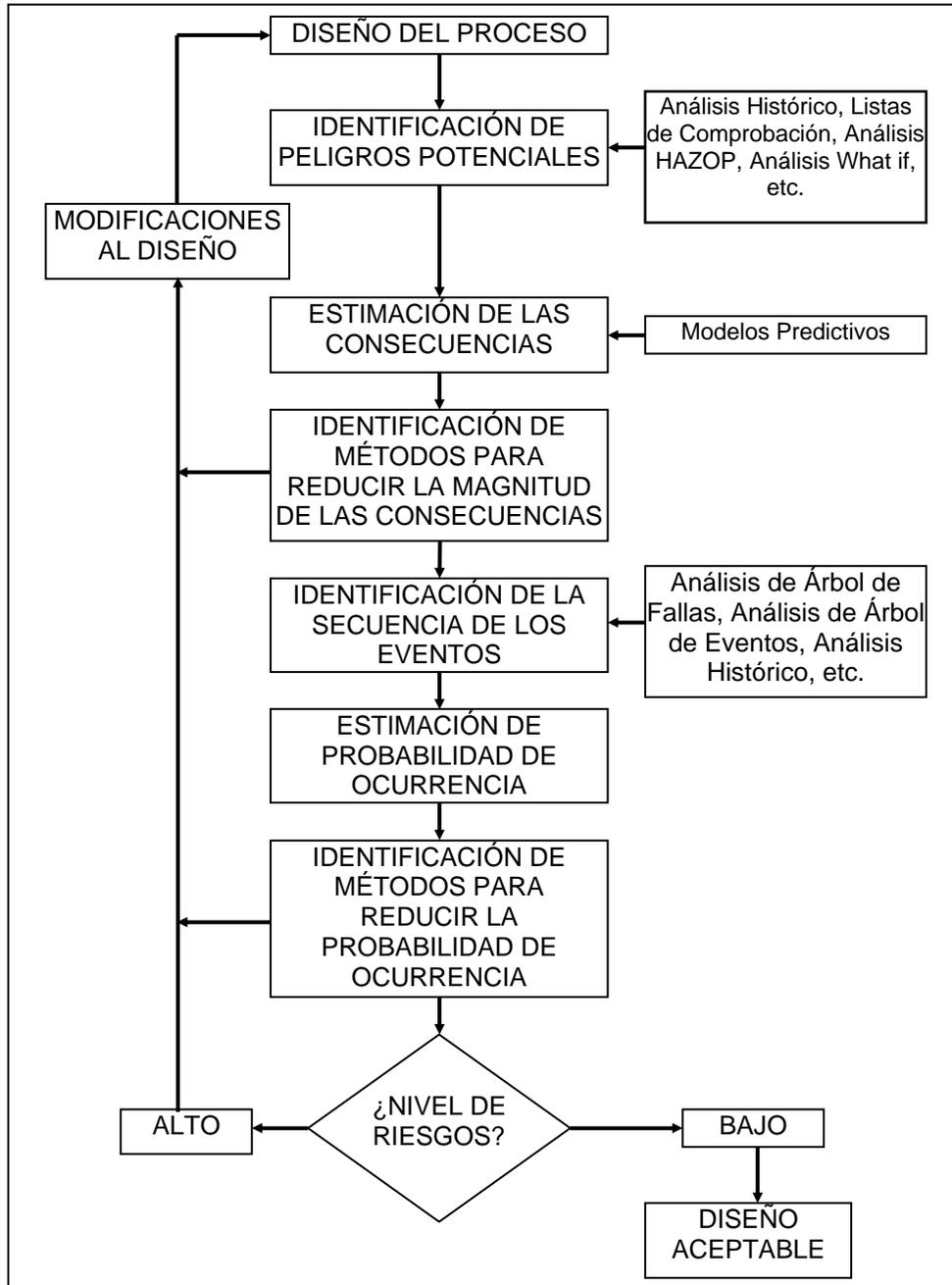


FIGURA 11.1: ETAPAS TÍPICAS DE UN ANÁLISIS DE RIESGO EN EL CONTEXTO DEL DISEÑO DE PROCESOS MÁS SEGUROS

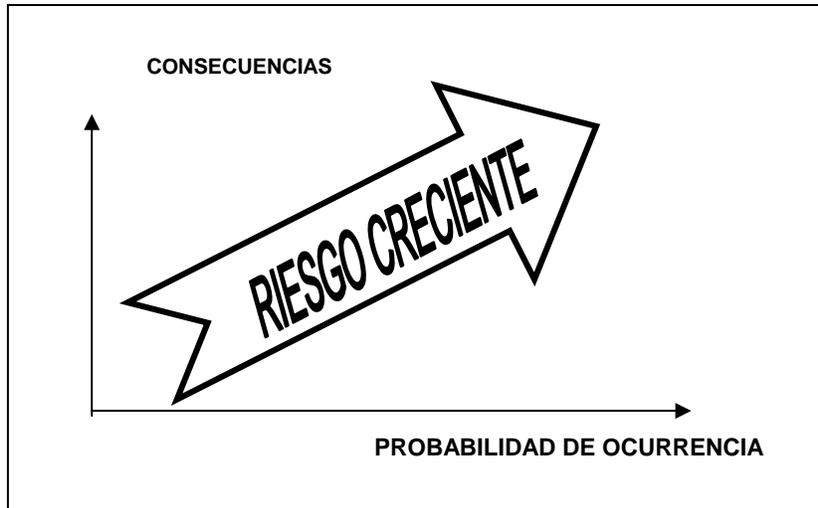


FIGURA 11.2: GRÁFICO DE CONSECUENCIAS V/S PROBABILIDAD DE OCURENCIA

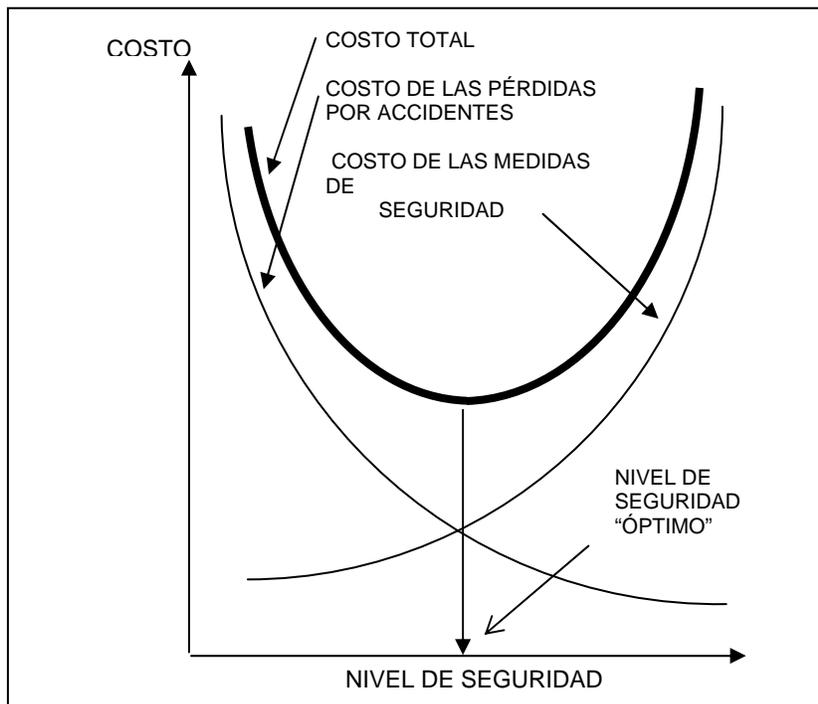


FIGURA 11.3: COSTOS Y BENEFICIOS EN CONTROL DE RIESGOS

Las principales ventajas de utilizar el análisis de riesgo como herramienta en la toma de decisiones, tanto en la fase de diseño como durante la operación, son las siguientes:

- Permite identificar los eventos iniciadores de un potencial accidente, los mecanismos de desarrollo, sus consecuencias y frecuencia de ocurrencia.
- Permite establecer una jerarquía de riesgos y de las prioridades de reducción.
- Permite seleccionar las opciones de reducción con mayor factibilidad de éxito.
- Permite disponer de elementos de análisis sistemáticos, para justificar las decisiones en materia de prevención y seguridad.
- Permite establecer los niveles de confiabilidad de los equipos, maquinarias, sistemas de control, y otros componentes del proceso industrial.
- Permite disponer de una herramienta de apoyo a la formación de los cuadros técnicos, en materias de seguridad.
- Permite anticipar el aumento de los riesgos de accidentes debido a obsolescencia tecnológica, desgaste, cambios en los procesos (ej.: equipos, instrumentación y sistemas de control, distribución física, procedimientos de operación, variables claves), cambios en la estructura orgánica, etc..

En la actualidad, existe amplio consenso acerca de la necesidad de abordar el desafío de mantener un eficiente sistema de gestión de seguridad, como requisito para mantener una operación segura, tal como se discute en el Capítulo 8.

La importancia del análisis de riesgo, en el contexto de un sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional, es evidente. Constituye la herramienta que permite identificar los peligros, cuantificar los riesgos y decidir si estos son tolerables, además de evaluar la efectividad de acciones alternativas para reducir los riesgos.

Todo el personal de una empresa tiene la responsabilidad de conocer los riesgos asociados a su actividad de trabajo. En los países industrializados, esto constituye una obligación legal y tiene como objetivo **prevenir** la ocurrencia de accidentes.

Existen muchos métodos para la evaluación de riesgos, y todos ellos siguen las etapas mencionadas en párrafos anteriores, con diferentes niveles de complejidad en los procedimientos para la identificación de peligros y para la estimación de la probabilidad y las consecuencias. Es importante seleccionar una metodología para evaluación de riesgos, cuyo nivel de complejidad sea coherente con el objetivo que se persigue con el análisis, y con la calidad de la información que esté disponible:

- En una fase inicial del diseño de procesos o del desarrollo de un sistema de gestión de seguridad, se requiere de una evaluación de riesgos que permita establecer aquellos de mayor relevancia, que requieran de acciones para su control. En ese contexto, es suficiente utilizar métodos cualitativos para el análisis preliminar de riesgos.

- En el caso de procesos con altos niveles de riesgo, se puede recurrir a métodos más rigurosos para el cálculo de la probabilidad de ocurrencia de un evento accidental, o utilizar modelos matemáticos para predecir las consecuencias de un accidente (ej.: explosión, incendio, escape de sustancias peligrosas). Estos métodos cuantitativos son más especializados y requieren de mayor información acerca del proceso en estudio.

En las próximas secciones se revisará brevemente los componentes del análisis de riesgo, poniendo énfasis en aquellos aspectos relevantes al análisis preliminar de riesgos. Además, se entrega antecedentes generales sobre los métodos cuantitativos, indicando las referencias que permitan una mayor profundización.

11.3) TÉCNICAS DE IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

La identificación de peligros es una de las etapas fundamentales en el análisis de riesgo. Todos aquellos peligros que no sean debidamente identificados, no serán considerados como objeto de estudio posterior y, por lo tanto, no se tomará medidas para reducir sus riesgos asociados. Las principales preguntas que se deben responder como resultado de la identificación de peligros son:

1. -¿Existe alguna fuente de peligro?
2. -¿Quién o qué puede ser dañado?
3. -¿Cómo puede ocurrir dicho daño?

La identificación y caracterización de los peligros se debe llevar a cabo durante **toda la vida útil** de un proyecto, incluyendo las fases de diseño, construcción, puesta en marcha, operación y cierre de la actividad (abandono o cierre temporal) de la planta.

En la literatura especializada se encuentra diferentes formas de clasificar los peligros. Dichas tipologías constituyen una excelente ayuda en el ejercicio de identificar los peligros potenciales, asociados a las actividades de una industria. Dentro de este contexto, es útil clasificar los peligros de acuerdo a su naturaleza física/química:

- Peligros de fuego y explosión.
- Peligros asociados a materiales tóxicos, corrosivos y reactivos.
- Peligros de naturaleza mecánica.
- Peligros de naturaleza eléctrica.
- Peligros asociados a compuestos radioactivos.
- Peligros asociados a materiales biológicamente activos.

En términos generales, se puede decir que un accidente puede ocurrir cuando alguna forma de energía es liberada de manera no controlada, por ejemplo:

- Energía potencial: Se libera cuando un estanque a presión se rompe, cuando colapsa un edificio, o cuando se produce una avalancha.
- Energía eléctrica: Produce daño cuando un rayo cae sobre personas o instalaciones, o cuando se produce un cortocircuito en un sistema eléctrico.
- Energía cinética: Produce daños en los accidentes de transporte, o debido a la acción de fuertes vientos u olas, durante una tormenta.
- Energía calórica: Produce daños cuando materiales a alta temperatura (agua caliente, metales derretidos) escapan de sus recipientes de contención.
- Energía química: Se libera durante reacciones químicas fuera de control, y en el caso de fuegos y explosiones.
- Energía radiante: En el caso de incendios, se libera luz y calor por radiación; en el caso de fuentes radioactivas, se libera radiación.

Dicha energía puede ser liberada por causas humanas o naturales. Estas últimas no deben ser dejadas de lado, ya que la capacidad destructiva de los eventos naturales, tales como sismos, erupciones volcánicas, avalanchas, tormentas, etc., está fuera de toda duda. A pesar de que sobre ellos no tenemos ningún control, estos eventos deben ser considerados y evaluados en detalle, con el fin de identificar todas las medidas que sean necesarias para minimizar sus consecuencias. Dichas circunstancias juegan un papel determinante en la selección de la ubicación de la planta, y en las medidas de protección a incorporar en el diseño de las instalaciones.

Las circunstancias peligrosas y el tipo de accidentes que podrían tener lugar pueden ser identificadas en base a la información sobre el tipo de materiales y las condiciones de operación. Dichos datos se pueden obtener sin dificultad, ya que forman parte de la información base de cualquier proyecto o actividad industrial.

Las ***circunstancias peligrosas*** en una planta industrial incluyen:

- Almacenamiento de cantidades importantes de sustancias peligrosas.
- Transporte y procesamiento en condiciones de presión y temperatura extremas.
- Transporte y procesamiento de sustancias peligrosas (insumos químicos, productos, subproductos, compuestos intermedios, residuos).
- Reacciones químicas (exotérmicas o endotérmicas), muy sensibles a parámetros del proceso o impurezas (sistemas catalíticos, baja energía de activación, sensibles a pH).
- Sistemas de Alto Voltaje.
- Presencia de sustancias radioactivas.

Sustancias peligrosas son aquellas que, por su cantidad, concentración, o por sus características químicas, físicas o biológicas, pueden afectar la salud humana o producir daños al medio ambiente o a la propiedad.

La Agencia de Protección Ambiental de EEUU (EPA) define una sustancia peligrosa si ella posee alguna de las siguientes características: reactividad, inflamabilidad, corrosividad o toxicidad. Estas características se definen como:

Sustancias reactivas: Son inestables bajo condiciones normales; pueden causar explosiones y/o liberar humos, gases y vapores tóxicos, cuando se mezclan con agua.

Sustancias inflamables: Son aquellas que pueden inflamarse y quemarse (ej.: solventes cuyos vapores se inflaman a menos de 60°C).

Sustancias corrosivas: Incluyen líquidos a pH menor de 2 y mayor de 12,5, y aquellos fluidos que son capaces de corroer los envases metálicos.

Sustancias tóxicas: Son aquellas que producen daños para la salud o son letales cuando se ingieren o absorben.

Las Naciones Unidas clasifican las sustancias peligrosas de acuerdo a sus características de explosividad, inflamabilidad, corrosividad, reactividad y toxicidad, tal como se muestra en la Tabla 11.3.

Dicha clasificación es utilizada en la Guía de Respuestas en Caso de Emergencia, publicada por el Departamento de Transporte de Estados Unidos³. Esta Guía constituye una buena ayuda para el análisis preliminar de peligros asociados a materiales de uso industrial, y puede ser utilizada en conjunto con las Hojas de Datos para las diferentes sustancias presentes en la planta.

³ "Guía de Respuesta en Caso de Emergencia (ERG93)". US Department of Transportation. Washington DC 1993. En Chile, el Decreto Supremo N°298/94 (Reglamento sobre el transporte de cargas peligrosas) incorpora las Normas Chilenas NCh 382/98 y NCh 2.245/93 sobre clasificación de sustancias peligrosas y hojas de datos de seguridad de productos químicos, respectivamente.

**TABLA 11.3: CLASIFICACIÓN DE SUSTANCIAS PELIGROSAS.
NACIONES UNIDAS**

CLASIFICACIÓN	
<ul style="list-style-type: none"> • Clase 1: 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6 	<p>Explosivos</p> <p>Explosivos con peligro de explosión masiva.</p> <p>Explosivos con un peligro de proyección.</p> <p>Explosivos con un peligro predominante de incendio.</p> <p>Explosivos sin ningún peligro significativo de estallido.</p> <p>Explosivos muy insensibles; los agentes explosivos.</p> <p>Sustancias de detonación muy insensibles.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Clase 2: 2.1 2.2 2.3 2.4 	<p>Gases:</p> <p>Gas inflamable.</p> <p>Gas comprimido, no inflamable, no venenoso.</p> <p>Gas venenoso por inhalación.</p> <p>Gas corrosivo.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Clase 3: 	<p>Líquidos Inflamables</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Clase 4: 4.1 4.2 4.3 	<p>Sólidos Inflamables:</p> <p>Sólidos inflamables.</p> <p>Material espontáneamente combustible.</p> <p>Material peligroso cuando entra en contacto con el agua.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Clase 5: 5.1 5.2 	<p>Sustancias Oxidantes</p> <p>Sustancias Oxidantes.</p> <p>Peróxidos orgánicos.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Clase 6: 6.2 6.3 	<p>Sustancias Venenosas y Sustancias Infecciosas</p> <p>Sustancias venenosas.</p> <p>Sustancias infecciosas.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Clase 7 	<p>Sustancias Radiactivas</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Clase 8 	<p>Materiales Corrosivos</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Clase 9: 	<p>Materiales Peligrosos Misceláneos</p>

Existe una amplia gama de métodos utilizados para la identificación de peligros, los que se pueden clasificar como:

TABLA 11.4: MÉTODOS PARA IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

MÉTODOS
<p>1) Métodos Comparativos: Se basan en la experiencia previa acumulada en un sector industrial determinado. Son muy utilizados en análisis preliminar de riesgo. Incluyen:</p> <ul style="list-style-type: none">• Listas de Comprobación• Análisis Histórico de Accidentes• Normas y Códigos de Diseño
<p>2) Métodos Generalizados: Requieren de mayor información acerca del proceso a analizar y constituyen poderosas herramientas para la identificación de peligros y análisis de los riesgos asociados. Generalmente se utilizan en una etapa posterior al análisis de riesgo, cuando se ha seleccionado aquellos que ameritan una evaluación con mayores niveles de detalle. Entre los métodos generalizados destacan⁴ :</p> <ul style="list-style-type: none">• Análisis de Peligro y Operatividad (HAZOP)• Análisis “¿Qué sucedería sí...?” (What if?)• Análisis de modalidades de falla y sus efectos (FMEA)• Análisis de árbol de fallas (FTA)• Análisis de árbol de eventos (ETA)
<p>3) Índices de Riesgos: Estos son métodos directos y simples para estimar y jerarquizar los riesgos asociados a un proceso. En rigor, no son métodos creados para identificar peligros, pero ayudan a seleccionar áreas donde los riesgos son mayores. Utilizan las características de los materiales utilizados (toxicidad, reactividad, volatilidad, etc.), así como la ubicación y disposición de las unidades en la planta. Destacan, entre otros:</p> <ul style="list-style-type: none">• Índice DOW (de Fuego y Explosión)• Índice ICI Mond• Índice de Exposición Química• Índice de Peligro de una Sustancia (SHI)

⁴ Estos métodos se introducen en: Santamaría J.M. y Braña P.A. “Análisis y Reducción de Riesgos en la Industria Química”. Editorial Fundación MAPFRE. Madrid. 1994. Para mayores detalles, se consultar: “Guidelines for Hazard Evaluation Procedures”, Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, AIChE, New York 1990

11.3.1) Métodos Comparativos para la Identificación de Peligros

- Una **lista de comprobación** es una guía que permite revisar un proceso e identificar carencias de seguridad o áreas que requieren un estudio más profundo. Al final de este capítulo se anexa un ejemplo de Lista de Comprobación, compilada en base a la referencia de Santamaría y Braña⁵, que puede ser utilizada para un diagnóstico preliminar del estado de seguridad de una instalación.
- El **análisis histórico de accidentes** utiliza los registros de accidentes que han ocurrido en industrias similares o en procesos comparables. Su ventaja radica en el hecho de que utiliza datos reales sobre accidentes ocurridos; sin embargo, la información disponible es limitada lo que puede representar un serio riesgo. Los datos sobre accidentes se pueden encontrar en los informes publicados por asociaciones industriales, compañías de seguros, agencias gubernamentales, u otros. Algunos bancos de datos de consulta frecuente para accidentes en la industria de procesos son, entre otros: CHAFINC (Chemical Accidents, Failure Incidents and Chemical Hazards Databank), CHI (Chemical Hazards in Industry), HARIS (Hazard and Reliability Information System), NIOSH (National Institute of Occupational Safety and Health), OSHA (Occupational Safety and Health), AIChE (American Institute of Chemical Engineers). En general, dichas bases de datos incluyen información acerca de los tipos de accidente, las circunstancias existentes, la naturaleza y la cantidad de los compuestos involucrados, localización, causas y consecuencias, daños a las personas y a la propiedad, etc.
- Existen **normas legales, códigos y normas de diseño** que fijan requerimientos en relación con aspectos de salud y seguridad ocupacional, y que establecen los lineamientos que fijan la aceptabilidad del diseño de equipos, procesos, sistemas de almacenamiento y transporte de sustancias peligrosas, etc. Cualquier desviación del diseño respecto de lo que se considera una práctica aceptada debe dar origen a un análisis más detallado de tal situación. Algunas de las instituciones que han fijado tales códigos y normas son: ASME (American Society of Mechanical Engineers), API (American Petroleum Institute), NFPA (National Fire Protection Association), INN (Instituto Nacional de Normalización-Chile), BS (British Standard), ANSI (American National Standards Institute), etc.

⁵ Otros textos de consulta recomendados:
Battelle Columbus Division - AIChE / CCPS, "Guidelines for Hazard Evaluation Procedures", AIChE, NY.1987
Crowl D., Louvar J., "Chemical Process Safety, Fundamentals with Applications". Prentice Hall. Englewood.1990

- La identificación preliminar de peligros puede efectuarse con la ayuda de cualquiera de los métodos mencionados aquí. Interesa determinar el tipo y cantidad de sustancias peligrosas almacenadas, transportadas, procesadas y emitidas al ambiente; tipo de equipamiento utilizado, identificando aquellos que utilizan condiciones de temperatura y presión extremas; presencia de reactores químicos o biológicos, y sus condiciones de operación.

11.3.2) Análisis de Peligro y Operatividad (HAZOP)

El **Análisis HAZOP** (Hazard and Operability) permite identificar los peligros asociados a una planta o parte de ella, tanto en la fase de diseño (ingeniería básica e ingeniería de detalle), como durante la operación de la planta (ej.: al introducir modificaciones en los procesos). Generalmente, se utiliza como herramienta en el análisis de riesgo en aquellas unidades u operaciones críticas, donde los accidentes pueden revestir serias consecuencias. Dichas unidades u operaciones se seleccionan a partir de una evaluación preliminar con métodos más sencillos.

Este es un método de identificación de peligros que supone que los problemas de seguridad y operatividad se deben a desviaciones sobre las condiciones “normales” de operación, en un sistema dado y en una etapa determinada (puesta en marcha, operación en régimen estacionario, operación en régimen no estacionario, parada de planta). Se puede aplicar línea a línea o equipo a equipo, en la etapa de diseño o en una planta en operación. El procedimiento general se esquematiza en la Figura 11.3.

Para que el análisis HAZOP sea efectivo se requiere de los diagramas de cañerías e instrumentación (P&I) y de un equipo multidisciplinario que posibilite una evaluación de las consecuencias de cada desviación, desde diferentes puntos de vista.

Se utiliza palabras guía para evaluar en forma sistemática el efecto de anomalías en las acciones (reacciones, transferencia, etc.) o en parámetros específicos (presión, temperatura, concentración, caudal, etc.). La Tabla 11.5 muestra algunos ejemplos de palabras guía de uso frecuente.

Una vez seleccionada una línea de proceso, se define claramente su función; por ejemplo:

- Suministrar vapor a un reactor para evacuar compuestos volátiles inflamables.
- Suministrar refrigerante a un intercambiador de calor.
- Evacuar los gases desde un reactor.
- Alimentar una mezcla de productos a un analizador químico.
- Alimentar combustible a una caldera.
- Descargar una mezcla de reactivos desde un estanque de almacenamiento.

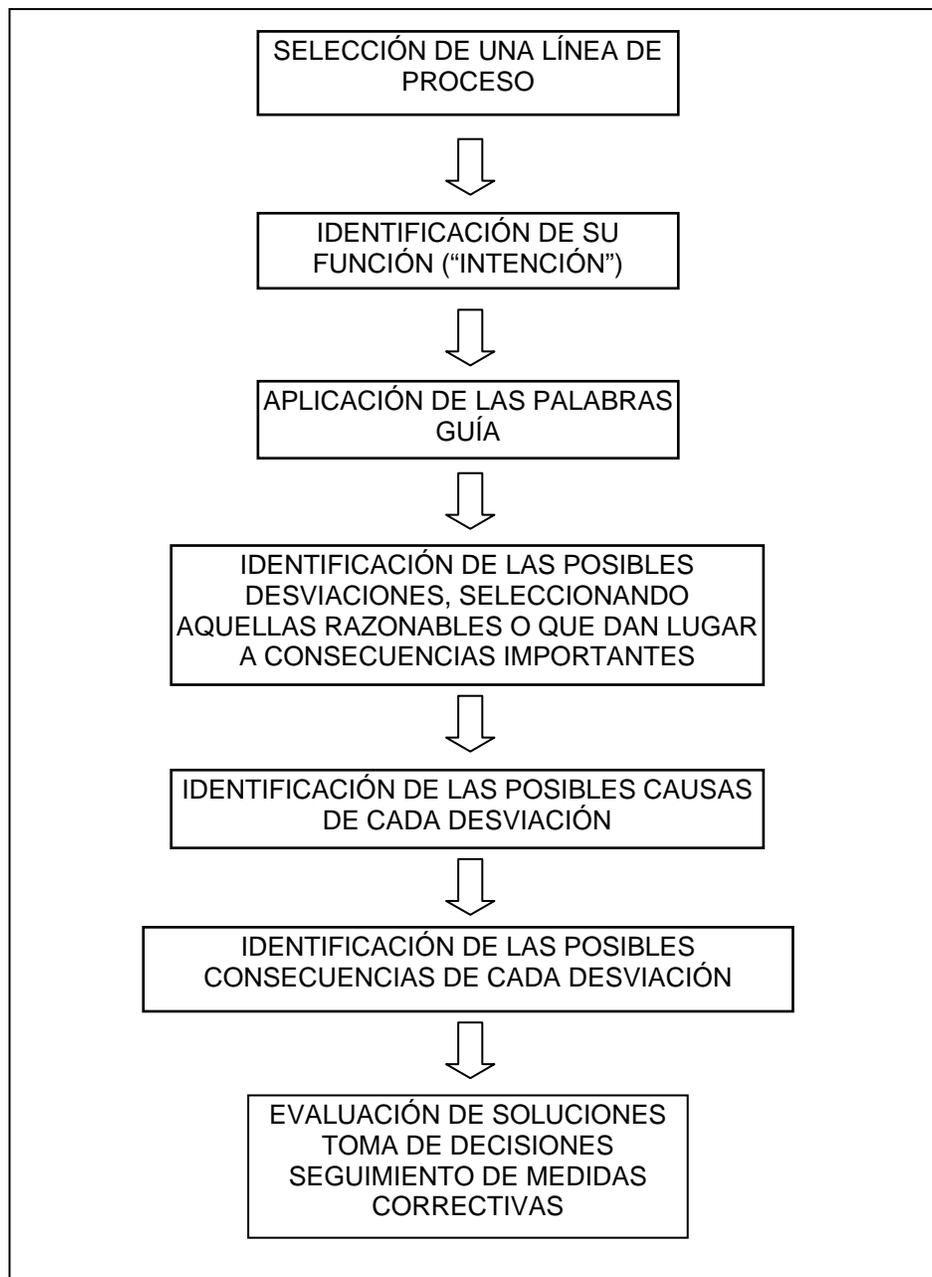


FIGURA 11.4: SECUENCIA DE ANÁLISIS HAZOP

TABLA 11.5: PALABRAS GUÍA DE USO FRECUENTE EN EL ANÁLISIS HAZOP.

PALABRAS GUÍA	PROPÓSITO
NO	No se consigue las intenciones previstas en el diseño. Ejemplo: No hay flujo en una línea; no se abre la válvula de purga.
MÁS / MENOS	Aumentos o disminuciones cuantitativas sobre la intención de diseño. Ejemplo: más presión; menor flujo; mayor concentración, etc..
ADEMÁS DE	Aumento cualitativo. Se cumplen las intenciones de diseño, pero ocurre algo más. Ejemplo: se incluye otro compuesto además del reactivo deseado.
PARTE DE	Disminución cualitativa. Sólo parte de los hechos ocurre de acuerdo a lo previsto. Ejemplo: la composición del sistema es diferente de la prevista.
INVERSIÓN	Se obtiene el efecto contrario al deseado. Ejemplo: el flujo ocurre en sentido inverso; la reacción química se revierte.
EN VEZ DE	No se obtiene el efecto deseado y ocurre algo completamente distinto. Ejemplo: detención imprevista; falla en el modo de operación de una unidad

Se debe identificar desviaciones de esta condición base. Para ello se utiliza palabras guías, tales como las que se muestran en la Tabla 11.5. Cada una de estas desviaciones se evalúa para determinar posibles causas de que ocurra dicha desviación, y se evalúan las consecuencias de tal desviación. En cada caso, se debe señalar las acciones recomendadas para evitar que la desviación ocurra o para evitar que esta desviación tenga consecuencias no deseadas.

Como resultado de este análisis, se obtendrá un conjunto de desviaciones teóricas, cada una de las cuales tiene consecuencias. Algunas de las causas identificadas pueden ser irreales y, por lo tanto, las consecuencias respectivas pueden ser obviadas. En aquellos casos donde las desviaciones provengan de causas factibles, y las consecuencias revistan cierta gravedad, ellas deberán ser evaluadas con mayor detalle para definir acciones de prevención y/o protección.

Una vez que se ha completado el análisis de un componente, se prosigue con el siguiente hasta completar la totalidad de la planta.

El método HAZOP se utiliza frecuentemente en el análisis de riesgo asociado a la

puesta en marcha y detención en la industria química, así como en la evaluación de sistemas de control automático. Es importante señalar que la efectividad de este método depende de la calidad de la información técnica sobre el proceso a evaluar, de la rigurosidad de los diagramas y de la competencia profesional de los que participan en el ejercicio. Este método es más efectivo cuando se lleva a cabo en grupo, con la participación de profesionales especialistas que posean diferentes conocimientos acerca del proceso a analizar.

A modo de ejemplo, se puede considerar el análisis HAZOP de la línea L1 del reactor catalítico para la hidrogenación de acetileno, presentado en la Figura 11.4:

- Función de la línea L1: Alimentar los reactivos al reactor.
- Características: Flujo, composición temperatura, presión.

Por lo tanto, se debe analizar las desviaciones de cada una de las variables que caracterizan a la línea L1. La Tabla 11.6 muestra el resultado que se obtiene al utilizar algunas de las palabras guía para desviaciones en flujo de alimentación y concentración de los reactivos.

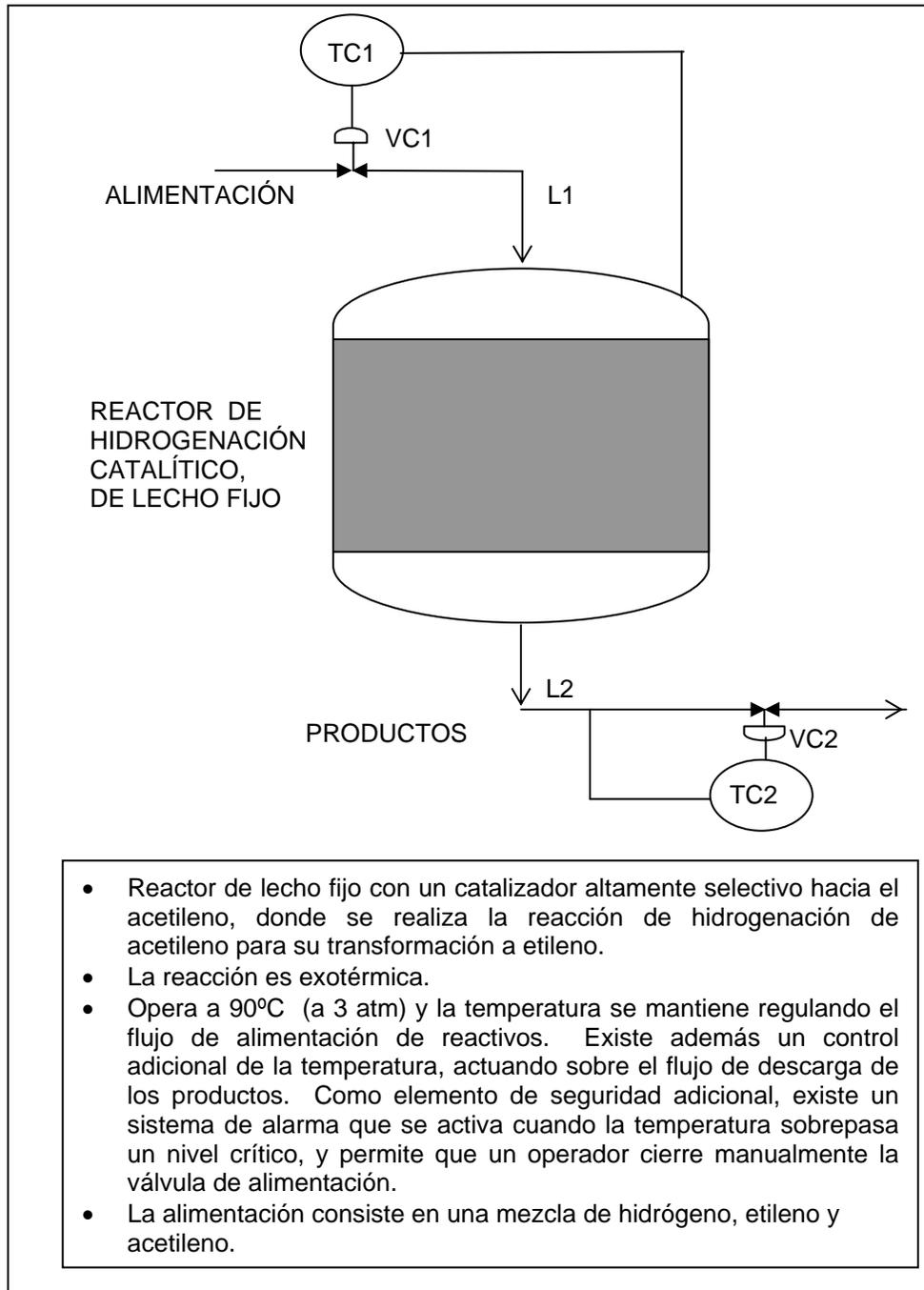


FIGURA 11.5: HIDROGENACIÓN CATALÍTICA DE ACETILENO

TABLA 11.6: ANÁLISIS HAZOP. EJEMPLO FIGURA 11.5, LINEA L1:

DESVIACIÓN	CAUSAS	CONSECUENCIAS	ACCIONES
NO hay flujo en L1	Válvula VC1 falla en cerrado. Sistema de control TC1 falla, cerrando VC1. Bomba de alimentación falla. Acción de control correcta frente a aumento de temperatura en el reactor.	Si no hay flujo en una operación normal, no llegan reactivos al reactor, lo que reduce y, eventualmente, detiene la reacción.	Para evitar pérdidas de producción debido a enfriamiento y detención de la reacción durante la operación normal, se recomienda instalar un sistema de alarma para detectar disminución de temperatura bajo un nivel crítico.
MÁS flujo en L1	Válvula VC1 falla en abierto. Falla sistema de control TC1, dejando VC1 en abierto. Acción de control correcta, frente a una baja de temperatura en el reactor.	Aumenta la temperatura del reactor. Es una consecuencia deseada si ello ocurre como respuesta a una acción de control correcta. Sin embargo, no es deseable si ello ocurre por fallas, ya que el aumento de temperatura puede derivar en daños al reactor o en accidente mayor (explosión, incendio).	Instalar un sistema de alarma para detectar aumento de temperatura sobre un nivel umbral y actuar manualmente.
MAYOR concentración de reactivos	Perturbaciones en procesos anteriores al reactor.	Aumenta la velocidad de reacción, lo que podría derivar en un aumento de la temperatura del reactor si los controladores de temperatura no son efectivos.	Mantener los controladores de temperatura en excelente estado operacional. Instalar un sistema de alarma para detectar un aumento de temperatura sobre umbral crítico y actuar manualmente.

11.3.3) Análisis ¿Qué Sucedería Sí...? (What if?)

El **Análisis ¿Qué sucedería sí...?** permite conducir un examen sistemático de una operación o un proceso en base a preguntas de ese tipo. Es una técnica de gran utilidad para la identificación de peligros.

Este análisis requiere de un completo conocimiento del proceso a evaluar. Se debe preparar una lista de preguntas del tipo ¿Qué sucedería sí...? aplicadas a desviaciones en el diseño, construcción, modificación y operación de la planta.

Las preguntas se realizan sobre aspectos específicos, tales como por ejemplo:

Suministros	¿Qué sucedería si fallase el suministro de agua de enfriamiento? ¿Qué sucedería si fallase el suministro de electricidad? ¿Qué sucedería si fallase el suministro de aire?
Materias primas	¿Qué sucedería si cambiase la composición de la materia prima? ¿Qué sucedería si se interrumpiese la alimentación de materia prima?
Condiciones de operación	¿Qué sucedería si ocurriese un aumento/disminución de la temperatura (o la presión, o el pH)? ¿Qué sucedería si aumentase el flujo de vapor?
Instrumentación y Control	¿Qué sucedería si fallasen los analizadores de gases? ¿Qué sucedería si la válvula de control fallase?
Seguridad eléctrica	¿Qué sucedería si ocurriese un aumento del voltaje de la línea? ¿Qué sucedería si ocurriese un cortocircuito?
Protección contra incendios	¿Qué sucedería si ocurriese un incendio en las bodegas de reactivos?
Almacenamiento	¿Qué sucedería si fallase el sistema de control de nivel del estanque de reactivos?
Manejo de Materiales	¿Qué sucedería si ocurriese un escape del producto a la atmósfera? ¿Qué sucedería si ocurriese un derrame durante la descarga de combustible?
Tratamiento de residuos	¿Qué sucedería si se interrumpiese el suministro eléctrico a los aireadores del biorreactor? ¿Qué sucedería si fallase el precipitador electrostático?

A pesar de ser un método aparentemente sencillo, requiere de bastante preparación y comprensión del proceso. Al igual que en el caso del método HAZOP, la calidad de las respuestas depende de los niveles de conocimiento sobre los fenómenos involucrados, las respuestas esperadas frente a perturbaciones en las variables claves, las relaciones causa-efecto, etc.

11.3.4) Análisis de Modalidades de Falla y sus Efectos

El **Análisis de Modalidades de Falla y sus Efectos** (FMEA, Failure Modes and Effects Analysis) consiste en un examen de componentes individuales para evaluar el efecto de su falla sobre el comportamiento del sistema. Este análisis es sistemático y requiere de un detallado conocimiento del proceso a evaluar. Es utilizado con bastante frecuencia en la industria de procesos.

En el contexto de este análisis, una modalidad de falla de un componente puede identificarse como:

- Una pérdida de función del componente (deja de actuar).
- Una función prematura (actúa prematuramente, antes de que se le requiera).
- Función fuera de tolerancia, o falla, o característica física no deseada.

En el FMEA todos los modos conocidos de falla se consideran uno a uno, y las consecuencias de cada falla son evaluadas y anotadas.

Se lleva a cabo en equipo y requiere información detallada sobre el sistema a evaluar (ej.: diagramas P&I, diagramas eléctricos, procedimientos de operación, diagramas de lógica instrumental, información sobre los sistemas de control, diagramas de suministros). Dicha información debe ser estudiada a fondo, de modo que cada uno de los participantes tenga una clara visión de la naturaleza de las operaciones para cada componente, de las características del diseño y sus interacciones con el sistema del cual forma parte.

El análisis comienza con la definición del sistema y sus características. Ello implica definir claramente los límites del sistema a abordar:

- Si el estudio se lleva a cabo a nivel de toda una planta, el análisis de modalidades de falla y sus efectos debe enfocarse sobre los sistemas individuales (ej.: sistema de alimentación, sistema de separación, sistema de tratamiento de efluentes, etc.).
- Si el estudio se realiza a nivel de sistema o subsistema, el análisis de modalidades de falla se enfoca sobre los equipos individuales (ej.: bomba de alimentación, sensor de temperatura, alarma, válvula de control del circuito de refrigeración, etc.).

El paso siguiente consiste en identificar todos los modos de falla relevantes y los efectos que producen. Por ejemplo, una bomba que normalmente está operando puede tener los siguientes modos de fallo:

- Fallar en encendido (no se detiene al dar la señal de detención).
- Fallar y detenerse.
- Presentar fugas a través de los cierres hidráulicos.
- Presentar fugas a través de la carcasa.

Cada uno de estos modos de falla tiene consecuencias diferentes. Más aún, se debe investigar los sistemas de detección de fallos que existen y evaluar su relevancia para cada caso. Una extensión de este método considera la utilización de un índice de gravedad, que permita clasificar los diferentes escenarios, de acuerdo a la seriedad de sus consecuencias. En dicho caso, se utiliza un índice de gravedad entre 1 y 4:

- 1: Sin efectos adversos.
- 2: Efectos menores que no requieren detención de la operación.
- 3: Efectos importantes que requieren detención normal.
- 4: Peligro inmediato para el personal e instalaciones, parada de emergencia.

Con la información obtenida es posible proponer medidas correctivas en el diseño, para aquellos casos en que el modo de falla da origen a efectos importantes. En los casos de fallas graves se debe asegurar un sistema de detección directo de éstas.

A modo de ejemplo, se presenta a continuación parte del análisis de modo de falla para la válvula VC1 del ejemplo de la Figura 11.5.

ANÁLISIS DE MODO DE FALLA PARA LA VÁLVULA VC1

MODO DE FALLA	MÉTODO DE DETECCIÓN	EFECTOS	GRAVEDAD
VC1 falla en cerrado	No tiene.	Se corta alimentación al reactor. El control TC2 responderá reduciendo la salida de los productos. Si ello es insuficiente, se detiene la reacción, con pérdidas de producción.	3
VC1 falla en abierto	No tiene. La alarma por aumento de temperatura permite detectar el efecto, pero no la causa del problema.	Mantiene la alimentación al reactor. Resulta en aumento de temperatura. El sistema de control TC2 debe responder aumentando el flujo de salida, para reducir la presión del reactor. Además, si la temperatura sube demasiado se activa el sistema de alarma, lo que permite cerrar manualmente la válvula VC1. Si ello no es posible o es insuficiente, ocurre daño grave al reactor.	4
VC1 abre cuando se requiere cerrar	No tiene. La alarma por aumento de temperatura permite detectar el efecto, pero no la causa del problema.	No reduce la alimentación cuando se requiere. Consecuencias similares a la falla anterior.	4
VC1 cierra cuando se requiere abrir.	No tiene.	No aumenta la alimentación cuando se requiere. Baja la temperatura del reactor. El control TC2 responderá reduciendo la salida de los productos. Si ello es insuficiente, la reacción se detiene, con pérdida de producción.	3
VC1 presenta fugas de fluido a través de sellos.	No tiene.	Escape de gases peligrosos. No hay acción de control asociada. Peligro grave de fuego/explosión.	4

11.3.5) Análisis de Árbol de Fallas

El Análisis de Árbol de Fallas (FTA, Fault Tree Analysis) supone que un evento no deseado (accidente o desviación peligrosa) ya ha ocurrido, y busca las causas del mismo y la cadena de eventos que hicieron que tuviera lugar.

De este modo, se supone que el accidente ha ocurrido, y se analiza hacia atrás su posible evolución, hasta llegar a las causas primarias. El accidente se descompone en sus elementos contribuyentes, identificando los errores humanos, fallos de equipos e instrumentos, eventos externos, etc. (ver Tabla 11.7), utilizando toda la información detallada que se tenga con relación al sistema analizado. El resultado de este análisis es una representación lógica en la que aparecen cadenas de eventos capaces de generar el evento no deseado.

Algunos de los componentes típicos de un análisis de árboles de falla son:

- **Evento no deseado:** Es el accidente o desviación peligrosa en la que se basa el análisis. Por ejemplo, un aumento de temperatura al interior de un reactor catalítico exotérmico.
- **Eventos básicos:** Representan las causas primarias que dan origen al evento no deseado. Por ejemplo, falla del sensor de temperatura, falla en la válvula de control, cambio en la composición de la alimentación.
- **Eventos intermedios:** Resultan de la interacción de otros eventos y, a su vez, dan origen a eventos posteriores. Por ejemplo, reducción en el flujo de alimentación del refrigerante.
- **Eventos no desarrollados:** No son eventos básicos, y podrían desarrollarse más, pero no se considera necesario, o no se dispone de información suficiente.
- **Puertas O:** Representan la operación lógica que requiere la ocurrencia de uno o más de los eventos de entrada para producir un evento de salida. Por ejemplo, la falla en el cerrado de la válvula de alimentación de refrigerante o la detención accidental de la bomba de alimentación del refrigerante, producen como respuesta la reducción/cese de la alimentación de refrigerante.
- **Puertas Y:** Representan la operación lógica que requiere de la ocurrencia de todos los eventos de entrada para producir el evento de salida. Por ejemplo, la temperatura del reactor aumenta fuera de control cuando los siguientes eventos ocurren simultáneamente: falla del sistema de descarga de emergencia del contenido del reactor, y falla de la alimentación de refrigerante, y falla en abierto de la válvula de alimentación de reactivos al reactor.

Este método se utiliza, en primer lugar, para fines de identificación de peligros, pero se usa también en la cuantificación de riesgos (estimación de la probabilidad de ocurrencia).

Ejemplo

A modo de ilustración, la Figura 11.6 muestra los resultados de un análisis de árbol de fallas, aplicado al reactor de la Figura 11.5; se evalúa las causas del daño al reactor debido a un aumento de la temperatura sobre su umbral crítico.

¿Cuáles son los eventos que conducen a este evento culminante?

De acuerdo con el diseño, la temperatura del reactor se regula controlando la velocidad de la reacción exotérmica, actuando sobre el flujo de alimentación al reactor.

Los elementos relevantes que componen este sistema son:

- Válvula de alimentación de reactivos (VC1).
- Controlador de la válvula (TC1), incluyendo el sensor de temperatura y el sistema de transmisión de la señal.
- Válvula de descarga de los productos de reacción (VC2).
- Controlador de la temperatura de la descarga (TC2).
- Sistema de alarma y de control manual: un operador supervisa la unidad y tiene la opción de cerrar manualmente la válvula de alimentación si se activa una alarma que detecta el aumento de temperatura más allá de un nivel crítico.

La falla de cada uno de ellos tiene algún efecto sobre la temperatura en el reactor. Un análisis preliminar del sistema demuestra que la temperatura del reactor puede aumentar debido a:

1. Incremento de la velocidad de reacción. Ello ocurre cuando:
 - Aumenta la temperatura en la zona de reacción (existe una relación exponencial entre temperatura y velocidad de reacción), y/o
 - Aumenta la concentración de los reactivos limitantes en la zona de reacción, y/o
 - Aumenta la presión al interior del reactor.
2. Los reactivos permanecen al interior del reactor aún cuando se ha detenido el flujo de alimentación, por lo que la reacción continúa liberando calor hasta agotar los reactivos residuales.

La concentración de reactivos en la zona de reacción puede ocurrir debido a cambios en la composición de la alimentación. En todo caso, un correcto funcionamiento de la válvula de control de la alimentación debería reducir el flujo de entrada para compensar el incremento de la composición. Además, existe el control de temperatura a través de la válvula de descarga de productos, la cual incrementa el flujo de salida en caso de que la temperatura tienda a aumentar sobre el punto de referencia. El control manual debería ser capaz de resolver cualquier falla de estos dos sistemas de control. En operación normal tanto VC1

como VC2 se mantienen abiertas.

La presión al interior del reactor puede aumentar como consecuencia del aumento de la temperatura en el reactor. La presión y la temperatura aumentarían si la válvula de salida de los productos (VC2) se cierra, mientras la válvula de alimentación (VC1) se mantiene abierta.

El árbol de fallas que se puede obtener a partir del análisis de los eventos que dan origen a daños en el reactor debidos a un aumento de su temperatura, se muestra en la Figura 11.7. Allí se obtiene eventos (fallas) básicos:

- La válvula VC1 falla en posición abierta.
- El controlador TC1 falla. Aquí se puede seguir desarrollando el evento, para diferenciar que tal falla puede ser consecuencia de una falla del sensor, del sistema de transmisión, del comparador, o de otro elemento del hardware.
- Falla del sistema de alarma. Se puede deber a falla en cualquiera de los elementos que componen el sistema.
- Falla humana: el operador no cierra VC1, a pesar de oír la alarma.
- La válvula VC2 falla en posición cerrada.
- El controlador de VC2 falla. Corresponden las mismas consideraciones que para el caso del controlador TC1.

Se observa que el daño al reactor se puede verificar por la ocurrencia simultánea de una falla en ambas válvulas. Como eventos básicos se identifican 6 posibles fallas, todas las cuales pueden dar origen a nuevos árboles de fallas.

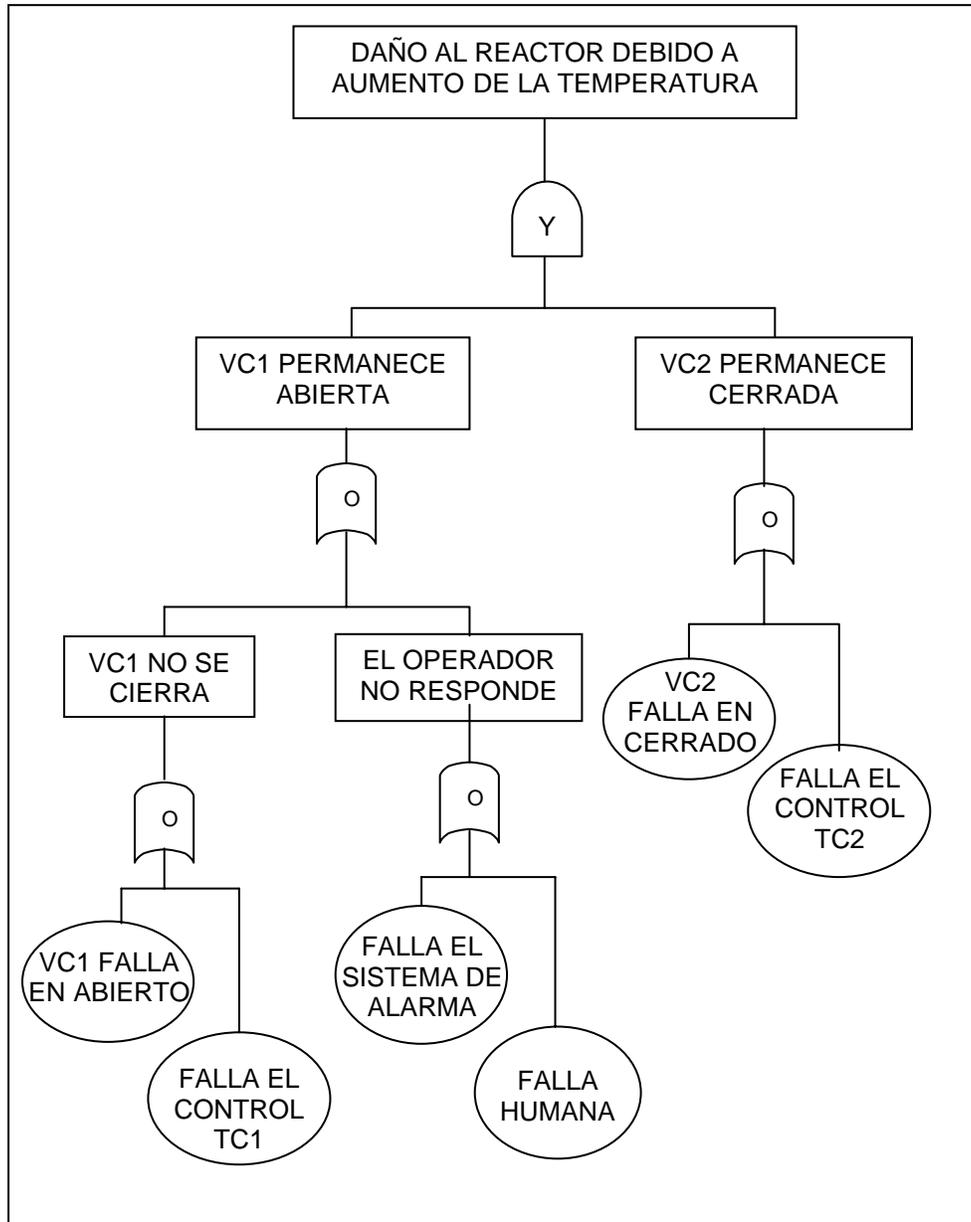


FIGURA 11.6: ÁRBOL DE FALLA PARA REACTOR DE LA FIGURA 11.5

11.3.6) Análisis del Árbol de Eventos

El **Análisis del Árbol de Eventos** (ETA, Event Tree Analysis) evalúa las consecuencias que tienen lugar a partir de un evento determinado. Hace énfasis en un evento inicial que ya ha ocurrido y se construye un árbol lógico que evoluciona hacia un efecto final. El evento iniciador puede ser cualquier desviación importante provocada por la falla de un equipo o por error humano. Al igual que el FTA y el FMEA, este método se utiliza para cuantificación de riesgos (estimación de la probabilidad de ocurrencia).

El análisis de árbol de eventos se desarrolla de acuerdo con el siguiente esquema:

- **Identificación de eventos iniciadores relevantes:** Éstos pueden ser cualquier desviación importante, provocada por una falla de equipo o por un error humano. Las consecuencias de tal evento iniciador pueden variar de acuerdo a las medidas de seguridad implícitas en el sistema, la respuesta de los operadores, u otras circunstancias presentes en el instante de ocurrencia del evento iniciador. Es importante seleccionar el evento iniciador a una distancia no muy cercana al accidente final. Por ejemplo, se puede suponer como iniciador una insuficiencia en el sistema de refrigeración del reactor exotérmico (lo que eventualmente podría derivar en una explosión).
- **Identificación de las funciones de seguridad diseñadas para responder al evento iniciador.** Estas medidas son altamente relevantes ya que su función es evitar la propagación del evento iniciador. Por ejemplo, los sistemas de control pueden tener contemplada la detención del flujo de alimentación al reactor ante un aumento de la temperatura, sistemas de alivio de presión, inyección de supresores de explosión, etc., que eviten una respuesta catastrófica del sistema.
- **Construcción del árbol de eventos:** Una vez completadas las dos etapas anteriores, se debe hacer el seguimiento de los eventos hasta los efectos finales.
- **Descripción de las cadenas de eventos resultantes.**

Estas últimas etapas son muy importantes cuando este método se utiliza en el contexto de la cuantificación de riesgos, ya que permiten estimar la probabilidad de ocurrencia de cada uno de los cursos de acción, así como sus consecuencias.

En los métodos de identificación de peligros mencionados anteriormente, se trabaja con escenarios posibles para cada equipo o unidad de proceso. Es importante, por lo tanto, establecer algunos criterios básicos para discriminar acerca de la factibilidad o credibilidad de un escenario determinado.

Generalmente se reconoce los siguientes criterios:

1. Todos los eventos **individuales** que pueden suceder, son escenarios creíbles.

Ejemplo

Que se bloquee en posición cerrada la válvula de alimentación a un reactor.
Que un operario cometa un error.
Que falle un sensor de pH.

2. Aquellos que requieren de la **ocurrencia simultánea** de dos o más hechos **independientes** no son escenarios creíbles.

Ejemplo

Que fallen simultáneamente dos sistemas de refrigeración alternativos.
Que fallen simultáneamente las dos bombas de alimentación alternativas.
Que fallen simultáneamente los dos operadores encargados del control manual de un proceso.

3. Los escenarios que requieren una **secuencia** de más de dos hechos **independientes** no son creíbles.

Ejemplo

Que falle el sistema de alarma contra incendios, que se bloquee el acceso del carro lanza agua y luego, que falle el suministro de agua.

No sólo es importante identificar el peligro potencial, sino que se debe estudiar los mecanismos o secuencias de eventos que dan lugar al accidente. En general, entre el evento iniciador y el accidente, se encuentra una secuencia de hechos que tienden a propagar y/o evitar el accidente. Dichos mecanismos de propagación y las acciones mitigantes (ej.: respuesta por parte de los operadores y de los sistemas de control de accidentes) se esquematizan en la Tabla 11.7.

La secuencia mostrada en la Tabla 11.7 puede ser utilizada como herramienta para identificar los eventos que tienen lugar desde el evento iniciador hasta la materialización del accidente.

TABLA 11.7: SECUENCIA TÍPICA DE UN ACCIDENTE

CIRCUNSTANCIAS PELIGROSAS	EVENTOS INICIADORES	CIRCUNSTANCIAS PROPAGADORAS	CIRCUNSTANCIAS MITIGANTES	ACCIDENTE
<p>Almacenamiento de cantidades importantes de sustancias peligrosas (materiales inflamables, combustibles, inestables, tóxicos. Materiales a condiciones de presión y temperatura extremas)</p> <p>Materiales altamente reactivos (insumos químicos, productos, subproductos, compuestos intermedios)</p> <p>Reacciones químicas (exotérmicas, endotérmicas) muy sensibles a parámetros del proceso o impurezas (sistemas catalíticos, baja energía de activación, sensible a pH)</p> <p>Alto Voltaje</p> <p>Radiaciones</p>	<p>Falla de equipo de proceso y maquinarias (bombas, válvulas, instrumentos, sensores)</p> <p>Fallas de sistemas de contención (cañerías, uniones, sellos, tanques de almacenamiento, recipientes)</p> <p>Errores humanos (operación, revisiones, mantenimiento)</p> <p>Pérdida de servicios (agua, electricidad, aire comprimido, vapor)</p> <p>Agentes externos (sismos, inundaciones, tormentas, vientos, impactos, atentados)</p> <p>Errores de información o de procedimiento</p>	<p>Desviaciones en parámetros de proceso (P, T, flujos, concentraciones)</p> <p>Fallas de contención (cañerías, sellos, uniones, fuelles, recipientes, tanques de almacenamiento, venteos)</p> <p>Emisiones de materiales peligrosos</p> <p>Ignición / explosión</p> <p>Errores humanos</p> <p>Agentes externos (sismos, tormentas, vientos, inundaciones, impactos, atentados)</p> <p>Errores de información o de procedimiento</p>	<p>Respuestas de seguridad (válvulas de alivio, servicios de reserva, sistemas o componentes redundantes)</p> <p>Mitigación (venteos, antorchas, rociadores)</p> <p>Operaciones de emergencia (alarmas, procedimientos de emergencia, equipos de protección personal, evacuación)</p> <p>Respuestas de control y de los operadores</p> <p>Flujo adecuado de información</p> <p>Agentes externos</p>	<p>Incendios</p> <p>Explosiones</p> <p>Impactos</p> <p>Fuga y dispersión de materiales peligrosos (compuestos tóxicos o de alta reactividad)</p>

11.3.7) Índices de Riesgo: Índice Dow de Fuego y Explosión (IFE)

El **Índice DOW de Fuego y Explosión** (IFE) permite jerarquizar los riesgos asociados a incendios y explosiones, de diferentes unidades. El método se puede aplicar tanto a unidades individuales (ej.: bomba, compresor, tanque de almacenamiento, reactor), como a agrupaciones de unidades de proceso que representen una clara unidad funcional. Las unidades se seleccionan de acuerdo a su impacto potencial, debido al tipo de materiales que procesan, la cantidad de compuestos peligrosos (presión, temperatura, pH), historial de problemas de seguridad, etc.. El Índice Dow se calcula para todas las unidades pertinentes, a partir de factores que reflejan las características de los materiales utilizados y de las condiciones del proceso: el *factor de material* y el *factor de riesgo*:

$$\text{Índice DOW de Fuego y Explosión} = (\text{Factor de Material}) \times (\text{Factor de Riesgo})$$

Factor de material: Éste es un número comprendido entre 1 y 40, asignado a un compuesto, de acuerdo a su potencial intrínseco para liberar energía en un incendio o en una explosión. Estos parámetros incluyen: calor de reacción (combustión), índices de reactividad química, índices de peligrosidad para la salud, inflamabilidad, punto de destello (*flash*), y temperatura de ebullición. La Tabla 11.8 ilustra algunos valores de factores de materiales (FM) para compuestos típicos:

TABLA 11.8: FACTOR DE MATERIAL PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DOW

COMPUESTO	FM	COMPUESTO	FM
Acetaldehído	24	Etileno	24
Acido acético	14	Etilenglicol	4
Acetona	16	Formaldehído	24
Acetileno	40	Gasolina	16
Acroleína	24	Glicerina	4
Amoníaco	4	Fenol	4
Benceno	21	Hidrógeno	21
n-Buteno	21	Isopropanol	16
Cloro	1	Metano	21
Cloroformo	1	Metanol	16
Ciclohexano	16	Monóxido de Carbono	16
Dimetilamina	21	Piridina	24
Estireno	24	Propano	21
Etano	21	Tolueno	16
Etanol	16	Trietilamina	16
Etanolamina	4	Xileno	16

Factor de riesgo de la unidad: Es un número entre 1 y 8, calculado como el producto de dos factores de riesgo:

- **Riesgos generales del proceso** (considera la presencia de reacciones exotérmicas o la realización de carga y descarga).
- **Riesgos especiales del proceso** (ej.: la operación cerca del intervalo de inflamabilidad o a presiones distintas de la atmosférica).

Estos factores son asignados como penalidades, de acuerdo a los criterios señalados en la guía Dow⁶ y resumidos en la Tabla 11.9, siguiente:

TABLA 11.9: CÁLCULO DEL FACTOR DE RIESGO DE LA UNIDAD

CÁLCULO DEL FACTOR DE RIESGO DE LA UNIDAD	PENALIZACIÓN
Riesgos Generales de Proceso:	
• Valor Base	1,00
• Reacciones químicas exotérmicas	0,30 – 1,25
• Procesos endotérmicos	0,20 – 0,40
• Manejo y conducción de productos	0,25 – 1,05
• Unidades encerradas o cubiertas	0,25 – 0,90
• Accesos	0,35
• Drenajes y control de derrames	0,25 – 0,50
Riesgos especiales del proceso:	
• Valor base	1,0
• Materiales tóxicos	0,20 – 0,80
• Presión subatmosférica (<500 mm Hg)	0,50
• Operación cerca del límite de inflamabilidad:	
Tanques de almacenamiento de líquidos inflamables	0,50
Problema de proceso o falla de purga	0,30
Siempre en el intervalo de inflamabilidad	0,80
• Explosión de polvo	0,25 – 2,00
• Presión	ver guía Dow
• Baja temperatura	0,20 – 0,30
• Cantidad de productos inflamables: Sólidos, líquidos, gases y productos reactivos en proceso, o en almacenamiento.	ver guía Dow
• Corrosión y erosión	0,10 – 0,75
• Fugas, juntas y cierres	0,10 – 1,50
• Uso de calentadores con llama	ver guía Dow
• Sistemas de aceite térmico	0,15 – 1,15
• Equipo rotativo	0,50

⁶ Dow Chemical Company – AIChE; “Dow’s Fire and Explosion Index Hazard Classification Guide”, 6^a ed., AIChE, New York (1987)

El IFE es un valor entre 1 y 320 permite estimar el área de exposición y el máximo daño probable a la propiedad debido al incendio o explosión. El área de exposición es un círculo ideal, en cuyo interior se manifestarían los efectos destructivos, derivados de una explosión o un incendio de la unidad de proceso evaluada. El radio de este círculo se calcula como:

$$\text{Radio (m)} = 0,256 \times \text{IFE}$$

Para mayor información, se recomienda consultar directamente en la literatura publicada por Dow Chemicals, donde se actualiza los diferentes valores en forma periódica. Este método puede ser de mucha ayuda en la estimación de las consecuencias derivadas de la explosión o incendio de una instalación química.

Para ilustrar el método consideremos el almacenamiento de 25.000 toneladas de etileno líquido en un estanque refrigerado (menores que -103,8) a presión atmosférica.

- Factor de material para el etileno (Tabla 11.8) = 24
- Riesgos Generales (Tabla 11.9) = 1,5
 - Valor de base (1,0)
 - No se tiene reacciones químicas exotérmicas o endotérmicas
 - No hay manejo o conducción de productos
 - Unidad cubierta (penalización 0,25)
 - Se considera que no hay problemas de acceso
 - Se tiene control de derrames (penalización 0,25)
- Riesgos Especiales del Proceso (Tabla 11.9) = 4,0
 - Valor base (1,0)
 - Materiales tóxicos (0,2)
 - No trabaja a vacío
 - Operación cerca del límite de inflamabilidad (0,5)
 - No procede penalizar por explosión de polvo.
 - Para presión atmosférica (por tratarse de un gas inflamable licuado), se recomienda una penalización de 0,2
 - No cabe penalizar por baja temperatura, ya que se supone un estanque con materiales apropiados.
 - Cantidad de materiales inflamables. La guía Dow recomienda una penalización de 2 para este caso.
 - Se considera una corrosión mínima (0,1)
 - El resto de los ítemes no se consideran relevantes en este ejemplo.

Factor de Riesgo de la Unidad	=	1,5 x 4,0	=	6
Indice de Fuego y Explosión	=	24 x 6,0	=	144
Radio del área de exposición	=	144 x 0,256	=	37 metros

11.4) ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS

Las consecuencias de un accidente son difíciles de predecir con exactitud, ya que dependen de las circunstancias específicas que rodean al evento. Los métodos para predecir las consecuencias de un accidente varían en nivel de complejidad y precisión. En términos generales, las consecuencias de un incendio, una explosión, el derrame de líquidos, una fuga de gases peligrosos, una descarga eléctrica, u otro accidente, dependen principalmente de:

- La naturaleza y cantidad de energía liberada.
- La naturaleza y cantidad de sustancias peligrosas liberadas.
- Presencia de otras circunstancias peligrosas en el área afectada.
- Tipo y velocidad de la respuesta después de la ocurrencia del accidente.
- Las condiciones ambientales locales (ej.: condiciones meteorológicas, sistema hidrológico local).
- La extensión territorial afectada.
- El número de personas expuestas y su nivel de vulnerabilidad.
- Las características de los bienes en el área expuesta y su nivel de vulnerabilidad.

Para lograr una completa evaluación de las consecuencias, se requiere información en detalle de cada uno de estos elementos. Más aún, se necesita utilizar modelos que permitan predecir el transporte de las sustancias y de la energía liberada. Esto último es materia que requiere un mayor nivel de especialización acerca de los tipos de modelo disponibles. No es el objetivo de este texto profundizar en este tema, por lo que se entregarán las referencias bibliográficas que puedan servir de fuente de información para estudios más detallados.

A continuación, se presenta algunos criterios para determinar las consecuencias derivadas de un accidente, con vistas a un análisis preliminar.

11.4.1) Análisis Preliminar de Consecuencias

En general, un análisis riguroso de las consecuencias requiere de información precisa acerca de las circunstancias del potencial accidente. Es conveniente, en una primera aproximación, obtener una estimación preliminar con vistas a identificar aquellos casos con mayores consecuencias previsibles.

Uno de los métodos más sencillos consiste en establecer las consecuencias (severidad del daño) en base a criterios que consideren el daño potencial a la salud de las personas, propiedad, medio ambiente, imagen de la empresa, u otro aspecto que se considere valioso por parte de quienes llevan a cabo el análisis.

A continuación se presenta tres ejemplos representativos de categorización de consecuencias, para su utilización en análisis preliminares. El método mostrado en BS 8800 valora el daño a las personas, en base a las partes del cuerpo potencialmente afectadas y a la naturaleza del daño. Por su parte, el método propuesto por Zürich Insurance incluye también los criterios de daño a la propiedad y a la imagen de la empresa. Por último, el método propuesto por UNEP incluye los daños a la salud de las personas, medio ambiente y a la propiedad.

MÉTODO ILUSTRADO EN BS 8800⁷

SEVERIDAD DEL DAÑO	CRITERIOS
Daño Leve	Heridas superficiales, cortes menores, irritación ocular, dolor de cabeza, molestias menores.
Daño Moderado	Laceraciones, quemaduras moderadas, fracturas menores, problemas de audición, dermatitis.
Daño Extremo	Amputación, mutilación, fracturas mayores, envenenamiento, ceguera, heridas múltiples, heridas fatales, enfermedades fatales.

MÉTODO ZÜRICH⁸

SEVERIDAD DEL DAÑO	CRITERIOS
Daño Insignificante	Lesiones menores, pérdida menor de imagen a la empresa, daño menor a la propiedad.
Daño Marginal	Lesiones, pérdida temporal de imagen, pérdida económica menor.
Daño Crítico	Lesiones severas con incapacidad parcial, pérdida considerable de imagen, considerable pérdida económica.
Daño Catastrófico	Muerte, incapacidad total, gran pérdida de imagen, grandes pérdidas económicas.

⁷ British Standard, "Guide to Occupational Health and Safety Management Systems", BSI. Londres (1996)

⁸ Zogg H.A., "Zürich Hazard Analysis", Zürich Insurance Company, Zürich, Suiza (1987)

MÉTODO UNEP⁹:

CONSECUENCIAS PARA LAS PERSONAS	CRITERIOS
Daño Insignificante	Molestias menores
Daño Limitado	Heridas menores
Daño Serio	Algunas heridas serias, molestias mayores
Daño Muy Serio	Muertes (<5), varios heridos (<20), evacuación (<500)
Daño Catastrófico	Varias muertes (>5), cientos de heridos y evacuados (>500)
CONSECUENCIAS PARA EL MEDIO AMBIENTE	CRITERIOS
Daño Insignificante	Efectos locales, no producen contaminación
Daño Limitado	Efectos locales, producen contaminación simple
Daño Serio	Efectos regionales, contaminación simple
Daño Muy Serio	Efectos locales, contaminación seria
Daño Catastrófico	Efectos regionales, contaminación seria
CONSECUENCIAS PARA LA PROPIEDAD	CRITERIOS
Daño Insignificante	Daños menores de US\$ 500.000
Daño Limitado	US\$500.000 – 1.000.000
Daño Serio	US\$1.000.000 – 5.000.000
Daño Muy Serio	US\$5.000.000 – 20.000.000
Daño Catastrófico	Daños mayores de US\$20.000.000

En algunos casos, estas categorías de daños se pueden asociar a una escala numérica relativa, por ejemplo:

1	Daño Insignificante
2	Daño Limitado
3	Daño Serio
4	Daño Muy Serio
5	Daño Catastrófico

Los ejemplos mostrados anteriormente son ilustrativos de las diferentes opciones para clasificar los daños con vistas a un análisis de consecuencias. Es importante seleccionar o desarrollar una clasificación de consecuencias que se acomode a la situación particular a evaluar.

⁹ UNEP, "Hazard Identification and Evaluation in a Local Community", Technical Report N° 12, United Nations Environment Programme, UN Publications, Paris (1992)

11.4.2) Análisis de Consecuencias: Casos Específicos

Los incendios, las explosiones y las emisiones de sustancias tóxicas constituyen los accidentes más frecuentes y destructivos de la industria de procesos.

Desde el punto de vista del análisis de riesgo, la evaluación de consecuencias requiere que se conozcan las circunstancias específicas que rodean al escenario en que ocurre el evento. Su enfoque cuantitativo es complejo y requiere de modelos matemáticos para predecir los efectos de estos accidentes. Dado su alto nivel de especialización, estos modelos no serán abordados aquí y se recomienda al lector interesado consultar la referencia de Santamaría y Braña, mencionada en secciones anteriores.

A continuación, se presenta las principales características asociadas a los accidentes debido a incendios, explosiones y emisiones de compuestos tóxicos.

a) Incendios

La combustión es un proceso de oxidación química que libera calor. El fuego es una consecuencia visible de este proceso en ciertas circunstancias. En general, la combustión convencional ocurre en la fase vapor, lo que significa que los líquidos deben evaporarse o los sólidos descomponerse en sustancias volátiles, antes de entrar en combustión. Es frecuente que un incendio derive rápidamente en una explosión.

De acuerdo a datos citados por Santamaría y Braña (1994), los materiales inflamados con mayor frecuencia en incendios industriales son: madera o papel (27,9%), líquidos inflamables o combustibles (22,1%), sustancias químicas, metales o plásticos (15,7%), textiles (19,3%), productos naturales (9,6%), gas (6,4%), sólidos volátiles (5,4%), y materiales aceitosos (2,2%).

Para estimar las consecuencias de un incendio se requiere conocer la cantidad de material inflamable involucrado, sus características de inflamabilidad y las condiciones que rodean el evento.

Aparte de la energía calórica liberada, la generación de humos y gases tóxicos representa un importante peligro asociado, ya que estos pueden ser transportados por el viento a distancias considerables. Entre los gases liberados durante los incendios industriales, el monóxido de carbono es el que reviste el mayor peligro inmediato, debido a su alto nivel de toxicidad y explosividad. También se generan importantes cantidades de cianuro de hidrógeno (ej. en la combustión de productos sintéticos, tales como poliuretano, melamina, nylon). En muchos casos, un incendio puede dar origen a una explosión o a derrames de aguas contaminadas, derivadas de la acción para combatir el fuego. Un ejemplo ilustrativo es el caso del incendio de una bodega de la Planta Sandoz en Suiza (octubre 1986), donde se utilizó grandes cantidades de agua para combatir el fuego que amenazaba a 1.000 toneladas de líquidos altamente inflamables, evitando así una catástrofe. Desgraciadamente, el agua utilizada en el combate al fuego se contaminó con los pesticidas y otras sustancias químicas derramadas

durante el incendio, provocando una seria contaminación del río Rin, dañando la biota acuática y afectando el suministro de agua potable de millones de personas.

Un incendio requiere de la presencia de 3 elementos básicos :

- Combustible.
- Comburente (agente oxidante; ej.: O₂, Cl₂, NO₂).
- Fuente de ignición (ej.: chispa, llama, superficie caliente).

Si falta cualquiera de estos elementos, el incendio no puede producirse. Obviamente, un incendio no puede producirse si no hay combustible o si no está en la proporción y cantidad requerida.

A continuación, se define algunos términos de uso común en el análisis de consecuencias de incendios.

Inflamabilidad : Hace referencia a la menor o mayor facilidad con que una sustancia puede arder en aire o en algún otro tipo de gas que puede servir como comburente (es decir, agente oxidante).

Intervalo de Inflamabilidad: Se refiere al intervalo de concentraciones de combustible dentro del cual una mezcla gaseosa puede arder al entrar en contacto con una fuente de ignición.

Límite Inferior de Inflamabilidad: Se refiere a la concentración límite de combustible en la mezcla de gas, debajo de la cual no existe suficiente combustible como para propagar la combustión lejos de la fuente de ignición.

Límite Superior de Inflamabilidad: Se refiere a la concentración límite de combustible en una mezcla gaseosa, sobre la cual no existe suficiente comburente como para que la reacción se propague.

Punto de Destello (Flash): Es la temperatura mínima a cual debe estar un líquido (o sólido) combustible, para que los vapores producidos formen una mezcla con aire cerca de la superficie, que se encuentre dentro de los límites de inflamabilidad.

Temperatura de Autoignición: Es la temperatura a la cual una sustancia inflamable es capaz de quemarse en aire sin una fuente de ignición "externa", es decir, a partir del propio nivel térmico de la mezcla gaseosa o por contacto con una superficie caliente.

Los límites de inflamabilidad de la Tabla 11.10 corresponden a condiciones en aire estándar. Dichos límites son dependientes de la temperatura. A mayor temperatura, mayor es la diferencia entre los límites inferior y superior: un incremento de 100°C en la temperatura eleva el límite superior en aproximadamente 10%.

TABLA 11.10: CARACTERÍSTICAS DE INFLAMABILIDAD DE ALGUNOS

COMPUESTOS DE USO INDUSTRIAL

SUSTANCIA	LÍMITE INFERIOR DE INFLAMABILIDAD (% V/V)	LÍMITE SUPERIOR DE INFLAMABILIDAD (% V/V)	TEMPERATURA DE AUTOIGNICIÓN °C	PUNTO DE DESTELLO °C
Acetaldehído	4	60	175	-38
Acetona	2,5	13	538	-18
Acetileno	2,5	90	305	-
Benceno	1,3	7,9	562	-11,1
Butano	1,6	8,4	405	-60
Estireno	1,1	6,1	490	31,1
Etano	3	12,5	515	-135
Etanol	3,3	19	423	12,8
Etileno	2,7	36	490	-121
Formaldehído	7	73	430	-67,2
Hexano	1,1	7,5	225	-26
Hidrógeno	4	75	400	-
Metano	5	15	538	-188
Propano	2,1	9,5	450	< - 104
Propileno	2,4	11	460	-108
Tolueno	1,2	7	536	4,4

La concentración de oxígeno en el sistema no tiene mayor efecto sobre el límite inferior de inflamabilidad, ya que éste se encuentra en exceso bajo esas condiciones. Por otra parte, al aumentar la concentración de oxígeno, se incrementa significativamente el límite superior de inflamabilidad.

La concentración de comburente también juega un papel importante en el proceso de combustión. Si su concentración es demasiado baja, no se genera suficiente energía calórica como para elevar la temperatura de la mezcla hasta niveles que permitan la propagación de la llama. Este aspecto es de vital importancia en el diseño de sistemas de control de fuego en base a inertización. Tal es el caso de la utilización de gases inertizantes (ej.: vapor de agua, nitrógeno, dióxido de carbono) para evitar la formación de mezclas inflamables en estanques de almacenamiento de combustibles; dichos gases permiten diluir el oxígeno presente por debajo de su concentración mínima.

Además de los parámetros mencionados anteriormente, la inflamabilidad de un material está determinada por la energía de ignición, la velocidad de combustión, el calor de combustión, la viscosidad (en el caso de líquidos), el punto de fusión (en el caso de sólidos), la relación C/H, etc. Las características de inflamabilidad establecidas por la NFPA¹⁰, son las siguientes:

TABLA 11.11: GRADOS DE INFLAMABILIDAD DE ACUERDO A NFPA

¹⁰ NFPA : National Fire Protection Association, EEUU.

GRADO DE INFLAMABILIDAD	CARACTERÍSTICAS
0	Materiales que no arden cuando están expuestos a temperatura de 815°C, en aire durante 5 minutos.
1	Materiales que requieren de precalentamiento para arder. Arden antes de 5 minutos al exponerlos a aire a 815°C. Líquidos y sólidos con punto de destello mayor de 93,4°C
2	Materiales que no forman mezclas inflamables en contacto con aire en condiciones estándar, pero que sí pueden arder a temperaturas mayores. Líquidos con punto de destello entre 37,8 y 93,4°C.
3	Materiales que pueden arder bajo condiciones ambientales estándar, cuando son sometidos a ignición. Sólidos que arden fácilmente por contener oxígeno en su molécula
4	Materiales que se vaporizan rápidamente en condiciones ambientales estándar dando origen a una combustión rápida. Materiales con punto de destello menor de 22,8°C. Gases y vapores que se pueden dispersar con facilidad en aire, formando mezclas explosivas.

Para que ocurra la ignición, es necesario suministrar la energía mínima de ignición. Dicha energía característica varía con las condiciones de presión y composición de la mezcla combustible/comburente. Típicamente, la energía de ignición es de alrededor de 0,25 mJ (la chispa eléctrica de un interruptor es del orden de 20 mJ).

Las principales fuentes de ignición causantes de incendios en la industria incluyen:

- Superficies calientes.
- Llamas de quemadores.
- Otras llamas desnudas (ej.: antorchas).
- Equipos eléctricos.
- Instalaciones eléctricas.
- Electricidad estática.
- Operaciones de soldadura (arco, llama, metal caliente).
- Ignición por causas mecánicas (colisión de superficies metálicas).
- Ignición espontánea.
- Microondas.
- Chispas y calor debido a fricción.
- Fósforos e ignición intencionada.

Especial consideración debe tenerse en relación con los equipos eléctricos, instalaciones eléctricas y acumulación de cargas electrostáticas. Esta última suele originarse en sistemas donde se produce contacto y luego separación de materiales, generando exceso de electrones en uno de ellos. En los sistemas sólido-fluido, sólido-sólido y fluido-fluido, se genera frecuentemente cargas estáticas que pueden constituir una peligrosa fuente de ignición.

La compresión de una mezcla de gases combustible-comburente puede dar origen a ignición, ya que el incremento de presión genera un aumento de temperatura en la mezcla cuando la relación de compresión es alta y no se elimina el calor generado.

b) Explosiones

Una explosión es un proceso físico-químico que ocurre a gran velocidad, liberando energía en forma súbita y violenta. Las explosiones se clasifican de acuerdo al tipo de energía que las origina. Aquí interesan las explosiones físicas y químicas:

- **Explosiones físicas:** Producidas por la liberación de energía de presión: en este caso se libera súbitamente la energía potencial de un gas comprimido. Ello puede ocurrir a causa de una falla mecánica en el recipiente de contención, o un súbito incremento de la presión del gas almacenado (debido a calentamiento externo, compresión accidental). Por ejemplo, explosión debido a la ruptura catastrófica de un cilindro de gas a presión, o a la ruptura por calentamiento externo de un estanque de almacenamiento de un líquido volátil o gas comprimido. Cuando sólo hay gas presente, no inflamable, se formarán ondas de choque y, posiblemente, proyectiles (trozos del recipiente colapsado).
- **Explosiones químicas:** Debidas a la liberación de energía química; son causadas por una reacción química de oxidación, altamente exotérmica y extremadamente rápida, que produce una súbita elevación de la temperatura y/o un gran aumento de la concentración local de gases. La energía liberada en una explosión química depende de la naturaleza y estado físico de los reactantes y productos. En este sentido, es importante distinguir entre:
 - Explosiones de mezclas de vapores combustibles con un comburente (generalmente, aire).
 - Explosiones de materiales que contienen en si mismos el comburente (ej.: TNT), por lo que la explosión se puede producir en ausencia de aire.

Si una mezcla homogénea de vapor en condiciones de inflamabilidad, entra en ignición sin que existan restricciones externas, se genera un frente de llama que se propaga esféricamente desde el punto de ignición hacia el resto de la nube. La combustión produce un aumento de temperatura y, generalmente, de la cantidad de moles de gas a medida que la reacción transcurre. Debido a la alta velocidad del proceso, la presión local aumenta abruptamente sin que se equilibre con la presión del entorno (a diferencia de lo que ocurriría en un incendio, donde la velocidad de reacción es más lenta y permite la disipación del aumento de presión). La onda de presión que se genera se propaga (a la velocidad del sonido) hacia la mezcla que aún no ha reaccionado. Ello tiene lugar al mismo tiempo que el frente de llama se expande a través de la mezcla inflamable.

La relación entre la velocidad de propagación de la llama y la velocidad de la onda de presión determina dos tipos de explosiones químicas:

- **Deflagración:** Es una explosión química donde la velocidad de combustión es menor que la velocidad de la onda presión (velocidad del sonido). La mayoría de las explosiones de mezclas inflamables en la industria química son deflagraciones.
- **Detonación:** Es una explosión química donde la velocidad de combustión es mayor que la velocidad de la onda de presión. Las detonaciones ocurren a velocidades mayores que la velocidad del sonido.

Las presiones generadas por las detonaciones son más altas que las producidas por las deflagraciones, y tiene efectos más destructivos.

Al ocurrir una explosión física, ésta puede transformarse en una explosión química, cuando el gas involucrado es combustible y forma una mezcla dentro del intervalo de inflamabilidad. De aquí se puede generar una explosión de nube de vapor no confinada (EVNC). La EVNC produce una onda de presión y probablemente proyectiles, con efectos térmicos de menor importancia. Si las características de inflamabilidad no son suficientes para provocar una EVNC, el evento deriva en un incendio *flash*, donde el principal efecto es debido a la radiación térmica.

Cuando la explosión física involucra líquido y vapor, el efecto depende de la temperatura del líquido. Si ésta es menor que su temperatura de ebullición, en la explosión participa la sustancia que está en fase vapor y su evolución es similar a la anterior. Por otra parte, si la temperatura del líquido es mayor que su temperatura de ebullición a la presión del entorno, la explosión física inicial que rompe el recipiente produce una brusca caída de la presión del estanque, generando una evaporación masiva del líquido sobrecalentado, dando origen a una explosión donde un líquido hirviendo genera una fase vapor en expansión, conocida como BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion). Este tipo de explosiones tiene un gran poder destructivo, ya que la violenta evaporación del líquido genera un fuerte incremento de presión. Si la concentración del vapor está dentro de los límites de inflamabilidad, se puede producir la reacción de combustión. La ignición de una BLEVE da origen a una masa de gases a alta temperatura, conocida como "esfera de fuego", que presenta un fuerte efecto de radiación térmica. La causa más común de explosiones BLEVE es el incendio externo, que calienta la pared del recipiente reduciendo su resistencia mecánica, lo que deriva en su eventual colapso. En otros casos, la ruptura puede ser provocada por una sobrepresurización accidental, falla de material, o reacciones fuera de control.

Con frecuencia, la ruptura explosiva del recipiente puede significar que fragmentos de éste sean lanzados a grandes distancias, tal como, en la explosión de los Alfaques, donde un trozo de 5 toneladas del camión cisterna se encontró a más de

200 m del lugar del accidente.

En el caso de explosiones confinadas, es decir, aquellas que ocurren dentro de recipientes, edificios, silos, etc., se puede producir violentos efectos de presión, proyectiles y radiación térmica. La presión máxima alcanzada en la explosión confinada y la velocidad de aumento de la presión son los dos parámetros claves que determinan las consecuencias de la explosión.

Entre los accidentes más importantes ocurridos en la industria de procesos se encuentran las explosiones de nubes de vapor no confinadas. Dicha nube de vapor se puede formar a partir del colapso de un recipiente conteniendo un líquido volátil inflamable, o debido a la fuga de un gas inflamable. El poder destructivo de la explosión está determinado por el tiempo transcurrido entre el instante en que comienza la emisión y el momento de la ignición. Si dicho tiempo es muy corto, el tamaño de la nube inflamable es muy pequeño, por lo que las consecuencias de la explosión serán menores. Si la duración de la emisión antes de la ignición es más larga, mayor será el tamaño de la nube explosiva produciendo mayores daños. Sin embargo, si el tiempo transcurrido antes de la ignición es muy largo, la mayor parte de los vapores emitidos se habrá diluido hasta concentraciones por debajo del límite inferior de inflamabilidad, por lo que los efectos serán mucho menores.

c) Escape de Sustancias Peligrosas

Para estimar las consecuencias del escape de sustancias peligrosas, se necesita conocer las características de las sustancias, la cantidad involucrada y las condiciones que afectan su transporte en el ambiente. Por ejemplo, para conocer los efectos de una nube tóxica se requiere estimar el mapa concentración-distancia-tiempo, para así determinar la vulnerabilidad de las personas. Para ello se utilizan modelos matemáticos que permiten predecir el destino de los contaminantes en el ambiente y sus efectos sobre las personas y el entorno.

Aquí revisaremos brevemente la dispersión de gases y vapores en la atmósfera. Las emisiones gaseosas y de compuestos volátiles sufren dispersión en la atmósfera, que tiende a reducir su concentración. De acuerdo con la continuidad de la emisión, estas se pueden clasificar como:

- **Emisiones instantáneas:** Son aquellas en las que el tiempo necesario para que el material emitido alcance a un receptor situado a una distancia determinada, es mucho mayor que el tiempo requerido para la descarga de todo el material.
- **Emisiones continuas:** El tiempo de emisión es mucho más largo que el tiempo para alcanzar un receptor ubicado. Generalmente, se considera que el sistema está en estado estacionario.
- **Emisiones discontinuas:** Corresponde a una situación en que existen emisiones intermitentes o continuas con cambios drásticos en la concentración, o en el caudal o en las condiciones atmosféricas.

Una emisión instantánea se dispersará en la dirección del viento, de modo que el

centro de la descarga se alejará cada vez más del origen. El diámetro de la nube también irá aumentando, con una distribución de concentración al interior de la nube que muestra una mayor concentración en el centro y menores concentraciones en las partes externas.

En el caso de una emisión continua, se tiene una pluma que se aleja en la dirección del viento, cuya forma estará fuertemente determinada por las condiciones meteorológicas (velocidad del viento, radiación solar, temperatura, estabilidad atmosférica, altura de la capa de inversión térmica, etc.) y por las características de las sustancias. Como se discute en el Capítulo 3, este proceso va acompañado de mezcla entre el aire y los compuestos químicos, debida a la turbulencia, provocando la dilución y dispersión de los contaminantes a medida que se alejan del punto de emisión.

Los modelos matemáticos utilizados para describir la dispersión de gases y vapores en la atmósfera están ampliamente documentados en la literatura, y existen diferentes programas computacionales de libre acceso para fines de simulación y predicción. La mayoría de ellos se basa en el modelo de dispersión Gaussiano, que supone una distribución normal para la concentración de los contaminantes en la pluma. Hay diferentes versiones para dicho modelo, con distintos grados de sofisticación y requerimientos de información. Un aspecto crítico en todos ellos, son los coeficientes de dispersión utilizados, los que deben ser validados empíricamente cuando se requiera resultados con mayores niveles de confiabilidad.

11.4.3) Vulnerabilidad de Personas e Instalaciones

La vulnerabilidad de las personas se expresa como el número de individuos que probablemente pueden ser afectados con un cierto nivel de daño a causa de un accidente. El daño puede variar desde molestias y heridas menores hasta la muerte de los individuos afectados.

Por otra parte, la vulnerabilidad de las instalaciones se puede expresar en términos del daño físico sufrido por los edificios y equipamiento debido a un accidente. Dichos daños se pueden cuantificar en base a valores monetarios. Las personas pueden sufrir daño producto de: la radiación térmica, impacto de proyectiles, por la onda de presión de una explosión, por inhalación, contacto con sustancias peligrosas, descargas eléctricas, etc. Dicho daño dependerá tanto de la cantidad y tipo de energía o sustancia peligrosa, como de las condiciones de protección que posean los individuos expuestos. Más aún, existen diferentes grados de tolerancia a tales circunstancias por parte de diferentes individuos; por ejemplo, la inhalación de gases irritantes puede provocar molestias menores en algunas personas, mientras que otras pueden presentar serias reacciones bronquiales obstructivas, con peligro de asfixia.

La mayoría de los modelos matemáticos para predecir la vulnerabilidad de las personas e instalaciones se basa en la función de probabilidad Probit (ver Santamaría y Braña (1984)), tal como se ilustra en un ejemplo más adelante. Tales modelos son muy útiles para determinar el nivel de daño causado cuando se

conoce los detalles del evento accidental (ej.: radiación térmica emitida, dosis de material tóxico, sobrepresión generada por una explosión, etc.).

a) **Vulnerabilidad frente a emisiones tóxicas**

La amplia variabilidad de la respuesta de los seres vivos ante agentes externos se presenta en casi todas las poblaciones biológicas, lo que dificulta determinar con exactitud la vulnerabilidad de una población expuesta a un peligro.

La vulnerabilidad se puede estimar utilizando experiencias anteriores, donde se demuestre los efectos frente a una cierta dosis del agente dañino.

La predicción de la vulnerabilidad de las personas frente a las emisiones tóxicas, depende de varios factores, tales como:

- Vías de entrada al organismo (ingestión oral, inhalación, contacto directo con la piel, ojos).
- Propiedades del material considerado y mecanismos de acción tóxica.
- Dosis de materia recibida, en términos de concentración y tiempo de exposición.
- Tipo de exposición: exposición súbita (alta concentración en poco tiempo) o exposición prolongada (baja concentración en tiempos largos)
- Variabilidad de la respuesta individual en una población expuesta a una misma dosis.

Ante la entrada de un agente tóxico, el organismo presenta varios mecanismos de respuesta que tienden a reducir su acción dañina:

- Excreción de la sustancia tóxica (a través de la orina, heces, sudor).
- Transformación metabólica a sustancias menos tóxicas.
- Acumulación en tejidos grasos o en otras partes del organismo.

Respecto a la caracterización de la toxicidad de los materiales, existen diversos índices que pueden ser utilizados para determinar los efectos tóxicos frente a un nivel dado de exposición:

LC₅₀ : Indica la concentración del material en el aire que produce la muerte en el 50% de la población expuesta, durante un período especificado. En general, se considera que una exposición a una concentración $0,1 \times LC_{50}$ es suficiente para causar la muerte de un individuo.

LD₅₀: Indica la dosis que, administrada oralmente o a través de la piel o por inhalación, causa la muerte del 50% de los individuos expuestos, durante un período especificado. Se considera que una dosis de $0,1 \times LD_{50}$ es suficiente para causar la muerte de un individuo.

Valores límites umbrales (TLV, *threshold limit values*): especifica los niveles de concentración máxima de una sustancia en aire a los que puede estar expuesto un trabajador durante 30 min, sin que éste desarrolle síntomas adversos. Una variante de este índice es el LPP (Límite Permisible Ponderado), que especifica un tiempo de exposición de 8 horas. Otros indicadores de características similares son el EAEC (*emergency airborne exposure concentrations*) y el IDHL (*immediately dangerous to health and life*).

También se debe considerar aquellas situaciones donde los trabajadores pueden estar expuestos en forma prolongada a sustancias que presentan características tóxicas crónicas, es decir, cuyos efectos sobre la salud sólo se manifiestan después de largos períodos de exposición. Los avances en ecotoxicología han permitido identificar muchos efectos crónicos y aquellos compuestos que los causan. Existen muchos compuestos de uso industrial con reconocido poder mutagénico y cancerígeno, los que deben ser estrictamente controlados.

b) Vulnerabilidad a los efectos térmicos

Los efectos de la radiación térmica sobre las personas dependen fuertemente del tipo de accidente que la genera, ya que ello determina la velocidad a la cual ocurre el accidente, y la intensidad de la radiación emitida. Por ejemplo, en caso de un incendio de líquido inflamable en charco, las personas expuestas a niveles de radiación térmica peligrosos pueden huir hacia lugares protegidos. A medida que los individuos se alejan de la fuente emisora, disminuye el nivel de exposición y, por lo tanto, su efecto dañino.

Por el contrario, en el caso de un incendio *flash*, el evento ocurre a mucho mayor velocidad, dejando un tiempo de respuesta demasiado corto como para que los individuos escapen a zonas más protegidas.

Es importante considerar la variabilidad del comportamiento individual frente a situaciones de emergencia. Durante un incendio, un individuo puede huir rápidamente en la dirección correcta y salvarse, mientras que otro puede hacerlo en la misma dirección que el viento y ser alcanzado por las llamas.

La protección individual juega un papel determinante en el tipo de daño que puede causar un cierto nivel de exposición a la radiación térmica. Ello varía de acuerdo al tipo de vestuario que lleva el personal en el momento del accidente. Para efectos de evaluación de riesgos, generalmente se considera la piel expuesta sin protección.

Las quemaduras pueden provocar diferentes grados de daño a la piel, desde simples quemaduras, hasta destrucción masiva con resultado de muerte. De acuerdo con el daño, las quemaduras se clasifican en 4 grados:

- **Quemaduras de primer grado:** Sólo queda afectada la epidermis, con enrojecimiento y algo de dolor, sin que se formen ampollas. Sanan en 2-3 días, sin dejar cicatrices.

- **Quemaduras de segundo grado:** La quemadura atraviesa la epidermis y parte de la dermis. Se producen ampollas cuya persistencia depende de la profundidad del daño. Las quemaduras profundas de segundo grado son muy dolorosas y pueden demorar 1-3 meses en sanar.
- **Quemaduras de tercer grado:** Queda afectada la dermis en toda su profundidad. No suele haber sensación de dolor, ya que las terminaciones nerviosas han sido destruidas, junto con los vasos sanguíneos, glándulas sudoríparas, glándulas sebáceas, etc. Producen grandes pérdidas de fluidos y alteraciones metabólicas. Pueden producir muerte.
- **Quemaduras de cuarto grado:** Son aquellas que afectan más allá de la dermis, alcanzando músculos y huesos. Ocurren cuando parte del cuerpo queda atrapado en las llamas y no se retira de inmediato, o debido a quemaduras eléctricas graves. En muchos casos, pueden ingresar materiales tóxicos directamente al flujo sanguíneo en la zona afectada. Este tipo de quemaduras es extremadamente grave y puede derivar en amputaciones. Pueden producir muerte.

El grado de destrucción debido a la exposición a la radiación depende mucho de la velocidad a la que responda el individuo, luego que la intensidad de la radiación térmica recibida sobrepase un cierto umbral. Para que tal respuesta se produzca, es necesario que el calor se transfiera hacia el interior de la piel hasta alcanzar las terminaciones nerviosas. Al sobrepasar el umbral del dolor, se producen respuestas de protección inconscientes, seguidas de actos conscientes. Al parecer, el umbral del dolor se alcanza cuando la temperatura sobrepasa los 45°C a una profundidad de 0,1 mm bajo la superficie externa de la piel. A partir de aquí la formación de ampollas ocurre rápidamente al llegar a una temperatura de 55°C.

La Tabla 11.12 muestra los efectos típicos en función de la intensidad de radiación térmica. A modo de referencia, cabe señalar que la intensidad de la radiación solar en un día agradable es del orden de 1 kW/m² y el cuerpo humano puede tolerar niveles de radiación de hasta 1,6 kW/m² por períodos relativamente prolongados, sin sensación de incomodidad.

A modo de ejemplo, uno de los modelos más utilizados es el propuesto por Eisenberg *et al.*¹¹

$$Y = -14,9 + 2,56 \ln(10^{-4} I^{4/3} t)$$

TABLA 11.12: EFECTO DEL NIVEL DE RADIACIÓN TÉRMICA SOBRE LAS PERSONAS

NIVEL DE RADIACIÓN	EFECTO
--------------------	--------

¹¹ Eisenberg N., Lynch C., Breeding J., "Vulnerability Model. A simulation system for assessing damage resulting from marine spills". National Technology Information Service Report AD-AO15-245. Springfield (1975). Se revisa detalladamente en la referencia Santamaría y Braña.(1994)

kW/m²	
1,7	Se alcanza el umbral del dolor en 1 minuto
9,5	Se alcanza el umbral del dolor en 8 segundos
128	Se alcanza un 100% de mortalidad, para una exposición de 10 segundos
131	Quemadura de 2° grado, para una exposición de 1,4 segundos
146	Se alcanza el umbral de mortalidad para una exposición de 1,4 segundos

Donde Y representa el número de unidades Probit (es decir, *Probability Unit*), I es la radiación recibida (en W/m²) y t es el tiempo de exposición (en segundos).

Los autores suponen que una quemadura de 1° grado aparece cuando:

$$t I^{1,15} > 550.000$$

El número de unidades Probit, Y, se relaciona con el porcentaje de víctimas (P) a través de la función de probabilidad Normal, con valores de 5 y 1, para la media y la varianza, respectivamente:

$$P = (2 \pi)^{-1/2} \int_{-\infty}^{Y-5} \exp(-u^2/2) du$$

La radiación térmica puede afectar gravemente a los edificios y estructuras. En el caso de estructuras combustibles, la radiación puede causar ignición y combustión de éstas. En el caso de materiales no combustibles (ej.: estructuras metálicas), la radiación térmica puede reducir seriamente la resistencia mecánica del material, con el consiguiente riesgo de colapso de la estructura.

c) Vulnerabilidad a las explosiones

La onda de presión derivada de las explosiones es uno de los agentes de destrucción producto de explosiones en la industria. Las partes del cuerpo humano más expuestas a la sobrepresión son: los oídos, los pulmones, el estómago y los intestinos.

La Tabla 11.13 ilustra algunos valores típicos de literatura, de tipos de daños por explosiones, en función de la sobrepresión.

TABLA 11.13: EFECTOS DE LA SOBREPRESIÓN DEBIDO A UNA EXPLOSIÓN

SOBREPRESIÓN	TIPO DE DAÑO
---------------------	---------------------

(psi)	
0,04	Ruido fuerte. Rotura de cristales debido a la onda sonora
0,7	Daños estructurales menores en las casas
2	Colapso parcial de paredes y techumbres
2-3	Destrucción de paredes de cemento de 20-30 cm de espesor
3-4	Destrucción de estanques de almacenamiento
5-7	Destrucción total de casas
7	Volcamiento de vagones de tren cargados
12	90% de probabilidad de ruptura de tímpanos
14	Umbral (1%) de muerte por hemorragia pulmonar
25	90% de probabilidad de muerte por hemorragia pulmonar
280	Formación de cráter

Es interesante notar la gran resistencia a la sobrepresión que presenta el ser humano, comparado con los edificios y estructuras. Cuando se evalúe la vulnerabilidad de las personas frente a una explosión, se debe considerar: el efecto de los proyectiles, de la generación de gases tóxicos, del colapso de las construcciones y de los incendios. Para ello se debe contar con información acerca del número de personas presentes en la construcción potencialmente afectada, tipo de materiales y distancia a la que puede ser lanzado un fragmento derivado de la explosión (ej.: trozo de recipiente), etc.

d) Factores que afectan la vulnerabilidad de las personas e instalaciones

Entre los factores que tienen mayor influencia sobre la vulnerabilidad de las personas e instalaciones se puede mencionar:

- **Localización:** Éste es un factor fundamental, ya que determina quienes son los potenciales receptores de los efectos del accidente. Interesan aquí: cercanía de poblaciones externas a la planta, distribución de edificios, vías públicas, distribución de equipos dentro de la planta, distribución de personal al interior de la planta, cercanía a río u otras fuentes de agua, escuelas.
- **Condiciones meteorológicas:** Éstas pueden agravar o atenuar considerablemente las consecuencias del accidente, ya que determinan la dirección, velocidad de transporte y características de dispersión de materiales volátiles y gaseosos. Interesan: temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento, lluvia, condiciones de estabilidad atmosférica.
- **Hora del día en que ocurre el accidente:** Ésta afecta directamente el tipo de actividades que se realiza, particularmente en el ambiente externo a la planta, o cuando existen turnos de día y de noche con diferentes actividades.
- **Época del año:** Las diferencias climáticas a lo largo del año afectan las condiciones meteorológicas, el tipo de vestuario que utilizan las personas; la densidad de población cambia durante los periodos de vacaciones, etc.
- **Respuesta a emergencias:** Esto juega un papel determinante en las consecuencias de un accidente. Interesa: la velocidad de respuesta y el tipo de medidas de contención y protección, comunicación entre los diferentes

actores (personal de planta, público, bomberos, policía, primeros auxilios y hospitales, etc.), nivel de entrenamiento del personal y de la población, acciones evasivas oportunas (evacuación, escape, refugio), etc.

e) Acciones Evasivas

En algunos casos la velocidad a la que ocurre el accidente es muy grande y deja pocas posibilidades de reacción (ej.: explosión, incendio flash). En otros casos, el evento se desencadena con mayor lentitud dejando tiempo para acciones evasivas (ej.: incendios y emisiones tóxicas):

- Evacuación desordenada.
- Evacuación planificada.
- Refugio en lugares designados.
- Utilización de equipos protectores (contra compuestos tóxicos, contra incendio).

Estas medidas permiten reducir la vulnerabilidad de las personas frente a determinados eventos y deben formar parte de los planes de respuesta a emergencias. Se debe seleccionar cuidadosamente las rutas de escape para diferentes situaciones peligrosas. Especial atención debe ponerse a la dirección del viento en el caso de emisiones tóxicas, o de vapores inflamables. También se debe tomar en cuenta las respuestas frente a eventos naturales (sismos, inundaciones, tormentas, etc.) que requieran de acciones evasivas. Los sistemas de alarma deben mantenerse en perfecto estado de funcionamiento. Su diseño debe garantizar que todos los peligros potenciales hayan sido cubiertos. Una alarma temprana permite una respuesta más efectiva frente a la emergencia.

11.5) PROBABILIDAD DE OCURRENCIA

El análisis de riesgo implica evaluar la frecuencia prevista para el accidente, es decir, la probabilidad de que el accidente tenga lugar dentro de un período de tiempo determinado. Éste es un importante componente del riesgo, ya que se combina con la consecuencia estimada para dar como resultado una medida cuantitativa del riesgo. En secciones anteriores, se mencionó la importancia de cuantificar las consecuencias en términos monetarios (considerando todas las pérdidas asociadas al accidente), ya que ello permite expresar el riesgo como una esperanza (matemática) de pérdidas.

Desgraciadamente, la estimación de probabilidad de ocurrencia de un evento accidental es bastante compleja y requiere un alto nivel de especialización. El tema es estocástico por naturaleza y se requiere herramientas estadísticas relativamente sofisticadas. De hecho, ello constituye la principal área temática de la ingeniería de confiabilidad (Reliability Engineering), que se encarga de establecer la relación entre la confiabilidad de un equipo y el correcto funcionamiento de sus componentes. En esta sección se introducirá en forma

muy simplificada algunos conceptos básicos que sirven para estimar la probabilidad de ocurrencia de un evento accidental. No se pretende realizar un riguroso cálculo de probabilidades, sino que revisar algunas técnicas sencillas para su estimación aproximada en estudios preliminares.

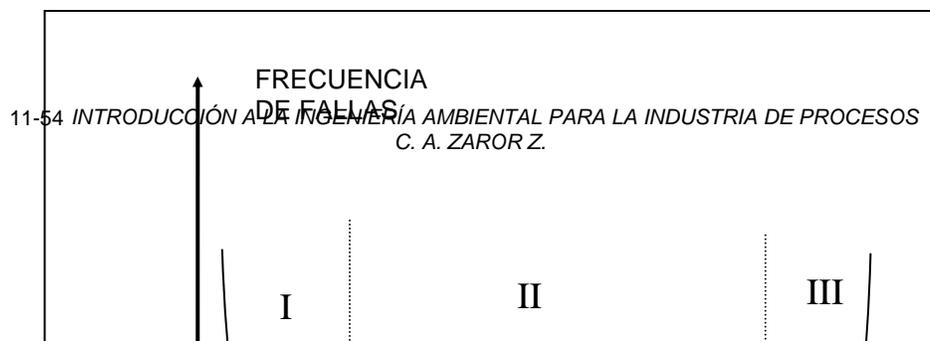
Las plantas industriales constan de múltiples equipos, los cuales están compuestos por centenares de componentes mecánicos y eléctricos. Cada uno de ellos puede fallar en algún momento de su vida útil, lo que otorga casi infinitas variantes de falla para una instalación dada.

Los componentes o equipos pueden fallar debido a diferentes circunstancias, tales como:

- Fallas en la concepción inicial utilizada en su diseño.
- Fallas en el diseño del componente o equipo.
- Falla debido a defectos durante su fabricación.
- Falla en los procedimientos de instalación del componente o equipo.
- Falla debido a que se está utilizando bajo condiciones distintas para las que fue diseñado.
- Falla debido a insuficiente mantenimiento.
- Fallas por causas externas (ej.: falla en el suministro eléctrico, rotura por impacto de un vehículo, etc.).
- Falla debido a fatiga de materiales.
- Falla por error humano, debido a procedimientos inadecuados, negligencia, etc.

Es importante señalar que la probabilidad de falla de una planta o de un equipo no se mantiene constante en el tiempo, sino que varía desde su puesta en marcha hasta el término de su vida útil. La Figura 11.7 ilustra una típica curva de evolución de la frecuencia de falla de un equipo o de una planta industrial. En ella se distingue 3 etapas diferentes en su vida útil:

- Zona I: Corresponde al período inicial de puesta en marcha y operación, donde se producen las fallas debido a defectos de fabricación, a falta de pericia por parte de los operadores (en etapa de aprendizaje), falta de conocimiento respecto al proceso, errores en los procedimientos, etc. En la medida que estos factores se van superando, la frecuencia de falla cae bruscamente.
- Zona II: En esta etapa, se tiene una tasa de fallas casi constante, causadas principalmente por fluctuaciones aleatorias de la carga que soporta el equipo o sus componentes clave, que puede sobrepasar sus límites de resistencia.
- Zona III: Se constata un rápido aumento de la tasa de fallas como consecuencia del desgaste del equipo o cambios en las condiciones de operación para las cuales está subdimensionado.



En muchos equipos se observa una estrecha correlación entre la demanda a la cual están sometidos y su frecuencia de falla. Esto es particularmente relevante en el caso de equipos que están sometidos a esfuerzos mecánicos.

11.5.1) Utilización del Análisis de Árbol de Fallas

El Análisis de Árbol de Fallas (FTA), introducido como una herramienta para la identificación de peligros, puede ser utilizado en la estimación cuantitativa de la probabilidad de un evento accidental. Para que tal análisis sea efectivo, se requiere de una total comprensión del funcionamiento físico del sistema y sus mecanismos de falla.

Las fallas de equipos se pueden agrupar en 3 clases:

1. Fallas primarias: Son aquellas que ocurren cuando el equipo se opera en condiciones normales, para las cuales ha sido diseñado. Estas fallas son atribuibles al equipo y no a agentes externos. Ej. un recipiente que sufre una ruptura, a pesar de que la presión de trabajo no ha superado la de diseño.

2. Fallas secundarias: Se producen bajo condiciones de operación diferentes a las de diseño. Por ejemplo, una ruptura de un recipiente debido a un excesivo aumento de su presión de trabajo, por sobre la presión de diseño.

3. Fallas de control: Son aquellas que ocurren debido a que el equipo funciona como se espera, pero en un momento equivocado o en el lugar indebido. En este caso la falla se debe a que el equipo no recibe la señal apropiada.

En un árbol de fallas, las fallas primarias están en los extremos de las ramas del árbol, mientras que las fallas secundarias y de control son eventos intermedios. Otras fallas, tales como eventos externos, errores humanos, también ocupan niveles primarios.

El FTA requiere un ordenamiento conceptual de los eventos que ocurren o pueden ocurrir entre los eventos básicos hasta llegar al evento final. En este análisis se debe identificar agrupaciones de eventos que puedan ser simplificados sin que se pierda información. En la práctica, se privilegia aquellos cursos de acción que requieran menos condiciones simultáneas para su ocurrencia. Además, se le da mayor prioridad a eventos que involucren errores humanos por sobre fallas de equipos activos; a su vez, a las fallas de equipos activos se les da mayor prioridad que a las fallas de equipos pasivos. Este criterio de selección de fallas tiene implícito el reconocimiento de que un error humano es más probable que una falla de un equipo activo.

Si se conoce la probabilidad de falla, P_i , para cada uno de los eventos básicos, se puede calcular la probabilidad de ocurrencia del evento culminante, considerando que:

- La probabilidad, P_k , de que ocurra al menos uno de dos eventos independientes, con probabilidades individuales P_n y P_m (es decir, para condición O) es:

$$P_k = P_n + P_m$$

- La probabilidad, P_j , de que ocurran simultáneamente dos eventos independientes, con probabilidades individuales P_w y P_z (es decir, condición Y) es:

$$P_j = P_w \times P_z$$

Ejemplo

A modo de ilustración, consideramos el reactor catalítico exotérmico para hidrogenación de acetileno, ilustrado anteriormente en la Figura 11.5. Se requiere calcular la probabilidad de daño al reactor debido a temperatura excesiva. El árbol de fallas correspondientes fue presentado en un ejercicio anterior, en la sección 10.3.5 (ver Figura 11.6).

Si los eventos básicos tienen las siguientes probabilidades asociadas:

P1	:	Probabilidad de que la válvula VC1 falle en abierto.
P2	:	Probabilidad de falla del controlador TC1.
P3	:	Probabilidad de falla del sistema de alarma.
P4	:	Probabilidad falla humana.
P5	:	Probabilidad de que la válvula VC2 falle en cerrado.
P6	:	Probabilidad de falla del controlador TC2.

Tal como se ilustra en la Figura 11.8, la probabilidad de daño al reactor debido a un aumento de la temperatura, P_{11} , está dada por:

$$P_{11} = (P_1 + P_2 + P_3 + P_4) \times (P_5 + P_6)$$

11.5.2) Errores humanos

El error humano está en la base de toda falla en un equipo o proceso. El hombre es responsable del diseño, construcción, operación y mantención de cada unidad de proceso y de cada componente. Aparte de ello, existen acciones erradas que inciden directamente en el curso de acción de un proceso. Dichos errores pueden deberse a:

- **Distracción momentánea:** El operador puede tener una intención correcta, pero su acción resulta incorrecta en la práctica debido a confusión, falta de concentración, etc.
- **Capacitación insuficiente o instrucciones deficientes:** El operador no sabe qué hacer, o no tiene conciencia de su ignorancia.

- **Errores por limitaciones físicas o mentales por parte del operador:** Por ejemplo, puede carecer de la fuerza suficiente para cerrar una válvula en situación de emergencia, o estar sometido a una fuerte presión que le impide actuar correctamente ante eventos que requieren calma para tomar decisiones.
- **Errores debido a falta de motivación o desobediencia:** En algunos casos el operador puede desobedecer órdenes porque genuinamente cree que es mejor no seguir dichas instrucciones, o porque no le interesa hacer las cosas de esa manera.
- **Errores debido a gestión errónea:** Es común encontrar situaciones en que los trabajadores cometen errores debido a que se impone una excesiva presión sobre ellos o, por el contrario, no se les entrega las mejores condiciones de trabajo (cortes presupuestarios en seguridad, equipos en mal estado).

En general, es muy importante identificar aquellos accidentes potenciales donde la falla humana puede ser el principal evento iniciador (o propagador), ya que ello permitiría concentrar los esfuerzos de capacitación y prevención en aquellos operadores y procedimientos críticos.

La Tabla siguiente muestra algunas estimaciones de probabilidades asociadas a diversos tipos de errores humanos (Kletz¹²).

TABLA 11.14: EJEMPLO DE PROBABILIDADES ASOCIADAS A ERRORES HUMANOS

ACCIÓN DEL OPERADOR	PROBABILIDAD
No observa el indicador, o lo observa pero no toma ninguna acción	0,04
No cierra una válvula, como estaba previsto en una parada de emergencia	0,005
Error general de comisión (ej. lee equivocadamente un rótulo y, como consecuencia, selecciona el interruptor equivocado)	0,003
Error general de omisión, cuando no existe indicación en la sala de control del estado del elemento afectado	0,01
El operador no toma la decisión correcta durante los primeros 60 segundos, en una situación de muy alto estrés	0,99
El operador no toma la decisión correcta durante los primeros 5 minutos, de una situación de muy alto estrés	0,9
El operador no toma la decisión correcta durante los primeros 30 minutos, de una situación de muy alto estrés	0,1

¹² Kletz T, "An engineer's view of human error", 2ª ed. The Institute of Chemical Engineers, Rugby (1991)

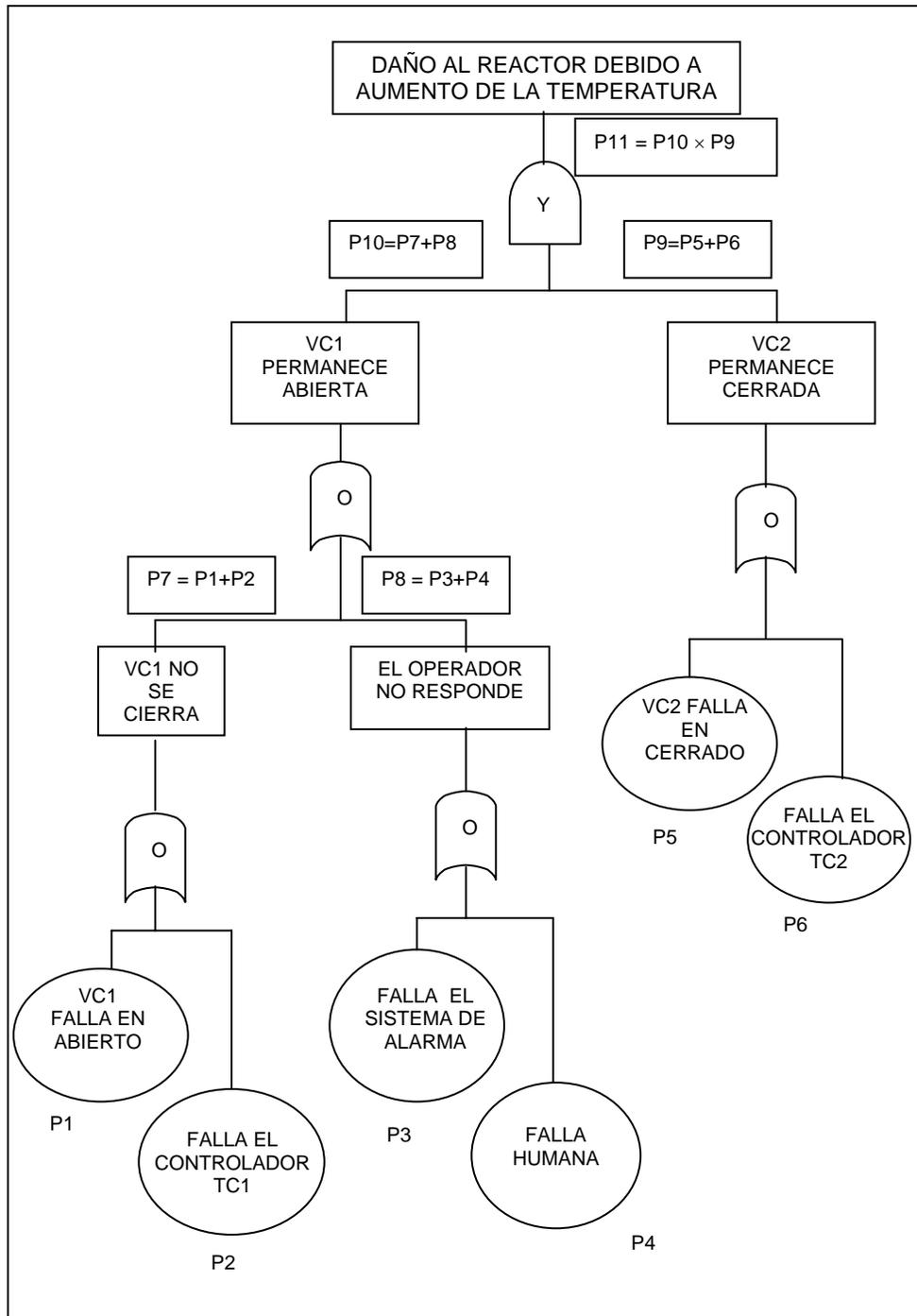


FIGURA 11.8: ÁRBOL DE FALLA PARA REACTOR DE LA FIGURA 11.5

11.6) LISTAS DE VERIFICACIÓN PARA LA IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

LOCALIZACIÓN

1. Implantación adecuada: ¿Se ha establecido la separación de unidades a partir de una evaluación de riesgos?
2. Accesibilidad: ¿Existen obstrucciones peligrosas ya sean sobre o bajo el terreno?
3. ¿Existen suficientes caminos y corredores, con señalización adecuada?
4. ¿Existen accesos y salidas de emergencia en número y de la amplitud suficiente?
5. ¿Hay espacio suficiente para las líneas elevadas de servicios (electricidad, vapor, agua, aire comprimido, etc.)?
6. ¿Existen plataformas adecuadas para realizar operaciones de mantenimiento con seguridad?
7. ¿Se ha considerado la cercanía de fuentes de ignición?
8. ¿Los vientos dominantes?
9. Características del suelo. ¿Suficiente resistencia para soportar las cargas debidas a la operación?
10. ¿Cargas máximas indicadas en su caso?
11. ¿Drenajes adecuados?
12. ¿Control/protección de drenajes ante posibles inundaciones?
13. ¿Localización adecuada de las instalaciones de carga y descarga, fuera de las vías principales?

EDIFICACIONES

1. Escaleras, salidas de emergencia, pasillos: ¿Adecuados, de la amplitud adecuada, libres de obstrucciones y obstáculos?
2. Grúas y elevadores: ¿Bien diseñados, con las salvaguardas adecuadas?
3. ¿Señalización adecuada de cualquier obstáculo al paso?
4. ¿Ventilación adecuada para el tipo de actividad que se lleva a cabo?
5. ¿Iluminación adecuada para el tipo de actividad que se lleva a cabo?
6. ¿Calefacción/refrigeración adecuada para el tipo de actividad que se lleva a cabo?
7. ¿Se necesita una escalera para acceso al tejado?
8. ¿Se requiere puertas resistentes al fuego?
9. ¿Materiales resistentes al fuego en ciertas zonas del edificio?
10. ¿Equipo de emergencia disponible y bien señalado?
11. ¿Se requiere un diseño que tenga en cuenta la posibilidad de explosiones?
12. ¿Se requiere equipos para la detección de calor y humo?
13. ¿Se ha previsto protección contra descargas eléctricas (pararrayos, conexión a tierra de los equipos)?

MATERIALES, EQUIPOS Y PROCESO

1. ¿Se ha considerado la posibilidad de interferencia entre operaciones adyacentes?
2. ¿Se ha previsto el almacenamiento adecuado de materiales especiales o inestables?
3. ¿Se han segregado del resto?
4. ¿Hay materiales que exijan un equipo especial para su manejo?
5. ¿Existen materiales o productos que puedan ser afectados por condiciones meteorológicas extremas?
6. ¿Todas las materias primas y productos están adecuadamente clasificados y etiquetados?
7. ¿Los materiales que constituyen los equipos son adecuados a las condiciones de proceso?
8. ¿Existe posibilidad de confinamiento de vapores en determinadas zonas?
9. ¿Se ha identificado todas las características de peligrosidad de las sustancias utilizadas? (temperaturas de autoignición, puntos de destello, límites de inflamabilidad, posibilidad de descomposición espontánea, reactividad, efecto de impurezas, posibilidad de reacciones fuera de control, reacciones secundarias, características de corrosividad y compatibilidad, toxicidad, etc.).
10. ¿Se conoce los agentes necesarios para extinguir fuegos, que son compatibles con los materiales de proceso?
11. ¿Se ha considerado la posible exposición del personal o del público a los agentes adversos en cada una de las instalaciones? (productos químicos por vía respiratoria, oral o dérmica, polvo y humos, radiaciones nocivas, ruido, agentes biológicos, etc.)
12. ¿Se requiere el uso de campanas extractoras para humos, polvo o vapores?
13. ¿Se requiere el uso de equipos de protección personal?
14. ¿Se ha previsto la posibilidad de generación de cargas estáticas?
15. ¿Se ha evaluado la conductividad de los materiales usados y sus características de acumulación de carga eléctrica?
16. ¿Se ha realizado una toma de tierra adecuada?
17. ¿Se requiere protección contra las explosiones?
18. ¿Se ha verificado la adecuación de los sistemas de alivio de presión, supresión de explosiones, detectores de atmósferas explosivas, etc.?
19. ¿Los venteos están orientados en dirección apropiada? ¿Se ha tenido en cuenta la posibilidad de contrapresiones?
20. ¿Se requiere elementos para prevención de llamas en las líneas de venteo?
21. ¿Se requiere otras precauciones especiales por el tipo de material venteado?
22. ¿En los sistemas disco de ruptura/válvula de alivio, se ha protegido las válvulas de la posibilidad de taponamiento por causa de los discos de ruptura?
23. ¿Se ha instalado medidores de presión entre uno y otra?

MATERIALES, EQUIPOS Y PROCESO (continuación)

24. ¿Es necesario tomar precauciones para un vaciado rápido de recipientes, reactores, etc., en caso de emergencia?
25. ¿Se ha realizado un diseño adecuado a la presión máxima de operación? ¿Se ha considerado factores de corrosión?
26. ¿Se ha identificado aquellos equipos o componentes críticos para la seguridad de la planta?
27. ¿Se ha tenido en cuenta las consecuencias de fallas de uno o más suministros? Electricidad (agitación, circulación, instrumentos, controles, sistemas de emergencia, luz), vapor (calentamiento, vacío, bombas), aire (instrumentos, bombas), agua (enfriamiento, extinción de incendios, de reacciones), gas (inertización).
28. ¿Se ha previsto guardas para correas, cintas transportadoras, poleas, engranajes, y equipo móvil en general, así como para bordes cortantes y superficies calientes de cualquier tipo?
29. ¿Se ha instalado dispositivos de alivio de presión en las líneas de descarga y succión, para las bombas de proceso?
30. ¿Se ha revisado la accesibilidad de todo el equipo, especialmente de los elementos críticos?
31. ¿Se ha considerado la protección e identificación de las líneas más frágiles?
32. ¿Se ha dispuesto suficiente soporte para las tuberías?
33. ¿Se ha tenido en cuenta dilataciones/contracciones térmicas?
34. ¿Existe la posibilidad de bloqueo gradual o súbito de las conducciones?
35. ¿Se ha previsto las consecuencias?
36. ¿Se ha revisado la cantidad de materiales peligrosos almacenados?
37. ¿Puede reducirse dicha cantidad?
38. ¿Pueden los equipos disponerse de manera que las tareas de mantenimiento se realicen con total seguridad (desconexión eléctrica total, bloqueo de líneas)?
39. ¿Se ha revisado la seguridad de los procedimientos de toma de muestras?
40. ¿Los diagramas de proceso se mantienen al día?
41. ¿Los procedimientos de operación se mantienen al día?
42. ¿Existe un procedimiento para su actualización?
43. ¿Se realiza comprobaciones sobre su seguimiento?
44. ¿Se ha previsto la existencia de repuestos para partes o equipos críticos?
45. ¿Se requiere equipo eléctrico a prueba de explosiones?
46. ¿Se requiere inertización de equipos pasivos o activos?
47. ¿Se elimina los residuos adecuadamente?
48. ¿Se ha comprobado la ausencia de problemas en el alcantarillado?
49. ¿Se ha evaluado los peligros de las descargas de materiales al alcantarillado?
50. ¿Existe un procedimiento riguroso de control de calidad y composición a la recepción de cualquier materia prima?
51. ¿Existe un procedimiento establecido para la comunicación entre los supervisores al efectuar el cambio de turno?
52. ¿Se ha tenido en cuenta los factores de seguridad para presiones, temperaturas, flujos, niveles u otras variables de proceso?
53. ¿Puede generarse condiciones peligrosas a causa de una falla mecánica?
54. ¿Se ha previsto las principales causas para fallas humanas y sus consecuencias?

INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL

1. ¿Se ha identificado apropiadamente válvulas, interruptores, instrumentos, etc.?
2. ¿Se comprueba regularmente el funcionamiento de las alarmas, equipos de protección, equipos de puesta en marcha automática e instrumentación en general?
3. ¿Se comprueba regularmente el correcto funcionamiento de las luces testigo e indicadores en el panel de control?
4. ¿Son todos los controles automáticos de falla seguros?
5. ¿Existe protección contra el arranque automático tras una parada de los equipos?
6. ¿Existe una política adecuada para el establecimiento y cambio de los parámetros de control, así como para el control manual de algunas operaciones?
7. ¿Se utiliza en cada caso equipo del estándar adecuado para el servicio que presta?
8. ¿Se revisa regularmente el estado de los equipos, incluyendo los sistemas de cables?
9. ¿Se ha considerado la conveniencia de instalar instrumentación o sistemas de protección redundantes?
10. ¿Se ha estimado posibles retardos en la respuesta de los distintos equipos?
11. ¿Se ha identificado las consecuencias de dichos retardos?
12. ¿Se ha previsto los efectos sobre el control de la planta en el caso de que un instrumento sea retirado del servicio para mantenimiento?
13. ¿Se ha considerado la conveniencia de instalar nuevos cruzamientos de señales (*interlocks*)?
14. ¿Se ha tenido en cuenta todas las consecuencias en los *interlocks* existentes?
15. ¿Se ha previsto el sistema de parada en caso de pérdida de corriente eléctrica o aire de instrumentos?
16. ¿Se ha evaluado su efecto sobre el control de la planta?
17. ¿Se ha identificado los equipos eléctricos que pueden ser retirados de servicio para mantención preventiva, sin interrumpir la producción?
18. ¿Se ha evaluado los procedimientos para llevar a cabo tales acciones?

ACCIONES DE EMERGENCIA

1. ¿Se mantiene un entrenamiento periódico sobre cómo enfrentar situaciones de emergencia?
2. ¿Existen procedimientos para evaluar tal preparación?
3. ¿Simulacros periódicos?
4. ¿Se requiere duchas y lavaojos de emergencia?
5. ¿Se requiere equipo de protección personal para emergencias?
6. Interruptores y válvulas de emergencia: ¿Se revisan con frecuencia?
7. ¿Están bien señalizados?
8. ¿Son accesibles?
9. ¿Se ha previsto fuerza e iluminación de emergencia?
10. ¿Se ha previsto la integridad de la sala de control en emergencias?
11. ¿Se requiere extintores? ¿Cuántos, de qué clase y tamaño?
12. ¿Se requiere sistemas de rociado automático?
13. ¿Se ha comprobado la adecuación del equipo de detección y extinción de incendios a los códigos vigentes? (suministro de agua, incluyendo suministro secundario, bombas, tanques, tuberías, alarmas, protección del equipo contra incendios, etc.).
14. ¿Los materiales de extinción de incendios son compatibles con los materiales de proceso?
15. ¿Se requiere equipo para detección de humos, calor o vapores inflamables?
16. ¿De vapores tóxicos?
17. ¿Se ha previsto la contención de derrames?
18. ¿Su manejo?
19. ¿Se ha considerado la instalación de nuevas alarmas?
20. ¿Se mantiene al día el material de emergencia?
21. ¿Se mantiene al día los procedimientos de emergencia?
22. ¿Se realiza adiestramientos periódicos?
23. ¿Se ha previsto un sistema para llevar la cuenta exacta del número de personas en las instalaciones, incluyendo proveedores y visitantes?
24. ¿Se mantiene al día la documentación sobre seguridad de los distintos materiales utilizados?
25. ¿Se ha considerado la posibilidad de efectos sinérgicos?
26. Plan de emergencia: ¿Se ha realizado teniendo en cuenta las consecuencias de accidentes en los peores casos razonables, con un análisis de riesgo riguroso?
27. ¿Se ha previsto las vías de evacuación frente a diferentes escenarios de accidentes?
28. ¿Se ha identificado áreas de protección contra incendio, explosiones, emanaciones tóxicas?
29. ¿Existen medidas frente a desastres naturales (sismos, tormentas, inundaciones, etc.)?
30. ¿Se ha asegurado las comunicaciones de emergencia, incluso en períodos de vacaciones?
31. ¿Se ha considerado la comunicación expedita con el exterior: público local, bomberos, policía, servicios de salud?

MANTENIMIENTO DE LOS EQUIPOS

- 1) ¿Es necesario el funcionamiento continuo del equipo?
- 2) ¿Hace falta un equipo en reserva?
- 3) ¿Va a estar sometido a la acción de compuestos corrosivos de manera continua u ocasional?
- 4) ¿Hay espacio suficiente para el acceso del equipo (grúas, herramientas) y personal necesario para el trabajo y el desplazamiento de las partes desmontadas (cabezales, tubos, etc.)?
- 5) ¿Es necesario entrar en el equipo?
- 6) ¿Se ha identificado las labores de mantención a realizar?
- 7) ¿Existe el peligro de incendio o explosión dentro o sobre el equipo?
- 8) ¿Existen sistemas adecuados de bloqueo en todas las líneas de entrada y salida del recipiente, según el riesgo potencial que cada una presente? (con excepción del aire o agua, no se considera suficiente una sola válvula para mantener una operación segura)
- 9) ¿Afecta este bloqueo a otros equipos que deben mantenerse en funcionamiento?
- 10) ¿Pueden quedar productos peligrosos dentro del recipiente?
- 11) ¿Se ha identificado sus riesgos potenciales?
- 12) ¿Se ha identificado los medios necesarios para su eliminación?
- 13) ¿Se requiere líneas especiales para el venteo o vaciado del recipiente a un lugar seguro?
- 14) ¿Se requiere entrar con equipos de protección personal o sistemas de respiración?
- 15) ¿Se ha identificado tales equipos de protección?
- 16) ¿Son los accesos lo suficientemente amplios para ello?
- 17) ¿Se ha identificado otros elementos al interior del recipiente? (agitadores, serpentines, placas deflectores, platos, etc.).
- 18) ¿Se ha previsto los riesgos asociados a su presencia?
- 19) ¿Es necesario usar escaleras de mano u otros medios auxiliares para el acceso al interior?
- 20) ¿Se ha previsto como se sostendrán en forma segura?
- 21) ¿Se ha previsto medios para el rescate desde el exterior?
- 22) ¿Es necesaria la ventilación del interior cuando se está trabajando?
- 23) ¿Se ha previsto medios de ventilación adecuados?

11.7) EJEMPLO DE CATEGORIZACION DE LOS RIESGOS Y MEDIDAS DE PREVENCIÓN EN UNA PLANTA DE CELULOSA KRAFT

PELIGRO DE EXPLOSION			
	Consecuencias	Probabilidad	Riesgo
En sistema de GNC	Daño Extremo	Media	Sustancial
En estanque de petróleo	Daño Extremo	Media	Sustancial
En la descarga de clorato	Daño Extremo	Media	Sustancial
En estanque de metanol	Daño Extremo	Media	Sustancial
En estanque de hidróxido de sodio	Daño Extremo	Baja	Moderado
En la planta química	Daño Extremo	Baja	Moderado
En los precipitadores electrostáticos	Daño Extremo	Baja	Moderado
En estanque de disolución	Daño Extremo	Baja	Moderado
En horno de cal	Daño Moderado	Baja	Tolerable

PELIGRO DE INCENDIO			
	Consecuencias	Probabilidad	Riesgo
Circuitos eléctricos, turbogenerador, transformadores, computadores	Daño Extremo	Alta	Intolerable
Estanques de combustibles, metanol, peróxido, solventes, lubricantes	Daño Extremo	Alta	Intolerable
Máquina moldurera	Daño Extremo	Alta	Intolerable
Maestranza (solventes, lubricantes)	Daño Extremo	Alta	Intolerable
Edificios de la Planta	Daño Extremo	Alta	Intolerable
Depósito de madera seca y molduras	Daño Moderado	Alta	Sustancial
Depósito de residuos de madera	Daño Moderado	Alta	Sustancial
Bodegas de celulosa	Daño Moderado	Alta	Sustancial
Bodegas de resinas, aditivos y otros	Daño Moderado	Alta	Sustancial
Patio de madera	Daño Moderado	Alta	Sustancial
Pila de astillas	Daño Moderado	Alta	Sustancial
Máquina secadora	Daño Extremo	Media	Sustancial
Camiones/trenes con productos químicos y combustibles	Daño Extremo	Media	Sustancial
Planta química	Daño Extremo	Baja	Moderado

DERRAMES DE LÍQUIDOS PELIGROSOS			
	Consecuencias	Probabilidad	Riesgo
Durante el transporte hacia la planta	Daño Extremo	Alta	Intolerable
Por ruptura de estanque, con derrame a sistema de aguas lluvia	Daño Extremo	Alta	Intolerable
Por rebalse de estanques, con derrame a sistemas de aguas lluvia	Daño Extremo	Alta	Intolerable
Agua de incendio contaminada, con derrame a sistemas de aguas lluvia	Daño Extremo	Alta	Intolerable
Rebalse de laguna de emergencia	Daño Extremo	Alta	Intolerable
Durante carga o descarga	Daño Moderado	Alta	Sustancial
Por ruptura de estanques (contenido)	Daño Leve	Alta	Moderado
Por rebalse de estanques (contenido)	Daño Leve	Alta	Moderado
Ruptura de cañerías	Daño Leve	Alta	Moderado
Fugas en bombas y válvulas, etc.	Daño Leve	Alta	Moderado

FUGAS DE GASES Y VAPORES PELIGROSOS			
	Consecuencias	Probabilidad	Riesgo
Por ruptura de estanques o cilindros	Daño Extremo	Alta	Intolerable
Durante carga o descarga	Daño Moderado	Alta	Sustancial
Por ruptura de cañerías	Daño Moderado	Alta	Sustancial
Por ruptura de sellos de compresores y válvulas	Daño Moderado	Alta	Sustancial
Falla de sistemas de alivio de presión	Daño Moderado	Alta	Sustancial

OTROS PELIGROS			
	Consecuencias	Probabilidad	Riesgo

Accidentes de tránsito dentro de la planta	Daño Extremo	Alta	Intolerable
Accidentes de tránsito en transporte desde y hacia la planta	Daño Extremo	Alta	Intolerable
Accidentes personales en la planta (caídas, shock eléctrico, impactos)	Daño Moderado	Alta	Sustancial
Sismos mayores	Daño Extremo	Media	Sustancial
Acción destructiva de terceros	Daño Extremo	Media	Sustancial
Sequía (corte de suministro de agua)	Daño Extremo	Baja	Moderado
Inundación de la planta por crecida de río	Daño Extremo	Baja	Moderado
Derrumbes	Daño Leve	Media	Tolerable
Temporal de viento	Daño Leve	Media	Tolerable
Tormenta eléctrica	Daño Moderado	Baja	Tolerable

MEDIDAS DE PREVENCIÓN PARA PELIGRO DE EXPLOSIÓN	
Peligro de Explosión en:	Medida de Prevención
Caldera de Recuperación	Sobrepresión: Válvulas de alivio y/o seguridad Controladores de presión Programa de mantenimiento, calibración y pruebas de las válvulas de seguridad Programa de mantenimiento y operabilidad de los sensores e instrumentos de operación Capacitación permanente sobre la operación de la caldera Procedimientos e instrucciones actualizadas y accesibles
	Agua al Hogar Vaciado de emergencia Indicadores de flujo y/o relación de agua/vapor Capacitación al personal sobre los procedimientos en las emergencias de vaciado
Sistema de Gases No Condensables	Discos de ruptura Venteo automático de sobrepresión Matallama de retroceso Antorchas de emergencia
Caldera de biomasa	Sobrepresión: Válvulas de alivio y/o seguridad Controladores de presión Programa de mantenimiento, calibración y pruebas de las válvulas de seguridad Programa de mantenimiento y operabilidad de los sensores e instrumentos de operación Capacitación permanente sobre la operación de la caldera Procedimientos e instrucciones actualizadas y accesibles
Horno de cal	Detector de llama (conectado a válvula de alimentación de petróleo) Sistema de purga de gases combustibles Sistema de seguridad para evitar encendido en presencia de alta concentración de gases combustibles Circuito de Sistema de Control Distribuido (DSC) de apoyo
Estanque de disolución de licor verde	Indicador del nivel mínimo de agua del estanque Limpieza periódica e inspección permanente de los canales de fundido Procedimientos e instrucciones actualizados para puesta en marcha Acciones de emergencia para contener accidentes por derrame de fundido (medidas especiales para el control de fundido, confinamiento, evitar contacto con el agua)

**MEDIDAS DE PREVENCIÓN PARA PELIGRO DE EXPLOSIÓN
(Continuación)...**

Estanque de petróleo	Control de temperatura del combustible Ubicación lejana a fuente de calor Medidas de seguridad generales
Estanque de metanol	Válvulas de alivio de presión. Válvulas de vacío y presión Matallamas Medidas de seguridad generales
Estanque de dióxido	Sellos de tapas de explosión herméticas Análisis horario de la solución. Analizador en línea Indicadores de bajo nivel de solución, con detección de bombas de salida de productos Indicadores conectados al Sistema de Control Distribuido (DCS). Alarmas de alta temperatura
Precipitador electrostático	Medidor de CO (gases combustibles) Indicadores de % de O ₂ en los gases a los precipitadores Desconexión alta tensión en presencia de alta concentración de gases combustibles
Otros estanques de compuestos químicos	Indicadores conectados a DCS con indicadores y alarma de temperatura Válvulas de seguridad En el caso del estanque de O ₂ elementos de intervención y recambio totalmente pasivados (sin grasa)
Polvo de madera en suspensión	Sistemas automáticos de detección de chispas y humos en los ciclones, con conexión directa a rociadores

MEDIDAS DE PREVENCIÓN PARA PELIGRO DE INCENDIO	
Peligro de Incendio en:	Medida de Prevención
Depósitos de madera seca, corteza, viruta, aserrín, pila de astillas, patio de madera	Red húmeda externa, red perimetral para suministro de agua a grifos, estanque de almacenamiento agua para combatir incendios, sistema de impulsión de agua con bombas eléctricas y diesel (dispuestas en paralelo). Red interior, mangueras, extintores portátiles (de acuerdo a normas NFPA) Capacitación del personal, para respuesta a emergencias de incendio
Instalaciones, bodegas y edificios generales de la planta	Sistemas automáticos de detección, alarmas y control de amago de incendio. Sistemas de rociadores automáticos Dotación de extintores. Planes de respuesta Orden, aseo y disposición de desechos. Aislamiento térmico de circuitos eléctricos Capacitación del personal, para respuesta en emergencias de incendio.
Circuitos eléctricos	Sistemas de protección de fallas a tierra Redes de protección de sobrecorriente, para equipos Protección de sobre corriente, para conductores Protección diferencial para el circuito de uso doméstico Neutro artificial en aterramiento a los sistemas eléctricos de generación y distribución Tapas de protección a bandejas y/o escalerillas porta conductores
Turbogeneradores	Revisión horaria de los sistemas de aceite Aislación a los sistemas de alta temperatura Circuito de monitoreo a sala del turbogenerador Sistema de detectores, alarmas y combate de incendio sobre el tubo y unidades de aceite Sistema de detección, alarma y combate de incendio al edificio del turbogenerador
Transformadores	Protecciones de sobrecorriente Protecciones de fallas a tierra Protecciones de alto y bajo nivel de aceite Protección diferencial Transformadores con aislantes en base de silicona Sistemas automáticos de detección, alarma y control de incendios

MEDIDAS DE PREVENCIÓN PARA PELIGRO DE INCENDIO
Continuación...

En estanques de combustibles, metanol, peróxido, solventes, lubricantes	Indicadores al DCS, con alarma de alta temperatura Sistema de ducha sobre estanque para reducir la temperatura Matallamas Red de incendio. Alto caudal de agua. Instalaciones formadoras de espuma
En máquina secadora	Sistema de anegamiento y sofoco por vapor Limpieza y aspiración de polvo de celulosa en secadora Limpieza y aspiración del polvo en decantación exterior Sistemas de detección alarmas automáticas Planes periódicos de mantención y limpieza de los sistemas asociados Capacitación permanente sobre la operación y mantención del equipo y sus instalaciones complementarias. Planes de respuesta Extintores y sistemas hidratantes.
Vehículos con productos químicos y combustibles	Medidas de seguridad de acuerdo a Normas NFPA y normas chilenas relevantes. Extintores portátiles, de acuerdo al tipo de producto peligroso Capacitación a los choferes y personal de apoyo. Mantención de los vehículos en óptimo estado.

MEDIDAS DE PREVENCIÓN PARA PELIGRO DE DERRAMES DE LÍQUIDOS PELIGROSOS	
Peligro de Derrames	Medidas de Prevención
Durante el transporte hacia la planta	Mantención periódica de los estanques, válvulas e indicadores. Cumplimiento con las disposiciones del DS298/95 y normas chilenas relevantes. Capacitación de los conductores Selección de rutas apropiadas y horarios, tomando en cuenta la seguridad.
Durante carga o descarga	Estanques con pretilas de contención y recolección de producto Procedimientos e instrucciones actualizados y conocidos por operadores Supervisión de la operación.

MEDIDAS DE PREVENCIÓN PARA PELIGRO DE DERRAMES DE LÍQUIDOS

PELIGROSOS
Continuación....

Por ruptura de estanques	Estanques con pretiles de contención y recolección de producto. Inspecciones programadas de revisión de espesores de estanques. Mantenimiento periódico de pretiles, drenaje de agua lluvia acumulada.
Por rebalse de estanques	Estanques con pretiles de contención y recolección de producto Sensores conexión a sistema DCS, con alarmas. Válvulas de bloqueo
Ruptura de cañerías	Sensores conectados a DCS y alarmas. Válvulas de bloqueo y limitación de la fuga. Neutralización y contención de la fuga.
Fugas en bombas y válvulas	Sensores conectados a DCS y alarmas. Válvulas de bloqueo y limitación de la fuga. Neutralización y contención de la fuga.

MEDIDA DE PREVENCIÓN PARA PELIGRO DE FUGAS DE GASES Y VAPORES	
Peligro de Fugas de gases y vapores	Medidas de Prevención
Durante carga o descarga	Revisión periódica de sistemas de válvulas e indicadores de presión Procedimientos e instrucciones actualizadas y conocidas por operadores Supervisión de la operación.
Por ruptura de estanques o cilindros	Revisión periódica de espesores de estanques Sensores de presión conectados a DCS y alarmas Procedimientos de respuesta frente a emergencia
Por ruptura de cañerías	Sensores a DCS y alarmas Válvulas de bloqueo para limitar la fuga
Por ruptura de sellos de compresores y válvulas	Sensores a DCS y alarmas Revisión periódica de los sellos de compresores y válvulas
Falla de sistemas de alivio de presión	Sensores a DCS y alarmas Válvulas de bloqueo y limitaciones de fuga

MEDIDA DE PREVENCIÓN PARA OTROS PELIGRO	
Peligro de :	Medidas de Prevención
Accidentes de tránsito dentro de la planta	Restricciones de velocidad de circulación Señalización de límites de velocidad, dirección de tránsito Demarcación de pasos peatonales Vigilancia de tráfico interior Capacitación permanente al personal sobre seguridad de tránsito
Accidentes de tránsito en transporte desde y hacia la planta	Capacitación permanente a conductores de la Empresa y contratistas Señalización en accesos a la planta
Accidentes personales en la planta (caídas, shock eléctrico, impactos)	Normativa de Prevención de Riesgos. Permiso de trabajo seguro; tarjeta de seguro; trabajo en altura, etc. Programa permanente sobre el control de riesgos laborales Programas permanente de capacitación en prevención de riesgos Programa permanente de salud ocupacional Servicio médico de primeros auxilios, permanente en la planta Afiliación a organismos administradores Ley 16744 Análisis de riesgos periódicos. Registros de incidentes y accidentes Revisión periódica del estado de dispositivos de seguridad para el personal
Sismos mayores	Construcciones con propiedades asísmicas Sistemas de cañerías con sustentaciones elásticas Plan de parada de planta en emergencia Plan de emergencia respectivo.
Sequía (reducción del suministro de agua)	El consumo de agua está limitado por las condiciones del proceso y la escala de producción. En caso de restricciones, se deberá reducir el nivel de producción y/o implementar nuevos sistemas de recirculación del agua tratada.
Inundación de la planta	El sistema de evacuación de aguas lluvia de la planta debe ser diseñado para garantizar la no ocurrencia de inundación. Sistemas de bombeo de emergencia.
Derrumbes	Estabilización de taludes.
Temporal de viento	Edificios e instalaciones con techumbre de fibropanel Estructuras diseñadas para resistir condiciones extremas de viento
Tormenta eléctrica	Sistema de antena y/o captadores de rayos distribuidos en la planta
Acción destructiva de terceros	Medidas de seguridad en el acceso a la planta. Control perimetral para evitar ingresos no autorizados Control interno y vigilancia.

GLOSARIO

Accidente: Evento no planeado que puede derivar en daños graves a las personas (muerte, heridas graves), a la propiedad y al medio ambiente, u otras pérdidas.

Incidente: Evento no planeado que tiene potencial para transformarse en accidente (BS8800). Es un “casi accidente” que se puede identificar como una desviación no planeada de las condiciones de operación, cuyas consecuencias son menores que en el caso de un accidente. Puede tener consecuencias no deseadas en la calidad del producto.

Peligro: Una fuente o situación con potencial para dañar a las personas, la propiedad, el medio ambiente o una combinación de estos (BS 8800). Es un término que se utiliza para designar una condición física o química que puede causar daños a las personas, el ambiente o la propiedad.

Riesgo: Representa la probabilidad y las consecuencias asociadas a la ocurrencia de un evento peligroso especificado (BS 8800). Implica la posibilidad de sufrir pérdidas económicas, daños a las personas, al ambiente o a la propiedad, expresada en función de la probabilidad de ocurrencia del evento y la magnitud de las consecuencias.

Riesgo tolerable: Se refiere a un riesgo que se acepta en base al convencimiento de que el peligro se mantiene bajo control y cumple con los requerimientos legales

Seguridad: Expresa la sensación de ausencia de peligro o de un riesgo aceptable.

BIBLIOGRAFÍA

Batelle Columbus Division-AIChE/CCPS "Guidelines for Hazrd Evaluation Procedures". American Institute of Chemical Engineers. New York (1985)

Greenberg H.R., Cramer J.J. "Risk Assessment and Risk Management for the Chemical Process Industry". Van Nostrand Reinhold. New York (1991)

King R. "Safety in the Process Industries". Butterworth-Heinemann. Londres (1990)

Lagadec P. "La Civilización del Riesgo". Editorial MAPFRE. Madrid (1983)

Lees F.P. "Loss Prevention in the Chemical Industries". (2 volúmenes). Butterworth-Heinemann. Londres (1980)

Santamaría J.M., Braña P.A. "Análisis y Reducción de Riesgos en la Industria Química". Fundación MAPFRE, S.A., Madrid (1994)

ALGUNAS PALABRAS FINALES

Han transcurrido algunos años desde el momento en que comencé a escribir las primeras frases que dieron vida a este libro. A pesar de ser un período relativamente corto, los avances en cada área temática han sido significativos.

En el ámbito internacional, la Agenda 21 está a punto de cumplir una década de existencia. Si bien parte de las expectativas que se crearon en sus inicios se han visto frustradas, debido a la dificultad de lograr otros acuerdos o por la fría realidad del mundo económico que establece otras prioridades, se ha logrado avanzar en materias importantes. En Chile, se camina aceleradamente en la consolidación de un marco normativo ambiental moderno, y cada año aparecen nuevas normas de emisión y de calidad ambiental. Por otra parte, la dimensión ambiental comienza a adquirir importancia, tanto en las grandes empresas como en la pequeñas y medianas (PyME). Al momento de escribir estas páginas, alrededor de una docena de empresas nacionales han logrado certificarse ISO14001 y un número similar se encuentra en pleno proceso de certificación. Ello se suma a los esfuerzos públicos y privados que buscan fortalecer la implementación de estrategias de Producción Limpia, con especial atención a la PyME.

Varias empresas exportadoras chilenas han sentido la creciente presión del mercado en orden a mejorar su desempeño ambiental. ¿Cómo satisfacer tal demanda sin afectar la sustentabilidad económica de la empresa? No me cabe ninguna duda que la respuesta está en un mejoramiento integral del proceso productivo, maximizando la eficiencia de utilización de los recursos y minimizando las pérdidas de materiales y de energía. La experiencia demuestra que para ello no es necesario llevar a cabo grandes inversiones, ni efectuar cambios drásticos en la tecnología. Muy por el contrario, lo más probable es que un reforzamiento de las capacidades de gestión, apoyado por algunas medidas tecnológicas menores, debería ser suficientes para obtener logros importantes en el desempeño ambiental. No se debe escatimar esfuerzos para fortalecer la capacitación en aspectos técnicos y ambientales, y lograr el compromiso de todos en la tarea por mejorar y crecer.

A pesar de que los ingenieros hemos incorporado a nuestro lenguaje profesional conceptos ambientales desconocidos hace muy pocos años, aún nos queda mucho por caminar. Debemos esforzarnos para incluir la dimensión ambiental en las primeras fases del desarrollo de un proyecto, y no cometer el error de tomar decisiones acerca del proceso y de la ubicación de la planta, sin ninguna consideración ambiental. Debemos luchar contra años de práctica ingenieril donde *el fin de producir justifica los medios*, sin tomar en cuenta los costos externos. Nuestra área de responsabilidad profesional no sólo debe incluir cada etapa en la vida de un proyecto, sino que también debe considerar los efectos negativos y positivos fuera de los límites de la planta. Estamos encargados de garantizar que la actividad productiva permita generar los bienes y servicios que necesitamos para satisfacer las necesidades humanas, sin olvidar que debemos cautelar la integridad de los recursos naturales que utilizamos, resguardar la salud y la seguridad de las personas, y respetar el marco legal establecido para su

protección. Hoy tenemos las herramientas para lograr estos objetivos y gestionar el proceso productivo de manera eficaz e integral, asegurando la sustentabilidad a largo plazo.

En la actualidad, todas las universidades se encuentran abocadas a enfrentar las necesidades de formación ambiental, introduciendo nuevos cursos y carreras. Adicionalmente, la Internet nos permite navegar a través del creciente número de sitios *web*, donde las agencias ambientales gubernamentales y no gubernamentales, e instituciones del mundo académico e industrial, ponen a disposición del público general un inmenso volumen de información sobre el estado-del-arte de las ciencias y la ingeniería ambiental. Más aún, en varios de esos sitios se encuentran cursos gratuitos sobre evaluación de impacto ambiental, auditorías, sistemas de tratamientos de residuos, normativa ambiental, prevención de la contaminación, gestión ambiental, análisis de ciclo de vida, entre otros. Es muy probable que esta tendencia se acreciente, destruyendo toda excusa para cerrar los ojos y evitar aprender.

Espero que este texto introductorio, a pesar de sus limitaciones, sirva de guía a quienes quieren comenzar el proceso de aprendizaje en las herramienta de la ingeniería ambiental relevantes a la industria de procesos. Para aquellos que ya han iniciado el recorrido, espero que contribuya a ordenar los conocimientos dispersos y a incentivar la búsqueda de nuevos horizontes.

Finalmente, quiero recalcar que este libro no está dedicado a los expertos en ingeniería ambiental, ni pretende ser un Manual. Muy por el contrario, los temas se han abordado de manera general, sin profundizar en aquellos aspectos científicos y tecnológicos que se encuentran plenamente documentados en la literatura especializada. Más aún, varios tópicos no pudieron ser abordados debido a la necesidad de limitar la mirada a aquellas áreas de mayor prioridad en la actualidad. Y seguramente con el tiempo surgirán nuevos conceptos que ni siquiera han sido mencionados aquí. Desde ya, mis más sinceras disculpas.