



# INGENIERÍA AMBIENTAL

Fundamentos • Sustentabilidad • Diseño

JAMES R. MIHELICIC - JULIE BETH ZIMMERMAN

Apoyo en la



**Alfaomega**

# capítulo/Siete Ingeniería Verde

Julie Beth Zimmerman  
y James R. Mihelcic

*Este capítulo se enfoca en una estructura de diseño para la ingeniería verde llamado los 12 principios de la ingeniería verde y resalta las propuestas clave para la promoción de la sustentabilidad a través del diseño de ingeniería. El capítulo se basa en los análisis previos sobre sustentabilidad, métrica, procesos generales de diseño y retos de la sustentabilidad. La propuesta actual del diseño, manufactura y disposición se comenta en el contexto de los ejemplos y casos de estudio de varios sectores. Esto proporcionará una base para identificar qué considerar y cómo direccionar esas consideraciones cuando los productos, procesos y sistemas de diseño contribuyen a promover la sustentabilidad. Los temas de diseño de ingeniería fundamentales que serán direccionados incluyen las alternativas de toxicidad y benignas, la prevención y reducción de fuente de contaminación, separaciones y desmontaje, flujos y eficiencias de material y energía, análisis de sistemas, biomimetismo, y diseño, manejo y análisis del ciclo de vida.*

## Secciones principales

- 7.1 ¿Qué es la “Ingeniería Verde”?
- 7.2 Diseño
- 7.3 Prevención de la contaminación, diseño para el ambiente, ecología industrial, sustentabilidad
- 7.4 Conceptos fundamentales
- 7.5 Medición de la sustentabilidad
- 7.6 Políticas que rigen la ingeniería verde y la sustentabilidad
- 7.7 Diseño de un futuro sustentable

## Objetivos de aprendizaje

1. Definir a la Ingeniería Verde y articular las metas de esta propuesta.
2. Describir la importancia y los beneficios de la propuesta de la Ingeniería Verde desde una perspectiva de diseño.
3. Resumir las diferencias y beneficios de los niveles en la jerarquía de prevención de contaminación.
4. Comentar estrategias clave para el diseño sustentable, incluyendo inherencia, resiliencia, pensamiento sistémico y el diseño de servicios en lugar de entidades físicas.
5. Hacer un diagrama de un sistema complejo con vueltas de retroalimentación.
6. Aplicar el costo del ciclo de vida para determinar el valor tiempo del dinero para pagos simples y anualidades.
7. Describir los componentes de una evaluación del ciclo de vida (LCA) y desempeñar una LCA comparativa, incluyendo una declaración de meta, definición de unidad de función/funcional y pasos de evaluación de inventario y análisis.
8. Desarrollar indicadores de sustentabilidad para un producto dado, proceso o sistema.
9. Articular los diversos mecanismos de políticas para fomentar la implementación de la Ingeniería Verde.



## 7.1 ¿Qué es la “ingeniería verde”?

Los ingenieros juegan un papel significativo y vital en casi todos los aspectos de nuestras vidas. Proporcionan servicios básicos como agua, saneamiento, movilidad, energía, alimentos, cuidados a la salud y protección en adición a avances como la comunicación en tiempo real y la exploración del espacio. La implementación de todos estos logros de ingeniería puede llevar a beneficios así como a problemas en términos de la economía, la sociedad (particularmente la salud humana) y el medio ambiente, los tres pilares de la sustentabilidad.

La **Ingeniería Verde** es el diseño, descubrimiento e implementación de soluciones de ingeniería con una conciencia de los beneficios potenciales y los problemas en términos del medio ambiente, la economía y la sociedad a través del tiempo de vida del diseño. La propuesta de la Ingeniería Verde es escalable y aplica a través de diseño molecular, de productos, de proceso y de sistema. Esta propuesta es tan amplia como las disciplinas de la ingeniería por sí mismas y se basa en las tradiciones de la innovación, creatividad y brillantez que los ingenieros utilizan para encontrar nuevas soluciones a cualquier reto. La meta de la Ingeniería Verde es la de minimizar los impactos adversos y simultáneamente maximizar los beneficios a la economía, la sociedad y el medio ambiente.

Los impactos adversos del diseño de ingeniería convencional, con frecuencia implementados sin una perspectiva de sustentabilidad, pueden encontrarse a nuestro alrededor en la forma de ineficiencias de uso del agua, agotamiento de materiales finitos y recursos de energía, congestión urbana y degradación de sistemas naturales como resultado de la actividad humana. Los beneficios mutuos resultantes del diseño de la ingeniería verde incluyen una economía competitiva y en crecimiento en el mercado mundial, calidad de vida mejorada para todas las especies, y protección y restauración mejorada de los sistemas naturales.

### Recuadro / 7.1 Los 12 principios de la Ingeniería Verde

1. Los diseñadores necesitan procurar garantizar que todas las entradas y salidas de material y energía sean tan inherentemente no peligrosas como sea posible.
2. Es mejor prevenir los residuos que tratar o limpiar los residuos después de que se han formado.
3. Las operaciones de separación y purificación deben ser un componente del marco de diseño.
4. Los componentes del sistema (productos, procesos y sistemas) se deben diseñar para maximizar la masa, la energía y la eficiencia temporal.
5. Los componentes del sistema se deben jalar hacia afuera en vez de ser empujados hacia adentro a través del uso de energía y materiales.
6. La entropía incrustada y la complejidad deben ser vistas como una inversión a la hora de tomar decisiones de diseño sobre reciclaje, reutilización o disposición benéfica.
7. La durabilidad pretendida, no la inmortalidad, debe ser un objetivo de diseño.
8. El diseño para la capacidad o aptitudes innecesarias se debe considerar como una falla de diseño. Esto incluye las soluciones de ingeniería de “un tamaño le queda a todos”.
9. Los productos multicomponentes deben procurar la unificación de materiales para promover el desmontaje y la retención de valor (minimizar la diversidad de material).
10. El diseño de procesos y sistemas debe incluir la integración de la interconectividad con los flujos de materiales y energía disponibles.
11. La métrica de desempeño incluye el diseño para el desempeño en la vida comercial “después de”.
12. El diseño debe estar basado en las entradas renovables y fácilmente disponibles durante el ciclo de vida.

(Anastas y Zimmerman, 2003)

Los **principios de la Ingeniería Verde** (Anastas y Zimmerman, 2003), listados en el recuadro 7.1, proporcionan una estructura para el entendimiento de la ingeniería verde. También representan técnicas que se pueden utilizar para hacer más sustentables las soluciones de ingeniería. Los estudiantes deberían revisarlas cuidadosamente y ver cómo cada principio encaja en su disciplina de ingeniería particular. Los 12 principios deben considerarse no como reglas, leyes o estándares inviolables. Son, al contrario, un conjunto de lineamientos para pensar en términos de criterios de diseño sustentable que, si se siguen, pueden guiar a avances útiles en términos de retos de sustentabilidad y diseño mejorado para un amplio rango de problemas de ingeniería.

En un sistema complejo puede haber sinergias en las que el progreso hacia lograr la meta de un principio mejorará el progreso hacia otros principios diversos. Otros casos pueden requerir pros y contras entre la aplicación de dos principios que pueden ser resueltos sólo por las opciones y valores específicos de los practicantes dentro del contexto de la sociedad. Al final, la estructura de los 12 principios es una herramienta para ayudar *concientemente y transparentemente* en el direccionamiento de las opciones de diseño relevantes para los retos de sustentabilidad.

## 7.2 Diseño

Incrustado en la práctica de la Ingeniería Verde está la palabra *diseño*. El **diseño** es la etapa de la ingeniería en donde la mayor influencia puede ser lograda en términos de egresos sustentables. En la etapa de diseño, los ingenieros son capaces de seleccionar y evaluar las propiedades del egreso final. Esto puede incluir ingresos materiales, químicos y de energía; la efectividad y la eficiencia; la estética y la forma y, las especificaciones pretendidas como la calidad, la seguridad y el desempeño.

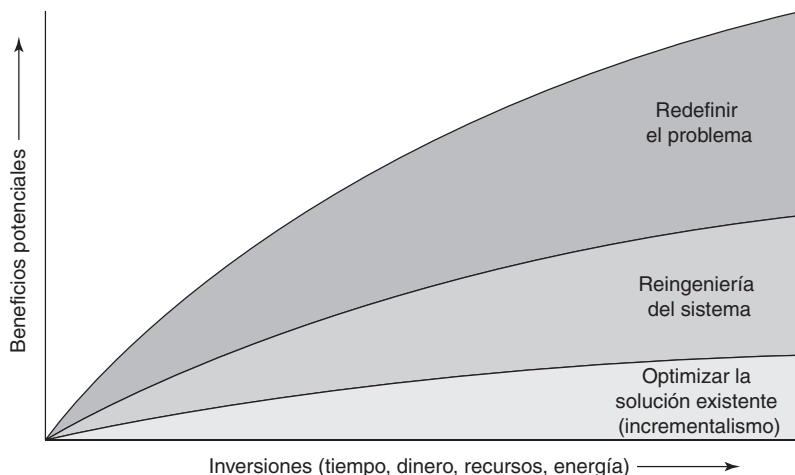
La etapa de diseño también representa el tiempo para la innovación, lluvia de ideas y creatividad, ofreciendo una oportunidad para integrar las metas de sustentabilidad en las especificaciones del producto, proceso o sistema. La sustentabilidad *no* debe ser vista como una restricción de diseño. Debe ser utilizada como una *oportunidad* para que las ideas o diseños existentes salten y conduzcan soluciones innovadoras que consideran los beneficios e impactos sistemáti-

### Guía de vehículos verdes

<http://www.epa.gov/greenvehicles/Index.do>

### Vehículos verdes 101

[http://www.ucsusca.org/clean\\_vehicles/clean\\_vehicles\\_101/](http://www.ucsusca.org/clean_vehicles/clean_vehicles_101/)



**Figura 7.1 Beneficios potenciales crecientes con grados crecientes de libertad de diseño para una inversión dada** Advierta que el permitir un número incrementado de grados de libertad para resolver un problema libera más espacio de diseño para innovar y generar soluciones sustentables.

cos durante la vida del diseño. Este potencial se muestra en la figura 7.1. La figura 7.1 demuestra que el permitir un número incrementado de grados de libertad para resolver un reto, direccionar una necesidad, o proporcionar un servicio crea mayor espacio de diseño para generar soluciones sustentables.

Para una inversión dada (tiempo, energía, recursos, capital) se pueden realizar beneficios potenciales. Estos beneficios incluyen aumento de cuota de mercado, impacto ambiental reducido, daño a la salud humana minimizado y calidad de vida mejorada. En el caso en que las restricciones requieren mera optimización de la solución existente o hacer mejoras de incremento, algunas modestas ganancias pueden lograrse. Sin embargo, si los grados de libertad dentro del espacio de diseño pueden incrementarse, se pueden realizar más beneficios. Esto es porque el ingeniero tiene una oportunidad de diseñar una nueva solución que puede parecer muy diferente en forma pero proporciona el mismo servicio. Esto puede tener retos si el nuevo diseño está demasiado incrustado en un sistema existente y restringido. Finalmente, los mayores beneficios pueden lograrse cuando el ingeniero diseña con los máximos grados de libertad (en la escala de sistema más alta) para asegurar que cada componente dentro del sistema sea sustentable, se desempeñe con los otros componentes del sistema y cumpla con el propósito global que se pretende.

### ejemplo/7.1 Grados de libertad y diseño sustentable

En el 2004, las millas promedio por galón de un coche en carretera estadounidense era de 22. En respuesta a cuestiones acerca del cambio climático global, los ingenieros están trabajando hacia un diseño más innovador para mejorar el millaje de gasolina y reducir las emisiones de dióxido de carbono. ¿Cuáles son las oportunidades de diseño para el mejoramiento a escala con los crecientes grados de libertad y cuáles son los beneficios potenciales?

### solución

La tabla 7.1 muestra tres soluciones de diseño. A medida que los grados de libertad en el diseño se incrementan, los ingenieros en este ejemplo tienen más flexibilidad para innovar una solución al problema.

**Tabla / 7.1**

**Tres soluciones de diseño investigadas en el ejemplo 7.1**

Grados de libertad crecientes  
→

	Mejora incremental	Reingeniería del sistema	Redefinición de los límites del sistema
Solución de diseño	Mejorar la eficiencia del motor Carnot; utilizar materiales de peso más ligero (compuestos en vez de metales)	Utilizar un sistema híbrido eléctrico o de celda de combustible; cambiar la forma del carro para una aerodinámica mejorada; capturar el calor y la energía de desperdicio para su reutilización.	Cumplir con las necesidades móviles sin auto individual; implementar un sistema de transporte público; diseñar comunidades de tal manera que los distritos comerciales y los empleos se encuentren a una distancia que se pueda caminar o andar en bicicleta; proporcionar acceso a los bienes y servicios deseados sin transportación vehicular.

(Continúa)

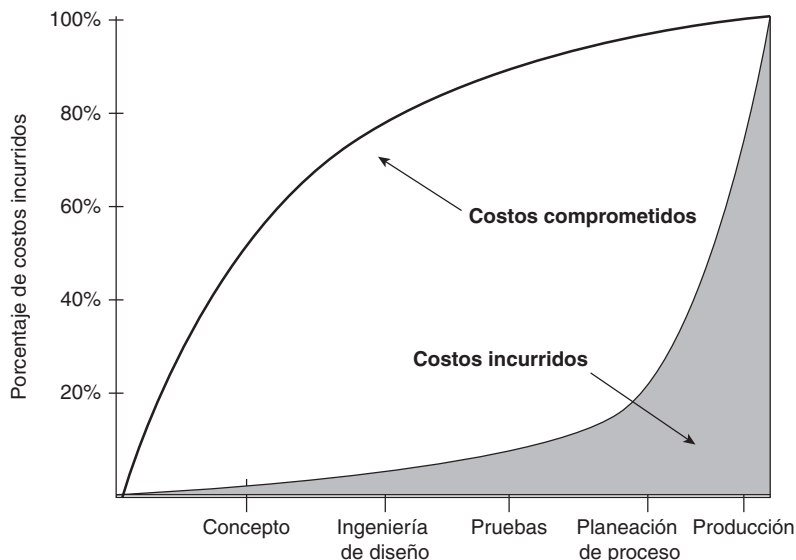
## ejemplo/7.1 Continuación

Tabla / 7.1

	Mejora incremental	Reingeniería del sistema	Redefinición de los límites del sistema
Beneficios potenciales realizados	Ahorro de combustible moderado; reducciones moderadas de emisiones de CO <sub>2</sub>	Ahorros de combustible mejorados; reducciones mejoradas de emisiones de CO <sub>2</sub> eficiencia de material y energía mejorada.	Eliminación de los impactos ambientales asociados con el ciclo de vida total del automóvil; ahorros de combustible y reducciones de CO <sub>2</sub> maximizados; infraestructura mejorada; desarrollo más denso (crecimiento inteligente); salud de sociedad mejorada por la caminata y menor contaminación del aire.

La fase de diseño ofrece oportunidades únicas en el ciclo de vida de un producto, proceso o sistema de ingeniería. Como se muestra en la figura 7.2, es en la fase de diseño de un producto típico en donde alrededor de 70 a 75% del costo se establece, aún cuando estos costos no serán realizados hasta mucho después en el ciclo de vida del producto. Los costos ambientales son análogos a los económicos. Por ejemplo, es también en la fase de diseño cuando se especifican los materiales. Esto con frecuencia dicta el proceso de producción así como los procesos de operación y mantenimiento (por ejemplo, pintura, revestimiento, resistencia a la corrosión, limpieza y lubricación).

Tan pronto como el material se especifica como una decisión de diseño, el ciclo de vida total de ese material de la adquisición hacia el procesamiento y el final de la vida ahora se incluye como parte de los impactos



**Figura 7.2** Porcentaje de costos incurridos contra línea de tiempo de diseño. Los costos pueden considerarse como económicos o ambientales. Durante la fase de diseño, aproximadamente 70% del costo se fija para el desarrollo, manufactura y uso.

ambientales del producto, proceso o sistema diseño. Por lo tanto, es en la fase de diseño que el ingeniero tiene la mayor habilidad de afectar los impactos ambientales asociados con la salida final. Este proceso es similar para el diseño de una infraestructura tal como los sistemas de provisión de agua, las plantas de tratamiento de aguas residuales, las construcciones, los sistemas de transportación y el desarrollo residencial o comercial.

Como ejemplo, piense en todos los materiales y productos que se utilizan para la construcción y para amueblar una construcción. En este punto, el ingeniero necesita tener la visión del futuro con respecto a cómo estos materiales se mantendrán, qué agentes de limpieza se usarán, cuáles serán las demandas de agua y de energía de la construcción, qué pasará con la construcción después de que haya terminado su vida útil, y cuál será el destino de estos materiales al final de la vida de la construcción. En términos de sistemas de transportación, un ingeniero puede pensar más allá del diseño de una nueva carretera que pretende liberar la congestión urbana, porque en muchas áreas, el potencial de volumen de carretera incrementado lleva a crecimiento incrementado, lo cual a cambio puede llevar a más tráfico y carreteras congestionadas.

También es importante advertir que en la fase de diseño es cuando el ingeniero tiene la oportunidad de incorporar eficiencia incrementada; reducir el desperdicio de agua, materiales y energía; reducir costos y, lo más importante, impartir nuevos desempeños y capacidades. Mientras que muchos de los otros atributos listados pueden lograrse a través de las tecnologías de control de final de la tubería, sólo en la fase de diseño se pueden cambiar las características reales del producto, proceso o sistema. Por ejemplo, en el capítulo 6 se comentó cómo las simples sustituciones de materiales pueden eliminar la exposición a los químicos.

El añadir nuevos desempeños y aptitudes ha mejorado con frecuencia las características ambientales mientras que ofrecen la oportunidad para la competitividad mejorada y el costo de mercado, mejorando el diseño por muchas razones. Simplemente al controlar o minimizar el desperdicio a través de la manufactura o aún al término de la vida no se puede alterar o mejorar la naturaleza fundamental del diseño. Cuando el diseño por sí solo es mejorado a través de los principios de innovación y sustentabilidad, se añade valor al mismo tiempo que ofrece un perfil mejorado de salud ambiental y humana.

### 7.3 Prevención de la contaminación, diseño para el ambiente, ecología industrial, sustentabilidad

Sin importar su naturaleza, el desperdicio consume recursos, tiempo, esfuerzo y dinero, primero en su creación y luego en su manejo y gestión. Los desperdicios peligrosos requieren aún mayores inversiones para su monitoreo y control. Como se ha dicho previamente, la creación, manejo, almacenaje y disposición de desperdicios *no añade valor* al producto o servicio. En adición, los mecanismos tradicionales de manejo de desperdicios con frecuencia mueven desperdicios de un medio a otro, como el agua o como el relleno sanitario.

Mientras que la eficiencia siempre ha sido un aspecto fundamental del buen diseño de ingeniería, el estado actual de nuestra infraestructura de proceso y producto puede plantearnos la pregunta qué tan bien esta regla

de diseño ha sido histórica o sistemáticamente aplicada. Se podría argumentar que durante el siglo xx, la ingeniería se enfocó mucho más en estrategias de diseño para lidiar con desperdicios como el tratamiento o disposición, en lugar de tecnologías innovadoras disruptivas basadas en eficiencias. En respuesta a los reglamentos, subsidios, leyes y capital invertido, se hizo mucho más importante hacer que los procesos ineficientes e insustentables existentes continuaran a través del uso de intervenciones tecnológicas elegantes y caras en lugar de entablarse en el diseño fundamentalmente eficiente y sustentable. El resultado de propuesta sesgada es un extenso portafolio de ingeniería sobre las maneras de monitorear, controlar y remediar el desperdicio.

La ingeniería verde pretende reenfocar estos esfuerzos en diseños eficientes y sustentables. Esto significa evitar el desperdicio en primer lugar en donde quiera que sea practicable y eliminar el concepto de desperdicio en donde quiera que sea posible.

La **prevención de la contaminación** está enfocada en el incremento de la eficiencia de un proceso para reducir la cantidad de contaminación generada. Esta es la idea del incrementalismo o la **ecoeficiencia**, en donde el sistema actual es ajustado para ser mejor que antes. Esto no toma en cuenta que el diseño actual puede no ser el mejor o el más apropiado para la aplicación actual. Esto es, el producto, proceso o sistema actual no fue diseñado con la intención de reducir el desperdicio y el impacto ambiental. Al contrario, se está mejorando dentro de sus restricciones actuales, tomando estas consideraciones en cuenta después del hecho, después de que el diseño se ha completado y con frecuencia implementado.

La Ley de prevención de contaminación de 1990 (vea el recuadro 7.2) pasó a prevención de contaminación *fomentada* (no regulada) en Estados Unidos. Establece una **jerarquía de prevención de contaminación** (figura 7.3) como sigue:

- **Reducción de fuente**—El desperdicio (sustancia peligrosa, agente tóxico o contaminante) debe ser evitado desde la fuente (antes del reciclaje, tratamiento o disposición).

## P2 en EPA

<http://www.epa.gov/p2>



### Discusión en clase

¿Cómo difiere la prevención de la contaminación y la minimización de desperdicios de la ingeniería verde?

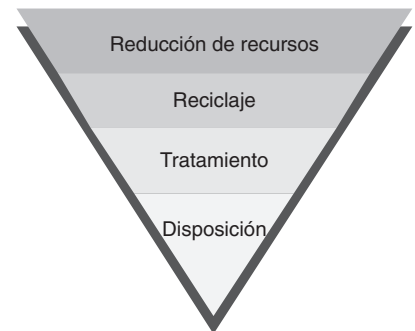


Figura 7.3 Jerarquía de prevención de contaminación

## Recuadro / 7.2 Ley de prevención de contaminación de 1990

La Ley de prevención de contaminación enfocó la atención de la industria, gubernamental y pública en reducir la cantidad de contaminación a través de cambios efectivos en costo en la producción, operación y uso de materias primas. Las oportunidades para la reducción de fuente con frecuencia no se realizan debido a los reglamentos existentes, y a los recursos industriales requeridos para el cumplimiento se enfocan en el tratamiento y la disposición. La reducción de fuente es fundamentalmente diferente de y más deseable que el manejo de desperdicios o el control de contaminación (2 U.S.C. 13,101 y 13,102, s/s et seq., 1990).

*El Congreso en este acto declara ser la política nacional de Estados Unidos que la contaminación deberá ser*

*prevenida o reducida en la misma fuente en donde sea factible; la contaminación que no puede ser evitada o reciclada debe ser tratada en una manera ambientalmente sana cuando sea factible; y la disposición u otra liberación en el medio ambiente debe ser empleada solo como último recurso y debe ser conducida en una manera ambientalmente sana.*

(2 U.S.C. 13,101b)





### Discusión en clase

La jerarquía de prevención de contaminación claramente muestra que la reducción de fuente es favorecida por sobre los otros tres aspectos de la prevención de contaminación. La disposición es la alternativa menos preferida. ¿Cómo se relaciona la jerarquía de prevención de contaminación con el tratamiento de aguas residuales industriales y el manejo de desperdicio sólido?

### ¿En dónde puedo reciclar mis cosas?

<http://earth911.com>

### Cero desperdicio

<http://zerowaste.ca.gov/>

- **Reciclaje.** El desperdicio generado debe ser reutilizado ya sea en el proceso en el que fue creado o en otro proceso.
- **Tratamiento.** El desperdicio que no puede ser reciclado debe ser tratado para reducir su riesgo.
- **Disposición.** El desperdicio que no es tratado debe ser dispuesto en una manera ambientalmente sana.

En el caso de tratamiento de aguas residuales, la jerarquía de prevención de contaminación sugiere que se deben enfocar los esfuerzos en las maneras de identificación para evitar que los materiales de desperdicio sean desaguados y transportados a una planta de tratamiento, en vez de dedicar todos nuestros esfuerzos a la mejora del diseño de las instalaciones de tratamiento. En términos de manejo de desperdicio sólido, es claro que la disposición en rellenos sanitarios no es la alternativa recomendada para manejar una corriente de desperdicio. En este caso, un ingeniero pensaría más allá del diseño de un relleno sanitario y se enfocaría en iniciativas más amplias para reducir la cantidad de desperdicio que se genera y se descarta.

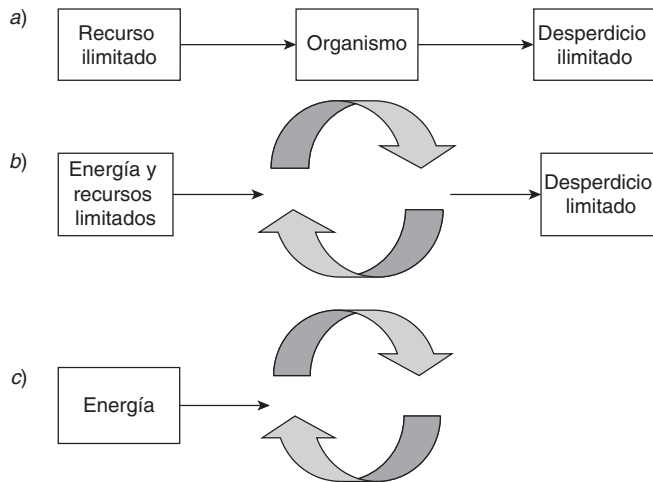
El permitir más grados de libertad de diseño y al moverse corriente arriba hacia oportunidades para rediseñar el producto, proceso o sistema, ofrece una mayor oportunidad de **minimización de desperdicio** o aún la eliminación de desperdicio. Mientras existen muchas barreras actuales, incluyendo la científica, técnica o económica, para el diseño de cero desperdicio es importante advertir que el concepto de desperdicio es humano. En otras palabras, no hay nada inherente en los materiales, energía, espacio o tiempo que los haga desperdiciarse. Se desperdician sólo porque aún nadie ha imaginado o implementado un uso definido para éstos.

Si la creación de desperdicio no puede ser evitada bajo ciertas condiciones o circunstancias, los diseñadores e ingenieros pueden considerar mecanismos alternativos para explotar efectivamente estos recursos para propósitos de valor agregado. Por ejemplo, el desperdicio podría utilizarse benéficamente como materia prima al capturarlo y reciclarlo/reutilizarlo dentro del proceso, la organización o más allá. Esto da un costo y responsabilidad a los ahorros y beneficios. O tal vez el desperdicio de construcción podría ser capturado en el sitio, en lugar de descartarlo hacia un relleno sanitario, para que pueda ser repropuesto para otras aplicaciones de la construcción.

Es importante considerar que los materiales y energía que se utilizaron y ahora son “desperdicio” tienen entropía incrustada y complejidad representando una inversión en costo y recursos. Esto indica que la recuperación de desperdicio como una materia prima representa beneficios potenciales ambientales y económicos.

La **ecología industrial** es el desplazamiento de los procesos industriales de sistemas (sistemas tipo 1) lineares (vuelta abierta), en los que las inversiones de recursos y capital se mueve a través del sistema para volverse desperdicios, a sistemas de vuelta cerrada en donde los desperdicios se vuelven entradas para nuevos procesos (sistemas tipo 3) (Graedel y Allenby, 1995). La figura 7.4 muestra la diferencia entre los sistemas tipo 1, 2 y 3. Advierta que los sistemas tipo 2 tienen algo de ciclo y generan algún desperdicio. Los sistemas tipo 3 se basan en sistemas naturales en donde no hay desperdicio alguno. En su lugar, cualquier desperdicio producido en la naturaleza se vuelve una fuente de alimentación o nutrientes para otras especies o procesos naturales.

Piense si los procesos que le son familiares son de los tipos de sistemas 1, 2 o 3. Por ejemplo, el tratamiento convencional de aguas residuales es un



**Figura 7.4 Esquema de los ecosistemas tipo 1, 2 y 3** En este ecosistema, los desperdicios son reciclados de vuelta hacia el sistema. *a)* El ecosistema tipo 1 es un sistema industrial tradicional en donde las inversiones de recursos y capital se mueven a través de un sistema para convertirse en desperdicios. *b)* El ecosistema tipo 2 tiene algo de ciclo y genera algo de desperdicio. *c)* El ecosistema tipo 3 es un sistema de vuelta cerrada en donde los desperdicios se vuelven entradas para nuevos procesos.

ecosistema tipo 2 en el sentido de que algunos de los materiales de desperdicio son reciclados (por ejemplo, la aplicación en el suelo de los biosólidos y el uso de metano generado por digestión anaeróbica para proporcionar calor o electricidad). Sin embargo, estos sistemas pueden aún dispersar nutrientes de nitrógeno y fósforo (una vez concentrados en entradas de alimento) a ambientes acuáticos. En esta situación, los nutrientes añadidos no sólo lastiman la calidad del agua, sino que se hacen difíciles de remediar una vez que se acumulan en los sedimentos. Para que una planta de tratamiento de aguas residuales convencional se mueva hacia un ecosistema tipo 3, el ingeniero podría considerar la modificación de la planta para transformar el nitrógeno de amonio acuoso a nitrógeno líquido vía las reacciones de nitrificación y desnitrificación. También podría haber una reutilización del agua tratada para el consumo humano, la agricultura, las necesidades de paisaje y el soporte de los ecosistemas.

El desperdicio puede ser eliminado a través del diseño de las tecnologías disruptoras que se mueven hacia productos sustentables, procesos o sistemas que inherentemente reducen las entradas innecesarias o los riesgos asociados con aquellas entradas al mismo tiempo que aún logran la consecución del egreso deseado. Otra estrategia para eliminar el concepto de desperdicio es la de diseñar moléculas, productos, procesos y sistemas para incorporar todas las entradas. Estas estrategias sugieren que el diseño de ingeniería con la intención de que todos los recursos utilizados estén en inversiones deseables, con valor agregado. Esta propuesta tiene beneficios ambientales y económicos en términos de la reducción de los impactos del ciclo de vida al eliminar los costos y los impactos de los recursos y los costos asociados de procuración y disposición para entradas que ya no son necesarias.



#### Discusión en clase

¿Puede usted pensar acerca de otros sistemas municipales o industriales que sean ecosistemas ya sea tipo 1 o tipo 2?

### ejemplo/7.2 Ecosistema tipo 2 aplicado a un relleno sanitario

Con base en las prácticas ambientales actuales, dibuje una figura para mostrar cómo el manejo de desperdicios sólidos municipales es un ejemplo de un ecosistema tipo 2.

### solución

La figura 7.5 muestra cómo el manejo de desperdicio sólido municipal es un ejemplo de un ecosistema tipo 2. Actualmente, 17% del desperdicio sólido municipal es incinerado para recuperar energía (la que algunos consideran como una forma de reciclaje o reutilización), 27% se recicla (aluminio, vidrio, papel) y composta (materia orgánica, recortes del jardín, desperdicio de alimentos) y 56% se envía a rellenos sanitarios.

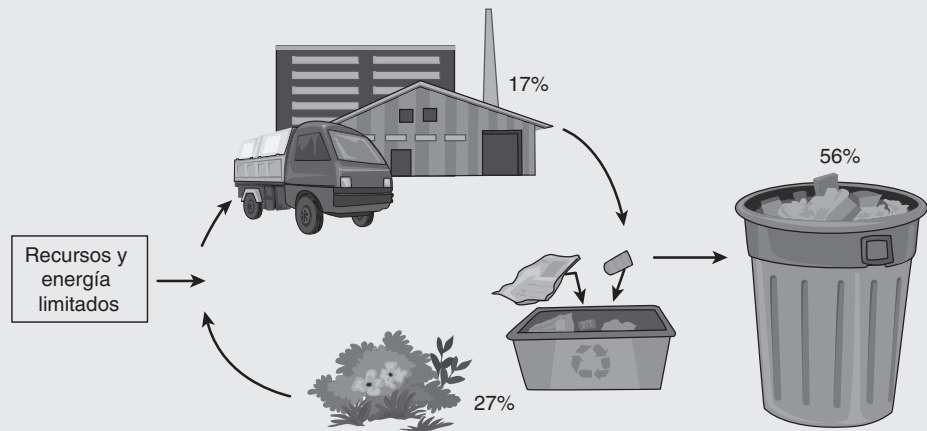


Figura 7.5 Ejemplo de cómo el manejo de desperdicio sólido municipal es un ecosistema tipo 2

El **diseño para el medio ambiente (DFE)** o el **ecodiseño**, es una propuesta a un diseño en el que las cargas ambientales son intencionalmente consideradas y eliminadas en donde sea posible en la fase de diseño. Las estrategias de DFE incluyen reducción de fuente, recuperación de material, y cuando éstas fallan, el uso de materiales tratables como opuesto a materiales no tratables. La tabla 7.2 proporciona diversos métodos para introducir estas estrategias.

Cuando los impactos sociales, económicos y ambientales se consideran para largo plazo en la fase de diseño, el esfuerzo puede considerarse como un diseño sustentable. Recuerde que, como se comentó en el capítulo 1, la meta de sustentabilidad es alinear simultáneamente y adelantar beneficios para la sociedad, la economía y el medio ambiente. Esta estrategia va más allá de la prevención de la contaminación y el DFE para realizar beneficios aún más grandes para las generaciones actuales y futuras.

### Diseño de la EPA para un programa ambiental

<http://www.epa.gov/oppt/dfel/>

Tabla / 7.2

**Estrategias de diseño para el medio ambiente (DFE) para la eliminación de cargas ambientales**

- Cambios en la selección de materiales
- Cambios en la selección de equipo; opciones de compra mejoradas
- Prácticas de operación mejoradas
- Prácticas mejoradas de recuperación y disposición
- Logística mejorada

FUENTE: Cooper, 1999.

## 7.4 Conceptos fundamentales

La Ingeniería Verde y el diseño sustentable involucran diversos conceptos fundamentales, incluyendo la inherencia, el ciclo de vida, pensamiento sistémico, resiliencia, criterios de desempeño, proporcionar servicios y análisis financiero. Esta sección trata cada uno de estos conceptos a mayor detalle.

### 7.4.1 INHERENCIA

Como se mostró en la ecuación de riesgo del capítulo anterior, el **riesgo** es una función de peligro y exposición:

$$\text{Riesgo} = f(\text{peligro, exposición}) \quad (7.1)$$

En la química verde, el riesgo es minimizado al reducir o eliminar el peligro. A medida que el peligro intrínseco es reducido, existe una menor dependencia de los controles de exposición y por lo tanto menor probabilidad de falla. La meta final serían los materiales o químicos completamente benignos de tal manera que no exista necesidad de controlar la exposición. Esto es, los químicos y los materiales no causarían daño si fueran liberados hacia el ambiente o los seres humanos fueran expuestos a ellos. Los avances que se están haciendo en el movimiento hacia los químicos inherentemente benignos a través de la química verde son significativos y dramáticos.

La **química verde**, la cual surgió como un área cohesiva de investigación en 1991, se define como el diseño de productos y procesos que reducen o eliminan el uso y la generación de sustancias peligrosas. La propuesta de la química verde fue delineada en el marco de los *12 principios de la química verde* (Anastas y Warner, 1998) y ha funcionado como el documento lineal para el campo. La química verde es uno de los campos más fundamentales relacionados con la ciencia y la tecnología para la sustentabilidad que se enfoca en el nivel molecular para diseñar los químicos y los materiales para que sean inherentemente no peligrosos.

La investigación fundamental de la química verde ha sido traída para soportar un diverso conjunto de retos, incluyendo la energía, la agricultura, los farmacéuticos y el cuidado de la salud, la biotecnología, la nanotecnología,

### Química verde

<http://www.epa.gov/greenchemistry>

Tabla / 7.3

## Ejemplos de química verde

- Un agente extintor de fuego dramáticamente más efectivo que elimina halón y utiliza agua en combinación con un surfactante avanzado.
- La producción de ingredientes activos de gran escala es la generación típica de miles de libras de desperdicio tóxico por libra de producto.
- La eliminación de arsénico de los protectores de madera que se utilizan en la madera aplicada a las cubiertas del hogar y el equipo de parques infantiles.
- La introducción de la primera materia prima plástica biobasado que tiene las cualidades de desempeño necesarias para una aplicación de multimillones de libras como un empaque de comida.
- Un nuevo sistema de solvente que elimina el uso en gran escala de agua ultrapura en la manufactura de chips de computadora, reemplazándolo con el dióxido de carbono líquido, lo que permite la producción de chips de siguiente generación.

productos de consumo y materiales. En cada caso, la química verde ha demostrado exitosamente que reduce el peligro intrínseco, que mejora la eficiencia de material y de energía, y que arraiga una perspectiva del ciclo de vida. La tabla 7.3 proporciona ejemplos de química verde que ilustran su amplitud de aplicabilidad.

Es claro del capítulo 6 que la toxicidad es un tema complejo con muchos factores contribuyentes. Esto refuerza la dificultad de desempeño de una evaluación de riesgo precisa. Además, demuestra que una de las mejores estrategias para mitigar el riesgo es la de reducir o eliminar el peligro intrínseco de los químicos o materiales que se diseñan para un producto dado, proceso o sistema.

También es crítico advertir que otras características de un producto, proceso o sistema (además de la toxicidad) pueden ser diseñadas para ser inherentes. Un diseño puede ser inherentemente más confiable, más durable, más resiliente y más eficiente. La intención es la de diseñar las propiedades deseables intrínsecamente, en vez de controlarlas o mantenerlas mediante circunstancias externas.

#### 7.4.2 CICLO DE VIDA

Las consideraciones del **ciclo de vida** toman en cuenta el desempeño ambiental de un producto, proceso o sistema durante todas las fases de adquisición de materias primas para refinar dichos materiales, la manufactura, el uso y el manejo de fin de vida (vea la figura 7.6a). En el caso de infraestructura de ingeniería, las etapas de vida serían el desarrollo del sitio, la entrega de materiales y producto, la manufactura de la infraestructura, el uso de la infraestructura, y la remodelación, reciclaje y disposición (vea la figura 7.6b). En algunos casos, los impactos de transportación de movimiento entre estas etapas de ciclo de vida también son considerados.

#### La iniciativa de ciclo de vida

<http://lcinitiative.unep.fr/>

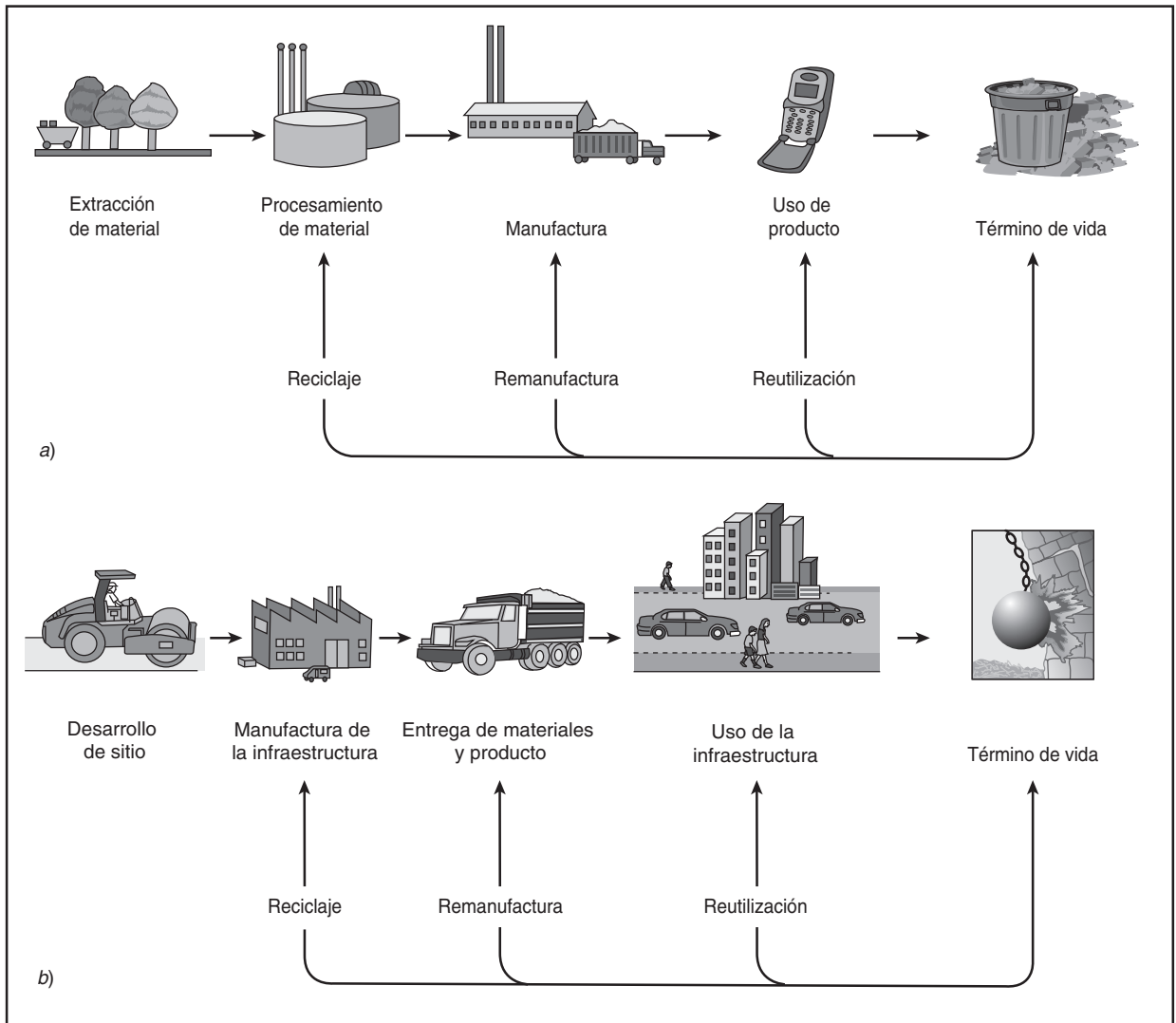


Figura 7.6 Etapas de ciclo de vida común Las etapas más comunes para a) producto manufacturado y b) infraestructura de ingeniería que hace el entorno urbanístico.

La figura 7.6a y 7.6b también muestra, como vueltas de retroalimentación, el potencial para reciclaje, remanufactura y reutilización. Mientras que los beneficios son comúnmente asociados con estas varias estrategias de manejo de término de vida, también pueden tener impactos ambientales negativos y deben estar incluidos al hacer el diseño o diseños de mejora y cálculos de ciclo de vida.

El ciclo de vida total debe considerarse debido a que los distintos impactos ambientales pueden suceder durante distintas etapas. Por ejemplo, algunos materiales pueden tener una consecuencia ambiental adversa al ser extraídos o procesados, pero pueden ser relativamente benignos en el

uso y facilidad para reciclar. El aluminio es ese tipo de material. Por un lado, la fundición del mineral de aluminio es muy intensa en energía (una razón por la que el aluminio es un metal reciclado favorecido). Sin embargo, un automóvil creará el volumen de su impacto ambiental durante la etapa de uso de su ciclo de vida, principalmente debido a la combustión de combustibles fósiles pero también debido a la escorrentía de los caminos y el uso de muchos fluidos durante la operación. Y para las construcciones, aunque una vasta cantidad de agua, agregados, químicos y energía se utilizan para producir los materiales de construcción, la transportación de los mismos hacia el sitio de trabajo y la construcción de un edificio, la vasta mayoría del uso de agua y energía sucede después de la ocupación, durante la etapa de operación del ciclo de vida del edificio.

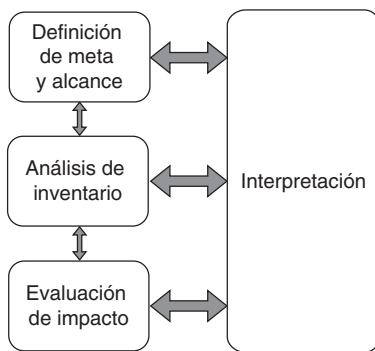


Figura 7.7 Componentes del marco de evaluación del ciclo de vida

**EVALUACIÓN AMBIENTAL DEL CICLO DE VIDA (LCA)** La idea de las consideraciones del ciclo de vida es la de proteger en contra de la aplicación de la ingeniería verde y el diseño sustentable en solo una etapa del ciclo de vida. Para capturar efectivamente estos impactos a través del ciclo de vida total del producto, proceso o sistema, se deben considerar los impactos ambientales para el ciclo de vida total, al usar una **evaluación del ciclo de vida (LCA)**.

La LCA es tecnología avanzada para examinar el impacto ambiental total a través de cada etapa del ciclo de vida. El marco de LCA se dibuja en la figura 7.7. Las LCA se pueden utilizar para identificar procesos, componentes, materiales y sistemas que son contribuyentes principales para los impactos ambientales, comparar distintas opciones dentro de un proceso particular con el objetivo de minimizar los impactos ambientales, y comparar dos productos o procesos diferentes que proporcionen el mismo servicio. Este análisis puede entonces proporcionar lineamientos en donde existen las oportunidades para las decisiones de diseño para mejorar el desempeño ambiental.

Como se muestra en la figura 7.7, el primer paso para desempeñar una LCA es definir la meta y el alcance. Esto puede cumplirse al responder las preguntas listadas en la tabla 7.4. En el primer paso de la LCA, la meta declara la aplicación y audiencia pretendidas, mientras que el alcance del estudio define la **función** o **unidad funcional**, enunciada en la tabla 7.5. La unidad funcional sirve como la base de la LCE, las fronteras del sistema y

## LCA 101

<http://www.epa.gov/nrmrl/lcaccess/lca101.html>

### Tabla / 7.4

#### Preguntas para el primer paso de una evaluación de ciclo de vida (LCA): definición de la meta y el alcance

- ¿Cuál es el propósito de la LCA? ¿Por qué se está llevando a cabo la evaluación?
- ¿Cómo serán utilizados los resultados y por quién?
- ¿Qué materiales, procesos o productos se deben considerar?
- ¿Necesitan direccionarse las cuestiones específicas?
- ¿Qué tan ampliamente las opciones alternativas serán definidas?
- ¿Qué cuestiones o preocupaciones direccionará el estudio?

### ejemplo/7.3 Marco para la evaluación del ciclo de vida

Si se le pidiera llevar a cabo una LCA para un nuevo producto de papel, ¿cuál sería una posible descripción de la meta y el alcance?

#### solución

Este problema tiene varias soluciones posibles:

##### solución 1

*Meta posible:* identificar qué etapa en el ciclo de vida de la producción de papel emite gases de invernadero significativos.

*Alcance posible:*

- Análisis de fibras de papel que tienen pulpa química.
- Limitarse a un molino de pulpa y papel.
- Llevar a cabo un análisis en una base por peso.

##### solución 2

*Meta posible:* decidir entre este nuevo producto de papel y el producto de papel actualmente utilizado

*Alcance posible:*

- Restringir el análisis a la etapa de manufactura o cada tipo de papel (suponga que las mismas prácticas de tala y los mismos rangos de reciclaje al término de la etapa de vida son idénticos para los dos tipos de papel).
- Negar cualquier material o componente que componga menos de 5% por peso del producto de papel final.
- Llevar a cabo un análisis sobre la producción de 10 000 hojas de papel.

los requerimientos y suposiciones de datos (por ejemplo, los impactos de la transportación entre las etapas del ciclo de vida serán negados).

Una vez que la meta, el alcance y la unidad funcional han sido definidas, el siguiente paso de una LCA es el de desarrollar un diagrama de flujo para

**Tabla / 7.5**

Definiciones de función y unidad funcional	
Función	Unidad funcional
Servicio proporcionado por el sistema	Medios de cuantificación de función de producción
Características de desempeño de un producto	Bases para una LCA
	Referencia para normalización de datos de entrada y salida



## ejemplo/7.4 Determinación de la función y la unidad funcional en términos de LCA

### ejemplo 1

Si se le pide llevar a cabo una LCA en dos diferentes detergentes de lavandería, ¿qué podría utilizar como la unidad funcional para el análisis?

### solución 1

La base para la LCA podría ser el peso o volumen de cada detergente de lavandería necesario para correr 1 000 ciclos de lavadora. (Esto no dice nada acerca del desempeño de los detergentes de lavandería (cómo limpiar la ropa después de lavarla) ya que se supone que sea idéntico para el propósito de la LCA.)

### ejemplo 2

Si se le pide llevar a cabo una LCA en bolsas de compras de papel contra bolsas de compras de plástico, ¿qué podría utilizar como la unidad funcional para el análisis?

### solución 2

La base de la LCA podría ser un volumen establecido de comestibles a ser cargados, en cuyo caso dos bolsas de plástico serían equivalentes a una bolsa de papel. O la unidad funcional podría estar relacionada con el peso de los comestibles cargados, en cuyo caso necesitaría determinar si las bolsas de papel o de plástico son más fuertes y cuántas de cada una serían necesarias para cargar el peso especificado.

los procesos que se están evaluando y llevar a cabo un **análisis de inventario**. El análisis de inventario se mostró como parte del marco de la LCA en la figura 7.7. Ésta involucra la descripción de todas las entradas y salidas en el ciclo de vida de un producto, comenzando con lo que compone al producto, de dónde vinieron dichos materiales, a dónde van, y las entradas y salidas relacionadas con dichos materiales componentes durante su vida entera. También es necesario incluir las entradas y las salidas durante el uso del producto, tal como el uso de electricidad o baterías.

El propósito del análisis de inventario es el de cuantificar qué viene y qué sale, incluyendo la energía y el material asociados con cada etapa en el ciclo de vida. Las entradas incluyen todos los materiales, renovables y no renovables, y la energía. Es importante recordar que las salidas incluyen los productos deseados y los subproductos y los desperdicios como las emisiones al aire, el agua y la tierra. Mientras que algunas de estas fuentes de datos son públicos y pueden encontrarse en la internet, otras requieren



**Mercurio e iluminación**

una suscripción pagada para el acceso a los datos o se incluyen en el software de compra de evaluación del ciclo de vida.

Los datos de inventario del ciclo de vida pueden venir de muchas fuentes, incluyendo la literatura prerevisada, los fabricantes o las asociaciones profesionales y las bases de datos genéricas. Los datos pueden ser promediados para un producto (tal como el promedio para todos los métodos para producir 1 kg de vidrio) o sector (promedio para todos los productores para producir 1 gal de agua potable) para mantener las propiedades naturales de esta información para las compañías individuales.

Al llevar a cabo un análisis de inventario de ciclo de vida, es importante considerar la calidad de los datos para entradas y salidas al sistema. Los indicadores de calidad de datos incluyen la precisión, que estén completos, su representatividad, su consistencia y su reproducibilidad. La calidad de datos es especialmente importante para considerarse, ya que muchos de los datos disponibles del ciclo de vida se originan en Europa y Japón, en donde los procesos de manufactura y la energía de red mezclados para producir electricidad pueden ser diferentes que en Estados Unidos.

El tercer paso en la LCA (como se mostró en la figura 7.7) es conducir una **evaluación del impacto**. Este paso involucra la identificación de todos los impactos ambientales asociados con las entradas y salidas detalladas en el análisis de inventario. En este caso, los impactos ambientales a través del ciclo de vida se agrupan en temas amplios. Los impactos ambientales pueden incluir factores de estrés como el agotamiento de recursos, el uso de agua, potencial de calentamiento global, agotamiento del agujero de ozono, toxicidad humana, formación de smog y uso de suelo. Este paso con frecuencia involucra algunas suposiciones sobre qué impactos a la salud humana y ambientales resultarán de un escenario de emisión dado, el cual es similar a una evaluación de riesgo.

El paso final en la evaluación del impacto puede ser controversial, ya que con frecuencia involucra el pasar estas amplias categorías de impacto ambiental para arrojar un solo marcador para el desempeño ambiental global del producto, proceso o sistema que se está analizando. Esto es con frecuencia una consideración de la sociedad, la cual puede variar entre las culturas. Por ejemplo, las naciones de las islas del Pacífico Sur pueden dar mayor peso al cambio climático, dada su vulnerabilidad a elevarse a nivel del mar, mientras que otros países pueden dar mayor peso al impacto a la salud humana.

En consecuencia, el marcador de impacto total puede ser distorsionado por los factores de peso. También, para un inventario de ciclo de vida idéntico, las decisiones resultantes de la evaluación del impacto pueden variar de país a país o de organización a organización. Las evaluaciones del impacto también pueden ser desempeñadas utilizando una tarjeta de registro con *grados subjetivos* asignados como números 1-5, siendo 5 el mejor, o un sistema de graduación más visual, tal como: ✓+, ✓ y ✓-.

Finalmente, la LCA puede proporcionar una penetración hacia las oportunidades para la mejora del impacto ambiental de un producto, proceso o sistema dados. Esto puede incluir la selección de una de dos opciones o la identificación de áreas para la mejora de una sola opción. La LCA es extremadamente valiosa para asegurar que el impacto ambiental se está minimizando durante todo el ciclo de vida y que los impactos no se están cambiando de una etapa de vida a otra. Esto lleva a un sistema que está globalmente optimizado para reducir los efectos adversos para el producto, proceso o sistema específico.

### La aplicación del pensamiento de ciclo de vida a los proyectos internacionales de desarrollo de agua y saneamiento

<http://cee.eng.usf.edu/peacecorps/Resources.htm>

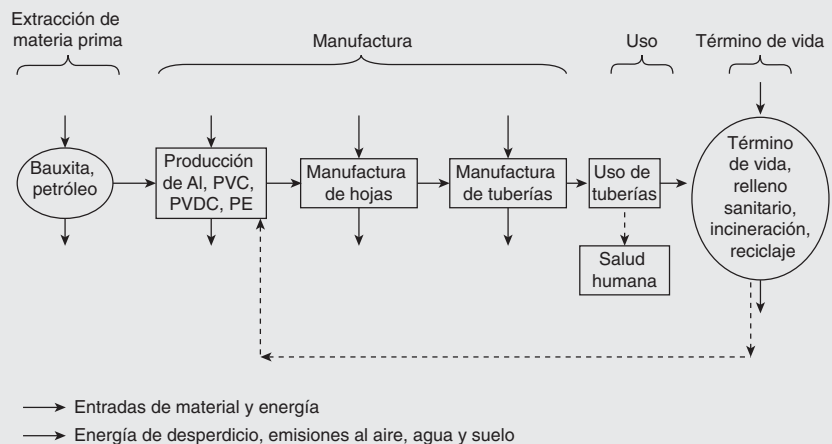
## ejemplo/7.5 Desarrollo de un análisis del ciclo de vida en materiales de tubería

El propósito de este ejemplo extendido es el de mostrar el proceso y complejidad totales al desempeñar una LCA. Se examinarán cuatro productos de tubería para este ejemplo.

### solución

Debido a que la solución a este problema es larga, hemos estructurado la solución en diez pasos.

1. **Especifique la meta del estudio:** Evaluar los impactos de ciclo de vida de cuatro diferentes productos de tubería para su uso en la distribución de agua para una nueva comunidad planeada para sustentabilidad. Los cuatro materiales de tubería son cloruro de polivinilo (PVC), cloruro de polivinilodeno (PVDC), polietileno (PE) y aluminio (Al).
2. **Especifique el alcance del estudio:** Para este ejemplo, la evaluación del ciclo de vida tendrá una frontera de sistema alrededor del ciclo de vida total, desde la extracción de la materia prima, a la manufactura, uso y el término de vida (rellenos sanitarios, incineración y reciclaje) (vea la figura 7.8).



**Figura 7.8 Frontera de sistema utilizada en el ejemplo 7.5** La frontera abarca el ciclo de vida desde la extracción de la materia prima hasta la manufactura, uso y término de vida.

3. **Determine la función:** La tubería proporciona un producto físico para transportar el agua a través del entorno urbanístico. Las propiedades deseables incluyen la capacidad de contener el medio que se está transportando, la minimización de la transferencia de calor, la vida larga y la resistencia a la degradación. Los factores como la estética, los adhesivos y los métodos de unión están fuera del alcance de este análisis de ciclo de vida.

### ejemplo/7.5 Continuación

4. **Determine la unidad funcional:** Suponga 1 000 pies de material de tubería. Los ciclos de vida de empaque son idénticos para cada uno de los cuatro productos y por lo tanto no se incluyen en este estudio. La transportación desde cada una de las cuatro instalaciones de manufactura hasta el sitio de construcción es similar y no apta, por lo tanto, no está incluida en este estudio.
5. **Desarrolle diagramas de flujo de proceso para la producción de los cuatro diferentes materiales de tubería:**

La figura 7.9 muestra el diagrama de flujo de proceso para la producción de tubería de cloruro de polivinilo (PVC).

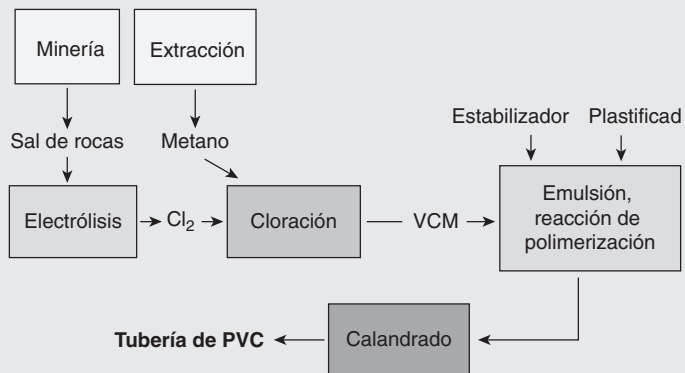


Figura 7.9 Diagrama de flujo de proceso para la producción de tubería de cloruro de polivinilo (PVC)

Figura 7.10 muestra el diagrama de flujo de proceso para la producción de tubería de cloruro de polivinilodeno (PVDC).

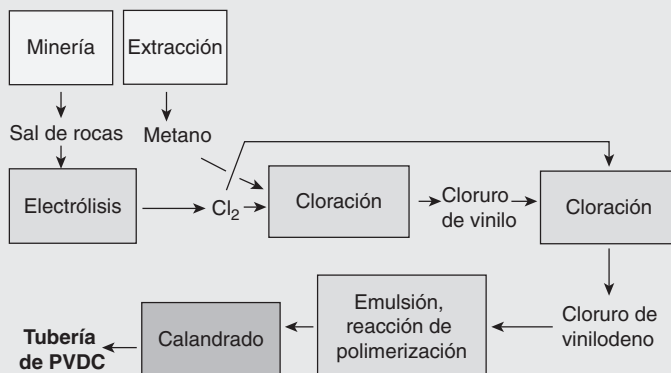
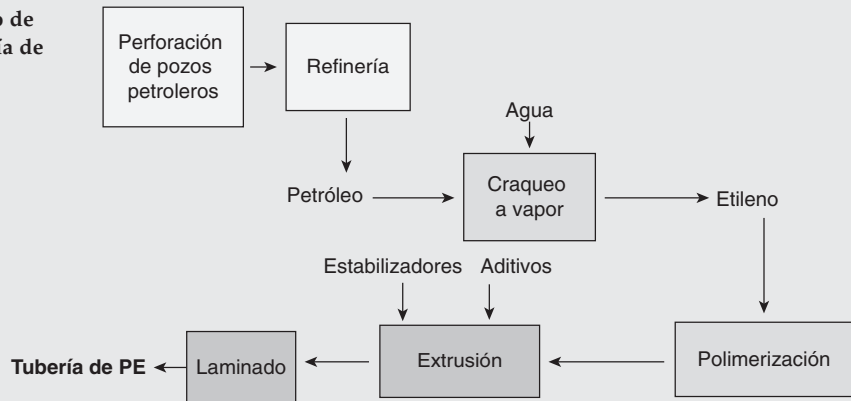


Figura 7.10 Diagrama de proceso de flujo para la producción de tubería de cloruro de polivinilodeno (PVDC)

### ejemplo/7.5 Continuación

La figura 7.11 muestra el diagrama de proceso de flujo para la producción de tubería de polietileno (PE).

Figura 7.11 Diagrama de proceso de flujo para la producción de tubería de polietileno (PE)



La figura 7.12 muestra el diagrama de proceso de flujo para la producción de tubería de aluminio (Al).

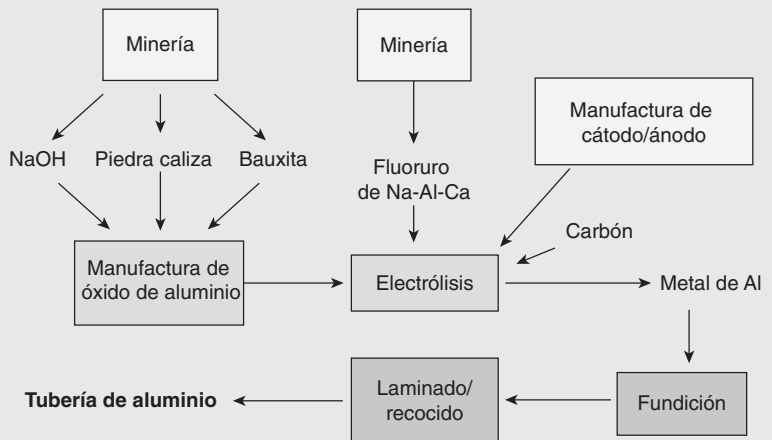


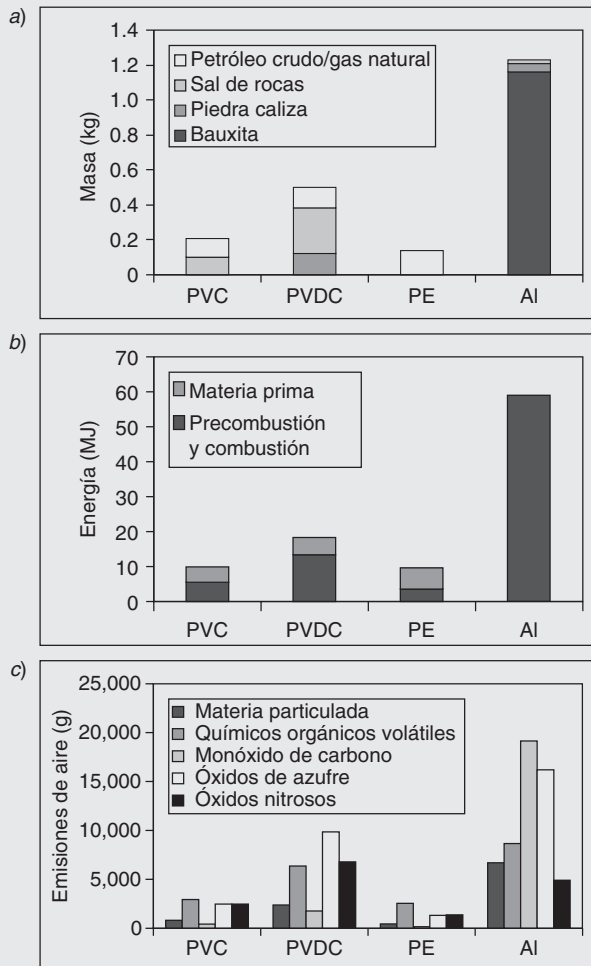
Figura 7.12 Diagrama de proceso de flujo para la producción de tubería de aluminio

6. **Desarrolle un inventario de materiales de ciclo de vida consumidos en la producción de material de tubería:** En este caso, el inventario de ciclo de vida es desempeñado para la masa de materias primas consumidas, energía, emisiones de aire y emisiones de agua.

El inventario del ciclo de vida de la masa de materias primas consumidas para la producción de tubería se muestra en la figura 7.13a.

El inventario del ciclo de vida de energía consumida para los materiales de producción de tubería se muestra en la figura 7.13b. Advierta que la energía consumida para estos productos incluye la energía involucrada en el producto (esto es, si el petróleo utilizado para producir PVC, PVCD y PE fuera utilizado para la generación de energía

## ejemplo/7.5 Continuación



**Figura 7.13 Inventarios del ciclo de vida** a) Inventario del ciclo de vida de masa de materias primas consumidas para la producción de tuberías; b) inventario del ciclo de vida de energía consumida para la producción de materiales de tubería y, c) inventario del ciclo de vida para las emisiones de aire de indicadores de contaminación del aire (por unidad funcional).

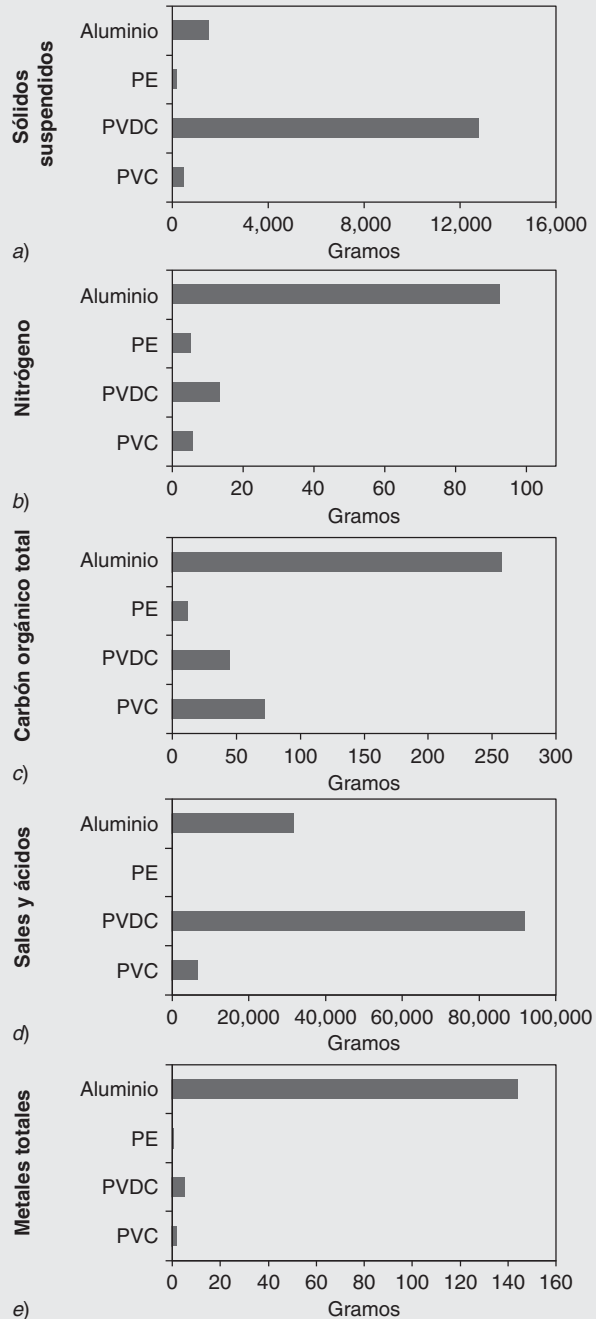
en lugar de para la producción de un producto) así como la precombustión y la energía de combustión para todas las etapas del ciclo de vida. La energía de precombustión es la energía requerida para adquirir el recurso, y la energía de combustión es la energía consumida en la adquisición y manufactura de los procesos per se de energía consumida para la producción de materiales de tubería y, c) inventario del ciclo de vida para las emisiones de aire de indicadores de contaminación del aire (por unidad funcional).

El inventario del ciclo de vida de las emisiones de aire de indicadores de contaminación se muestra en la figura 7.13c. Como se comentará en el capítulo 12, los indicadores de contaminación del aire son aquellos que la Ley de aire limpio requiere a la Agencia de Protección Ambiental (EPA) que regule mediante los Estándares de la calidad del aire ambiental nacional. Estos incluyen el ozono, el material particulado,

### example/7.5 Continued

el monóxido de carbono, el dióxido de nitrógeno, el dióxido de azufre y el plomo.

El inventario del ciclo de vida de las emisiones de agua para diversas emisiones clave se muestra en la figura 7.14. Este inventario reporta las



**Figura 7.14** Inventario del ciclo de vida para las emisiones de agua clave Este inventario mide a) sólidos suspendidos, b) nitrógeno, c) carbón orgánico total, d) sales y ácidos y, e) metales totales (por unidad funcional).

## ejemplo/7.5 Continuación

emisiones del ciclo del agua para cada producto de tubería basado en los diagramas de flujo establecidos en el paso 5, incluyendo los sólidos suspendidos, nitrógeno, sales y ácidos, metales totales y carbón orgánico total.

7. **Determine el inventario del ciclo de vida de la etapa final de vida (manejo de término de vida):** En la etapa final de vida, el producto puede ser enviado a rellenos sanitarios, incinerado o reciclado (figura 7.15).

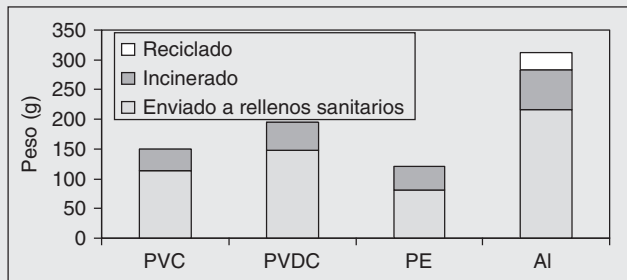


Figura 7.15 Inventario del ciclo de vida de la etapa final de vida (manejo de término de vida) (por unidad funcional)

8. **Determine la evaluación del impacto del ciclo de vida de los datos del inventario del ciclo de vida:** En este paso, todos los datos del inventario, incluyendo las entradas de materias primas y de energía y todas las salidas en términos de aire, agua y desperdicio sólido, se agrupan en categorías más amplias de impacto ambiental como el potencial de calentamiento global (figura 7.16) y preocupaciones de salud humana (tabla 7.6). En la figura 7.16,  $GWP_{100}$  es el potencial de calentamiento global en kilogramos de  $CO_2$  equivalentes con una perspectiva de 100 años (vea el capítulo 2). Para las categorías como los efectos en la salud humana, es con frecuencia necesario incluir evaluaciones cualitativas, debido a que (como se comentó en el capítulo 6) el desempeño de evaluaciones de riesgo es difícil y complejo.

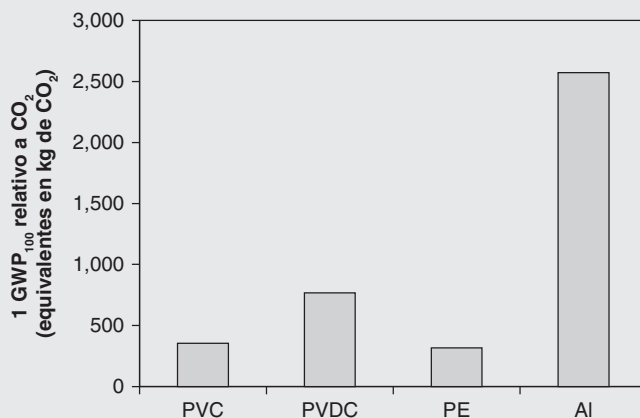


Figura 7.16 Evaluación del impacto del ciclo de vida para el impacto ambiental de potencial de calentamiento global ( $GWP_{100}$ ) (por unidad funcional)

9. **Interprete el inventario del ciclo de vida y la evaluación:** En este punto en la LCA, las evaluaciones subjetivas se hacen de los impactos evaluados en el paso 8, comparando los impactos para cada uno de los diseños alternativos para determinar cuál tiene el mejor perfil ambiental



## ejemplo/7.5 Continuación

Tabla / 7.6

## Evaluación del impacto del ciclo de vida para las preocupaciones de la salud humana en el ejemplo 7.5

Material	Preocupaciones de salud
Dioxina (PVC/PVDC)	Carcinógeno, disruptor potencial endocrino y teratógeno Exposición vinculada con diabetes Instituto de vinilo: 24.3 g/año Greenpeace: 283-565 g/año EPA: Datos insuficientes para evaluar las quejas
Plasticadores (PVC/PVDC)	Dietilhidroxilamino (DEHA): carcinógeno humano potencial, teratógeno, mutágeno y disruptor endocrino di-2-etilhexiloftalato (DEHP): carcinógeno humano potencial, teratógeno y disruptor endocrino
Migración de plasticadores (PVC/PVDC)	Preocupación por el DEHA y el DEHP como una vía adicional de exposición
Aluminio	Posible vínculo con la enfermedad de Alzheimer; exposición insignificante de esta vía de producto La producción de aluminio mediante la fundición vinculada con asma y enfermedad crónica de las vías respiratorias; provoca el desagüe ácido de las minas

y para identificar las mejoras potenciales de diseño. En este caso se utilizará un sistema de rango de ✓+, ✓, y ✓-, en donde ✓+ es más favorable y ✓- es menos favorable (tabla 7.7).

Desde aquí, la LCA puede ir un paso más allá y combinarse con todos los marcadores para cada alternativa para producir un solo marcador que puede ser comparado con todos los diseños. Sin embargo, este paso requiere la medición de GWP contra los riesgos de salud; con frecuencia éstos son juicios de valor social o corporativo sobre qué impactos son más importantes que otros. Por ejemplo, un esquema de peso puede pesar los impactos en donde los impactos de la emisión ambiental son pesados en 30%, los efectos en la salud humana son pesados en 40% y los impactos de recursos (incluyendo el uso de suelo) son pesados en 30 por ciento.

10. **Haga recomendaciones:** Basado en la evaluación del ciclo de vida, las siguientes recomendaciones podrían hacerse para las mejoras ambientales y de la salud humana para producir más diseños de alternativas ambientales benignas que aquéllas actualmente disponibles o en consideración.

## ejemplo/7.5 Continuación

Tabla / 7.7

## Interpretación del ciclo de vida de inventario y evaluación para el ejemplo 7.5

	PVC	PVDC	PE	Al
Intensidad del material	✓+	✓	✓+	✓-
Energía	✓+	✓	✓+	✓-
Salud	✓-	✓-	✓+	✓
Contaminantes del aire	✓	✓	✓+	✓-
Contaminantes del agua	✓	✓-	✓+	✓-
Potencial del calentamiento global	✓+	✓	✓+	✓-
Término de vida	✓-	✓-	✓-	✓

- Examine los cambios en las técnicas de manufactura para minimizar o eliminar la migración de plastificadores. Esto direccionará las preocupaciones de salud asociadas con la exposición humana a los plastificadores utilizados en el PVC y el PVDC, mejorando su marcador global.
- Desarrolle plastificadores benignos alternativos mediante la química verde. Si se desarrollan plastificadores alternativos que no son de preocupación cuando los seres humanos son expuestos a éstos, esto también mejorará los marcadores de salud de PVC y PVDC, minimizando sus impactos globales del ciclo de vida.
- Minimice la superficie de contacto de la tubería con el agua potable. Basado en las preocupaciones de salud asociadas con los productos de PVC, PVDC y aluminio, el minimizar estos impactos es importante para direccionar la carga global del ciclo de vida. En este caso, se estarían controlando las circunstancias en las que el producto es utilizado, en lugar de diseñar un producto inherentemente más benigno. Esta estrategia no es tan efectiva y no permite realizar muchos beneficios potenciales, debido a que los químicos de preocupación durante el uso continuarán siendo una cuestión para la exposición humana al término de vida. Mientras que el minimizar el contacto mejoraría el desempeño ambiental, es menos benéfico que la eliminación del plastificador todo junto, o desarrollar alternativas de plastificadores benignos.
- Reutilice o recicle toda la tubería de aluminio. Dados los tremendos impactos ambientales asociados con la manufactura de la tubería de aluminio, particularmente la demanda de energía, una estrategia para mejorar el desempeño del ciclo de vida de la tubería de aluminio sería reciclar o reutilizar el producto en lugar de tener que producir producto virgen para cada uso.

## EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL CICLO DE VIDA: COSTO DEL CICLO DE VIDA

De manera similar a una evaluación de impactos del ciclo de vida, un análisis financiero puede mirar hacia los costos a través del ciclo de vida de un producto, proceso o sistema. En este caso, los costos de compra por adelantado están incluidos, en adición a cualquier costo asociado con el uso, mantenimiento, reparación, operación, reemplazo (si el tiempo de vida esperado es más corto que el necesario), y el manejo de término de vida tal como la disposición o salvamento. Esto proporciona una mirada más realista de la economía asociada con un diseño dado y permite una toma de decisiones más informada. El **costo de ciclo de vida (LCC)** es conocido como el costo total de titularidad.

Para ganar un entendimiento de lo que es, y lo que no es, un buen diseño desde un punto de vista financiero durante el ciclo de vida es importante contar con todos los costos presentes y futuros como una métrica simple. Esto permite la comparación en una base equivalente. Esto origina la cuestión del *valor de tiempo del dinero*. El dinero hoy en día vale más la pena que el dinero mañana, por lo que el dinero de dos periodos distintos no se puede comparar sin ajustes. Al desempeñar un análisis de LCC, es importante poner todos los costos y ganancias en un periodo común y aproximar los costos o ganancias que suceden durante el año como cantidades de un final de año.

El valor del dinero de distintos periodos se puede ajustar utilizando una tasa de interés. Algunos cálculos estándar basados en el valor de tiempo del dinero se describen en la tabla 7.8. Incluyen **valor actual (PV)**, **valor futuro (FV)**, **valor actual de una anualidad (PVA)** y **valor futuro de una anualidad (FVA)**.

El **interés** es la cuota pagada por pedir dinero prestado, ya que el dinero que se está utilizando en el presente no está disponible para otros gastos o inversiones. La cantidad original prestada o gastada es llamada el *principal*. Si el interés se paga anualmente y el periodo es mayor a un año, el interés se llama *gravado*. Esto es, el dinero en el año 2 es el principal más el interés del año 1. El dinero en el año 3 es el principal más el interés de los años 1 y 2. En todas las ecuaciones siguientes, las unidades para la tasa de interés ( $i$ ) y el número de periodos ( $n$ ) deben coincidir. Por ejemplo, si una tasa de interés anual se reporta, entonces el número de periodos debe ser en años. Si el interés es mensual, entonces los periodos deben ser mensuales. Se

**Tabla / 7.8**

### Cálculos estándar basados en el valor de tiempo del dinero

Valor actual (PV)	El valor actual (PV) de una cantidad que será recibida en el futuro.
Valor futuro (FV)	El valor futuro (FV) de una cantidad invertida (como en una cuenta de depósito) ahora a una tasa de interés dada.
Valor actual de una anualidad (PVA)	El valor actual de una corriente de pagos futuros como una hipoteca.
Valor futuro de una anualidad (FVA)	El valor futuro de una corriente de pagos (anualidad), suponiendo que los pagos sean invertidos a una tasa de interés dada.

supone que las tasas de interés son anuales a menos que se dicte de otra manera.

Basados en estos principios, el valor futuro del dinero se puede calcular como sigue:

$$FV = PV \times (1 + i)^n \quad (7.2)$$

en donde PV es el valor actual del dinero, FV es el valor futuro del dinero,  $i$  es la tasa de interés anual y  $n$  es el número de años.

### ejemplo/7.6 Determinación del valor futuro del dinero

Si usted invirtiera \$2 000 hoy en una cuenta que pagara 6% de interés, con el interés gravado anualmente, ¿cuánto habrá en la cuenta al final de 2 años? (Suponga que no hay retiros.)

#### solución

El valor futuro de la inversión inicial de \$2 000 puede determinarse en la ecuación 7.2:

$$FV = \$2\,000.00 \times (1 + 0.06)^2 = \$2\,247.20$$

La ecuación 7.2 se puede reorganizar para encontrar el valor actual del dinero:

$$PV = \frac{FV}{(1 + i)^n} \quad (7.3)$$

Esta ecuación activa el proceso de descuento de traducir un valor futuro o de establecer un flujo de efectivo futuro a un valor actual.

### ejemplo/7.7 Determinación del valor actual del dinero

Si usted quisiera tener \$1 millón dentro de 50 años y encontrara una inversión verde con una tasa de interés garantizada de 15% por año, ¿cuánto necesitaría invertir el día de hoy?

#### solución

Este problema requiere que la ecuación 7.3 sea resuelta para el valor actual de \$1 millón.

$$PV = \frac{\$1\,000\,000}{(1 + 0.15)^{50}} = \$922.80$$

Las ecuaciones 7.2 y 7.3 pueden usarse para desempeñar las comparaciones de costos para inversiones en materiales más verdes, equipo e infraestructura, lo cual quizá tenga una etiqueta inicial de mayor precio. Estas ecuaciones también se pueden utilizar para determinar si un ingeniero debería recomendar la compra de equipo de bajo costo que tiene mayor costo de mantenimiento, tratamiento, energía, permisos y reemplazos. Las decisiones pueden entonces determinarse con una base ambiental (utilizando LCA) y con una base económica (usando análisis LCC).

El valor actual de una anualidad (PVA), el cual es el valor de una anualidad al momento = 0, puede entonces ser calculado con base en la suma de una serie de cálculos de valor actuales:

$$PVA = \sum_{j=1}^n A \frac{1}{(1+i)^j} = A \left[ \frac{1}{1+i} + \frac{1}{(1+i)^2} + \dots + \frac{1}{(1+i)^n} \right] \quad (7.4)$$

en donde  $A$  es el valor de los pagos individuales en cada año,  $i$  es la tasa de interés y  $n$  es el número de años.

Por lo tanto:

$$PVA = A \times \left( \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right) = A \times \left[ \frac{1 - (1+i)^{-n}}{i} \right] \quad (7.5)$$

### ejemplo/7.8 Costo del ciclo de vida aplicado al sistema de tratamiento de aguas

Su empresa acaba de recibir un contrato por 4 años para proporcionar agua potable a una comunidad. El sistema de tratamiento actual que está utilizando tiene altos costos de operación, pero el precio de compra del nuevo producto es caro, como se muestra en la siguiente tabla. Con base en un análisis LCC, ¿cuál sistema seleccionarías?

Opciones	Continuar con el anterior	Comprar uno nuevo
Precio de compra (\$)	0	4 000
Costo de operación (\$/año)	2 000	500
Tiempo de vida (años)	4	4

### solución

Utilice la ecuación 7.5 para determinar el valor actual de una anualidad (PVA) para el sistema anterior y el nuevo. Esto permite considerar los costos de operación más altos, los cuales suceden cada año durante el contrato de 4 años.

$$PVA_{\text{anterior}} = \$2\,000 \times \left[ \frac{1 - (1+i)^{-4}}{i} \right]$$

$$PVA_{\text{nuevo}} = \$4\,000 + \$500 \times \left[ \frac{1 - (1+i)^{-4}}{i} \right]$$

### ejemplo/7.8 Continuación

El resultado final depende, por supuesto, de la tasa de interés,  $i$ . Si el banco proporciona una tasa de interés de 10% al año, entonces

$$PVA_{\text{anterior}} = \$6\,340$$

$$PVA_{\text{nuevo}} = \$5\,585$$

Lo mejor sería comprar el nuevo sistema. Si el banco proporciona una tasa de interés de 20% al año, entonces

$$PVA_{\text{anterior}} = \$5\,180$$

$$PVA_{\text{nuevo}} = \$5\,295$$

Por lo tanto, continuar con el sistema anterior sería mejor.

Otras decisiones a considerar son los costos de manejo de material, de energía, facilidad de mantenimiento, costos de permisos y contribución global a la comunidad. Adverta que, en un problema de reemplazo como éste, se pueden añadir las ganancias al análisis, pero no hay necesidad de hacerlo si son las mismas para ambas opciones. En este caso, los ingresos por proporcionar agua potable serían los mismos, por lo que las ganancias se omitieron.

En algunas situaciones será necesario tomar decisiones entre dos diseños diferentes que no tienen el mismo tiempo de vida. Por ejemplo, un sistema (sistema A) puede estar muy mal hecho y durar solamente 2 años, mientras que otro sistema (sistema B) puede proporcionar la misma función, estar mejor hecho y durar 20 años.

Así como no se puede comparar exactamente el dinero de dos diferentes periodos, no es apropiado comparar sistemas con dos diferentes tiempos de vida. En este caso, suponga que comprará y dispondrá del diseño con el menor tiempo de vida con suficiente frecuencia como para igualar el tiempo de vida del diseño de mayor duración. En este caso, necesita comprar y disponer del sistema A diez veces para igualar a un sistema B. Para desempeñar un análisis LCC para tomar la decisión de compra entre el sistema A y el sistema B, convierta la inversión, los costos de operación y de término de vida en un solo pago de anualidad.

### ejemplo/7.9 Costos anualizados con distintas vidas de servicios

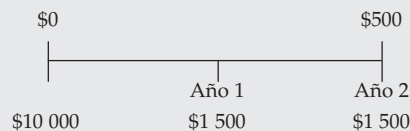
Basado en los siguientes costos para dos sistemas de filtración de aire interior y una tasa de interés de 15% anual, ¿cuál alternativa recomendaría a su cliente con base en el costo anual de cada alternativa?

## ejemplo/7.9 Continuación

	Alternativa 1	Alternativa 2
Precio de compra (\$)	10 000	20 000
Costo de operación anual (\$/año)	1 500	1 000
Valor de rescate (\$)	500	1 000
Vida de servicio (años)	2	3

## solución

El problema requiere que resuelva A (con las ecuaciones 7.3 y 7.5), el cual es el valor de pagos individuales cada año. Esta cantidad representa los costos anuales de energía que se necesitarían efectuar para justificar la instalación de un sistema de filtrado de aire sobre otro en una base puramente económica. El costo anualizado de la alternativa 1 se puede representar esquemáticamente para cada año mediante el siguiente diagrama, en donde los costos (en dólares) están abajo, y las ganancias (en dólares) están arriba para cada uno de los dos años:



$$PVA = \$10\,000 + \$1\,500 \times \left[ \frac{1 - (1 + 0.15)^{-2}}{0.15} \right] - \frac{\$500}{(1 + 0.15)^2}$$

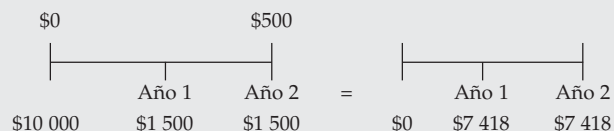
$$= \$12\,061$$

Ahora el valor actual de una anualidad (PVA) se necesita traducir a un costo anual rearrreglando la ecuación 7.5 para encontrar A:

$$A = PVA \times \left[ \frac{i}{1 - (1 + i)^{-n}} \right] = \$12\,061 \times \left[ \frac{0.15}{1 - (1 + 0.15)^{-2}} \right]$$

$$= \$7\,418$$

Esquemáticamente, esto se puede representar (los costos abajo, las ganancias arriba) como sigue:



### ejemplo/7.9 Continuación

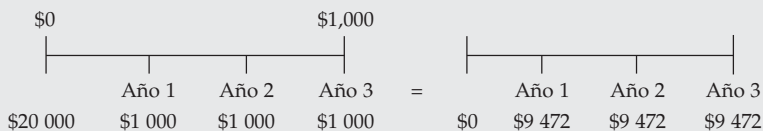
Para calcular el costo anualizado de la alternativa 2, convierta todos los costos al valor actual y luego calcule el costo anual:

$$\begin{aligned} \text{PVA} &= \$20\,000 + \$1\,000 \times \left[ \frac{1 - (1 + 0.15)^{-3}}{0.15} \right] - \frac{\$1\,000}{(1 + 0.15)^3} \\ &= \$21\,626 \end{aligned}$$

Para traducir el PVA en un costo anual, rearrgle la ecuación de PVA para encontrar  $A$ :

$$\begin{aligned} A &= \text{PVA} \times \left[ \frac{i}{1 - (1 + i)^{-n}} \right] = \$21\,626 \times \left[ \frac{0.15}{1 - (1 + 0.15)^{-3}} \right] \\ &= \$9\,472 \end{aligned}$$

Esquemáticamente, esto se puede representar como sigue:



Basado sólo en los costos, usted seleccionaría el sistema de filtración de aire interior 1, debido a que será menos caro de operar en una base anual (\$7 418 contra \$9 472).

### ejemplo/7.10 Costos anualizados aplicados a la energía renovable

Suponga que la instalación de un panel solar para generación de energía en sitio cuesta \$50 000. ¿Cuánto necesita ahorrarse en cuentas anuales de energía para recuperar el costo del sistema en 5 años? Suponga una tasa de interés anual de 7%.

#### solución

En este caso se tienen los siguientes valores:  $PV = \$50\,000$ ,  $i = 7\%$  anual y  $n = 5$  años. Se necesita encontrar el valor de los pagos individuales en cada año ( $A$ ).

Rearregle la ecuación 7.5 y encuentre  $A$ :

$$\begin{aligned} A &= \text{PVA} \times \left[ \frac{i}{1 - (1 + i)^{-n}} \right] = \$50\,000 \times \left[ \frac{0.07}{1 - (1 + 0.07)^{-5}} \right] \\ &= \$12\,195 \end{aligned}$$



© olaf loose/iStockphoto.



### ejemplo/7.10 Continuación

En una base puramente económica, las cuentas anuales de energía tendrían que reducirse en \$12 195 para recuperar los costos de instalar un panel solar de \$50 000 durante 5 años a una tasa de interés anual de 7%. Al utilizar la misma fórmula, este problema puede resolverse para diferentes periodos de retorno de inversión y tasas de interés.

**MÁS ALLÁ DE LAS CONSIDERACIONES DE CICLOS DE VIDA AMBIENTALES Y ECONÓMICOS** Mientras que las dos secciones previas han proporcionado información y habilidades para tomas de decisiones con base en las consideraciones de ciclos de vida ambientales y económicos, existen otros factores que se deben considerar en términos de **intangibles**. Los costos y beneficios intangibles incluyen la reputación, el valor de la marca, la responsabilidad potencial, el precio de la acción, los beneficios sociales y de calidad de vida, el apoyo al interesado, la lealtad de cliente y empleado, la innovación y el liderazgo. Estas características, mientras que son actualmente difíciles de cuantificar en términos de factores ambientales o económicos, pueden añadir valor significativo a un individuo, proyecto, comunidad o empresa. Estos intangibles son integrales para el entendimiento y la comunicación del valor a largo plazo de un proyecto.

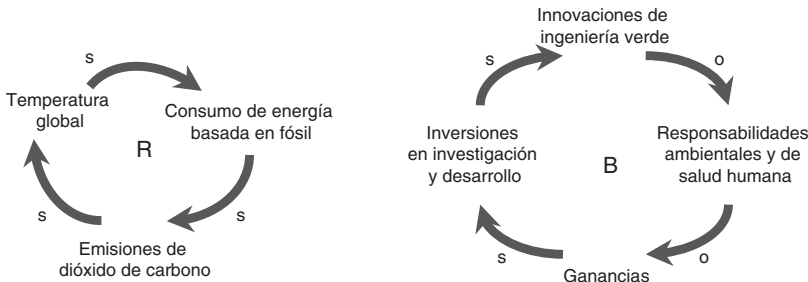
#### 7.4.3 PENSAMIENTO SISTÉMICO

El **pensamiento sistémico** considera las partes componentes de un sistema como características o funciones añadidas al funcionar dentro de un sistema en lugar de aislado. Esto sugiere que los sistemas deberían ser vistos de una manera holística. Los sistemas como un conjunto pueden ser mejor entendidos cuando las vinculaciones e interacciones entre los componentes se consideran en adición a los componentes individuales.

La naturaleza del pensamiento sistémico la hace en extremo efectiva para resolver los más difíciles tipos de problemas. Por ejemplo, los retos de sustentabilidad son algo complejos, dependiendo de las interacciones y la interdependencia y son actualmente manejados o mitigados mediante los mecanismos dispares.

Una manera de comenzar un análisis sistémico es mediante un **diagrama causal (CLD)**. Los diagramas causales proporcionan un medio para articular la naturaleza dinámica interconectada de los sistemas complejos. Estos diagramas consisten de flechas que conectan las variables (cosas que cambian con el tiempo) de una manera que muestra cómo una variable afecta a otra. Cada flecha en un diagrama causal es etiquetada con una *s* o una *o*. La *s* significa que cuando la primer variable cambia, la segunda cambia en la *misma* dirección. (Por ejemplo, ganancias incrementadas llevan a inversiones incrementadas en la investigación y el desarrollo). La *o* significa que la primer variable provoca un cambio en la dirección *opuesta* de las segundas variables. (Por ejemplo, más innovaciones de la ingeniería verde pueden llevar a responsabilidades ambientales y de salud humana reducidas).

En los CLDs las flechas se juntan para formar curvas, y cada curva es etiquetada con una *R* o una *B* (figura 7.17). *R* significa *refuerzo*; esto es, las relaciones causales dentro de la vuelta crean crecimiento o colapso



**Figura 7.17 Ejemplos de diagramas causales de refuerzo y de balance** Cada flecha en un diagrama causal está etiquetada con una *s* o una *o*. La *s* significa que cuando la primera variable cambia, la segunda cambia en la misma dirección. La *o* significa que la primera variable provoca un cambio en la dirección opuesta de las segundas variables. La *R* significa refuerzo, esto es, la relación causal dentro de la vuelta para crear crecimiento o colapso exponencial. La *B* significa balance, esto es, las influencias causales en la vuelta mantienen a las variables en equilibrio (redibujado con permiso de Daniel Aronson).

exponencial. Por ejemplo, a mayor energía basada en combustible fósil consumida, mayor dióxido de carbono emitido, a mayor incremento en temperaturas globales, mayor energía se necesita consumir. *B* significa *balance*; esto es, las influencias causales en la vuelta mantienen a las variables en equilibrio. Por ejemplo, a mayores ganancias generadas por una empresa, mayores inversiones se pueden hacer en investigaciones y desarrollo, lo que llevará a más innovaciones de ingeniería verde, reduciendo el número de responsabilidades ambientales y de salud humana, lo que lleva a mayor potencial de ganancias.

Los CLDs pueden contener muchas vueltas *R* y *B* diferentes, todas conectadas con flechas. El dibujar estos diagramas puede desarrollar un profundo entendimiento de la dinámica del sistema. Mediante este proceso, resaltarán las oportunidades de mejora. Por ejemplo, los vínculos entre el uso de energía, las emisiones de carbón y las temperaturas globales pueden llevar a encontrar maneras para reducir el consumo de energía.

Un ejemplo que ilustra la diferencia entre el pensamiento sistémico y la perspectiva tomada por las formas tradicionales de análisis es la acción tomada para reducir los daños en los cultivos por insectos (descritos por Aronson, 2003). Cuando un insecto se come un cultivo, la respuesta convencional es la de rociar el cultivo con un pesticida diseñado para matar dicho insecto. Suponga que este pesticida se diseñó utilizando química verde, por lo que es peligroso solo para la peste objetivo y no es peligroso para la salud humana o el medio ambiente. Esto puede representarse por un diagrama sistémico como el siguiente:

Aplicación del pesticida  $\xrightarrow{o}$  Insectos que dañan el cultivo

En este diagrama sistémico, la flecha indica la dirección de causación; en este caso, un cambio en la cantidad de pesticida aplicado provoca un cambio en los números de insectos que dañan los cultivos. La letra después de la flecha indica cómo las dos variables están relacionadas. En este caso, la *o* significa que cambian en la dirección opuesta: el uso del pesticida va arriba y el número de insectos va abajo.

El diagrama sistémico se lee, “un cambio en la cantidad de pesticida aplicada provoca que el número de insectos que dañan el cultivo cambien en la dirección opuesta”. Mientras más pesticida se aplique, el menor número de insectos dañará los cultivos (y menor el daño total al cultivo).

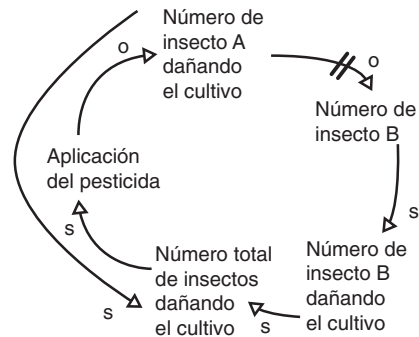
Al tomar una perspectiva sistémica de la situación, se puede dar cuenta que aunque al añadir cantidades incrementadas de pesticidas se limita el daño al cultivo por los insectos, esto con frecuencia no es una solución a largo plazo. Lo que en su lugar sucede con frecuencia es que, en los años

### Pesticidas en aguas estadounidenses

<http://water.usgs.gov/nawqa/>

subsecuentes, el problema del daño al cultivo se incrementa, y el pesticida deja de ser efectivo. Esto con frecuencia puede suceder debido a que el insecto que se comía los cultivos también estaba controlando la población de otro insecto, ya sea depredándolo o compitiendo con el mismo. En este caso, el control de una población de insectos puede llevar a un incremento significativo en la población de otro insecto. En otras palabras, la acción que pretende resolver el problema de hecho lo hace peor debido a las **consecuencias no pretendidas** que cambian el sistema y exacerban el problema original.

Al representar este sistema más complicado como un diagrama de sistemas se vería como algo así:



© Thomasz Pietryszck/iStockphoto.

De conformidad con este diagrama, a mayor aplicación de pesticida, menor el número de insectos A (la peste original) que se comerán el cultivo. Esto lleva a una reducción inmediata en el número de insectos que se comen los cultivos (el efecto pretendido). Sin embargo, un número menor de insectos A finalmente llevan a mayor número de insectos B (las marcas en la flecha indican un retraso), debido a que el insecto A ya no controla el número de insectos B a la misma extensión. Esto lleva a una explosión de población de insectos B, a mayores números de insectos B que dañan los cultivos, y a mayores números de insectos que dañan los cultivos; exactamente lo opuesto de lo que se pretendía. Por lo tanto, aunque los efectos a corto plazo de la aplicación del pesticida fueron exactamente los pretendidos, los efectos a largo plazo son bastante diferentes.

Con esta idea del sistema en la mente, se han desarrollado otras acciones con mejores resultados a largo plazo, como el manejo integral de plagas, el cual incluye el control del insecto que se come el cultivo mediante la introducción de más de sus depredadores en el área.

#### 7.4.4 RESILIENCIA

Otro concepto fundamental en el diseño de sustentabilidad es el concepto de **resiliencia**: la capacidad de un sistema para sobrevivir, adaptarse y crecer en frente de cambios no previstos, aún en incidentes catastróficos (Fiskel, 2003). La resiliencia es una característica común de los sistemas complejos como empresas, ciudades o ecosistemas. Estos sistemas evolucionan perpetuamente a través de ciclos de crecimiento, acumulación, crisis y renovación y con frecuencia se autoorganizan en nuevas configuraciones inesperadas.

Por las leyes de la termodinámica, los *sistemas cerrados* decaerán gradualmente del orden hacia el caos, con tendencia a la máxima entropía. Sin embargo, los sistemas vivientes están *abiertos* en el sentido de que continua-

### ejemplo/7.11 Sistemas distribuidos que pueden mejorar la funcionalidad y la resiliencia

Proporcione un ejemplo de un sistema distribuido compuesto por elementos independientes aún interactivos que pueden administrar funcionalidad mejorada y mayor resiliencia. ¿Cuáles son los beneficios potenciales en términos de sustentabilidad?

#### solución

Una recolección de generadores eléctricos distribuidos (por ejemplo, celdas de combustible) conectados a una red eléctrica pueden ser más confiables y tolerantes a las fallas que la generación centralizada de energía (Fiskel, 2003). Los beneficios de la sustentabilidad pueden incluir lo siguiente:

- Recursos necesarios reducidos para la transmisión y distribución.
- Pérdidas reducidas debido a la transmisión y distribución a larga distancia, por lo que se necesita generar menos energía para proporcionar la misma cantidad al usuario final.
- Posible crédito otorgado al propietario para reducciones netas en las emisiones de área.
- Emisiones globales más bajas si la fuente de energía distribuida está más limpia que la alternativa (por ejemplo, celdas de combustible, recuperación de gas de relleno sanitario, biomasa).
- Potencial para emisiones reducidas al producir energía solo para cumplir con la demanda actual (mucho más flexibilidad en los niveles de producción con los sistemas distribuidos).

mente aprovecharán las fuentes externas de energía y mantendrán un estado estable de baja entropía (Schrödinger, 1943). Esto permite que los sistemas resilientes soporten grandes perturbaciones sin falla o colapso. Esto es, estos sistemas son sustentables en términos de supervivencia a largo plazo y pueden adaptarse y evolucionar a un nuevo estado de equilibrio. Dada la incertidumbre y vulnerabilidad que rodean a los retos de sustentabilidad como el cambio climático, escasez de agua y demandas de energía, los diseños sustentables probablemente necesitarán incorporar a la resiliencia como un concepto fundamental.

La idea de diseñar sistemas de ingeniería para la resiliencia será la de introducir sistemas más distribuidos y más pequeños que puedan continuar funcionando efectivamente en situaciones inciertas con mayor resiliencia. Los ejemplos incluyen la generación de energía y la recolección de agua fluvial a nivel casero y comunitario y el tratamiento de aguas residuales descentralizado. Otra vez, es necesario considerar los impactos del ciclo de vida del sistema entero al diseñar un sistema distribuido nuevo con más redundancia para reemplazar un sistema más centralizado para entender las ventajas y las desventajas potenciales entre los impactos ambientales y de salud humana para la resiliencia. Aquí es donde el tiempo de vida del sistema se vuelve un factor crucial en la evaluación del ciclo de vida.

### 7.4.5 CRITERIOS DE DISEÑO

Los criterios de desempeño son metas explícitas que un diseño debe lograr para ser exitoso. Estos son con frecuencia los criterios mínimos utilizados para definir los estándares de diseño. Para los diseños de ingeniería, estos criterios con frecuencia incluyen discusiones de desempeño, seguridad, calidad y costo. Por ejemplo, si un diseño no desempeña su función pretendida, no importa si es seguro, de alta calidad o no es costoso. El diseño ha fallado ya que no ha cumplido con uno de los estándares mínimos explícitos: el desempeño.

El éxito de las estrategias de diseño de ingeniería como **manejo de calidad total** y **Seis Sigma** que tienen criterios explícitos para el éxito relacionados con cero defectos o alta eficiencia sugiere que las metas de sustentabilidad pueden ser tratadas de forma similar. Por ejemplo, los criterios de diseño para cualquier nuevo diseño pueden incluir “la reducción o eliminación de peligro para la salud humana y el medio ambiente” o “resiliencia máxima”. De esta manera, las metas de sustentabilidad pueden ser incorporadas en la evaluación del diseño como un estándar mínimo para traer el diseño a la producción o implementación. El tratar las metas de sustentabilidad como criterios de diseño asegura que sólo la(s) solución(es) que direccionan exitosamente estas cuestiones serán realizadas.

Esto asegura que en lugar de reconocer y direccionar los objetivos de la sustentabilidad después de que el diseño ha sido completado, los ingenieros y los gestores los hacen una parte inherente del proceso de la concepción del diseño. Un diseño viable se define como uno que considera las metas de sustentabilidad. Esto evita que los diseños que son inherentemente sustentables en la etapa de diseño avancen, ya que no cumplen con los estándares mínimos, haciendo la sustentabilidad análoga a los criterios tradicionales para el diseño de ingeniería.

Es crítico que los diseños verdes se lleven a cabo. Esto es, necesitan servir para su uso pretendido junto con, si no es que mejor que, el diseño convencional para cumplir con la función pretendida. Si un diseño no puede competir en el mercado con base en su desempeño o costo, no puede proporcionar ningún beneficio ambiental o a la salud humana ya que su potencial no será realizado.

### 7.4.6 PRODUCTOS CONTRA SERVICIOS

La creación de entidades físicas para desempeñar las funciones pretendidas necesariamente tiene una carga ambiental y económica. Un mecanismo significativo para reducir estas cargas es el de proporcionar el mismo servicio o función sin la creación de dicha entidad física. Esto implica que los diseños deben definirse en términos de su función en lugar de la forma que proporcionan. Este concepto está cercanamente relacionado con la idea de la maximización de los grados de libertad de diseño.

Al diseñar para las funciones pretendidas en lugar de una forma física prescrita, las organizaciones pueden lograr beneficios de ciclos de vida al eliminar la necesidad de adquirir y fabricar materias primas, producir un producto o proceso final y luego manejarlo en la etapa de término de vida. Por ejemplo, en vez de diseñar la infraestructura física para las telecomunicaciones, incluyendo polos y cables que deben establecerse para conectarse a través del entorno urbanístico, la meta de diseño podría ser la de proporcionar telecomunicaciones de alta calidad y resilientes. Esto permite al diseñador desarrollar soluciones como teléfonos celulares, los cuales requieren mucho menos recursos (naturales y económicos) en términos de infraestructura física al

### ejemplo/7.12 Mantenimiento de la función al mismo tiempo que se reduce el consumo de recursos

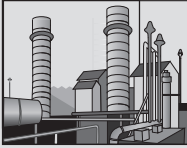
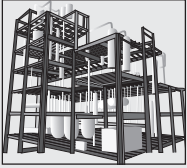

Proporcione un ejemplo de un producto que se está reemplazando por un servicio que reduce o elimina el consumo de recursos (naturales y económicos) mientras proporciona la misma función (Beckman, 2006).

### solución

Este ejemplo investigará el descafeinado del café. Se examinan tres procesos como se muestra en la tabla 7.9. Estos tres procesos tienen distintos impactos ambientales detallados en la tabla.

**Tabla / 7.9**

#### Tres procesos examinados para el descafeinado del café

Proceso 1		Producción de café descafeinado utilizando cloruro de metileno como solvente en el proceso: el cloruro de metileno puede ser carcinógeno, ya que se le ha vinculado con cáncer de pulmón, hígado y páncreas en los animales de laboratorio. El cloruro de metileno también es un mutágeno/teratógeno y cruza la placenta, provocando toxicidad fetal en las mujeres que son expuestas a éste durante el embarazo (Bell et al., 1991).
Proceso 2		Producción de café descafeinado mediante el uso de dióxido de carbono supercrítico como solvente: el dióxido de carbono supercrítico ( $sCO_2$ ) no está regulado como un solvente por la Administración de Alimentos y Fármacos y se cree que es no tóxico. Sin embargo, el $sCO_2$ aún requiere cantidades significativas de energía para elevar la temperatura y la presión del gas hasta el punto de estado supercrítico.
Proceso 3		Producción de café descafeinado con plantas de café que crecen con contenido reducido de cafeína: esto elimina la necesidad de transportar y procesar los granos de café para lograr la función deseada (el descafeinado). El especificar la meta como "producir café sin cafeína", en lugar de "diseñar un sistema de solvente más seguro para el descafeinado", permite más grados de libertad de diseño y los máximos beneficios ambientales y económicos pueden realizarse al eliminar el uso de solventes en el logro de la función deseada.

mismo tiempo que cumplen con la meta pretendida. Por supuesto, es posible evaluar los costos ambientales y económicos, los beneficios y las ventajas y desventajas de desarrollar un sistema de telecomunicaciones con base en los polos y cables contra los teléfonos celulares, incluyendo la manufactura y el manejo de cada auricular individual al término de vida, utilizando la evaluación del ciclo de vida y el costo del ciclo de vida.

#### 7.4.7 MATERIALES Y ENERGÍA INHERENTEMENTE BENIGNOS MEDIANTE LA QUÍMICA VERDE

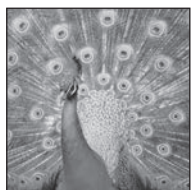
La química verde se dedica al diseño de productos y procesos químicos que reducen o eliminan el uso y la generación de materiales peligrosos (Anastas

## Diseño inspirado en la naturaleza

www.asknature.org



### Biomimetismo



(L) iStockphoto. (R) © Chanyut Sribua-rawd/iStockphoto.

y Warner, 1998). La química verde se dedica a direccionar el peligro mediante diseño molecular y los procesos utilizados para sintetizar dichas moléculas. Recuerde que el peligro tiene una definición extremadamente amplia (refiérase a la tabla 6.1 en el capítulo 6) para incluir no sólo la toxicidad, sino también los impactos relacionados con el agotamiento de recursos y el potencial calentamiento global. Por lo tanto, la química verde alentaría el uso de recursos renovables y materiales disponibles localmente (para reducir las emisiones de dióxido de carbono asociadas con la transportación).

Este campo emergente también utiliza las lecciones y procesos de la naturaleza para inspirar el diseño a través del biomimetismo (Benyus, 2002). El **biomimetismo** (de bios, que significa vida, y mimetismo, que significa imitar) es una disciplina de diseño que estudia las mejores ideas de la naturaleza y luego imita estos diseños y procesos para resolver problemas humanos (vea el recuadro 7.3). El estudio de una hoja para inventar una mejor celda solar es un ejemplo de esta “innovación inspirada por la naturaleza” (Benyus, 2002).

## Recuadro / 7.3 Biomimetismo

El biomimetismo utiliza diseños de la naturaleza para resolver problemas humanos. Aproximadamente se pueden distinguir tres niveles biológicos a partir de los cuales la tecnología puede ser modelada:

- Mimetizar los métodos naturales de manufactura de compuestos químicos para crear nuevos.
- Imitar los mecanismos encontrados en la naturaleza (por ejemplo, el Velcro).
- Estudiar los principios organizacionales del comportamiento social de organismos, como el comportamiento floreado de los pájaros o el comportamiento emergente de las abejas y las hormigas.

Los ejemplos inspiran (de *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*, de Janine M. Benyus, con permiso de HarperCollins Publishers):

*Color sin pintura:* el empaque de la capa final de pintura o tinta puede tener impactos ambientales significativos. Los organismos utilizan dos métodos para crear color sin pintura: pigmentos internos y el color estructural que hace que las mariposas tropicales, los pavorrales y colibríes sean tan magníficos. Un pavorreal es un pájaro completamente café. Sus “colores” resultan de la dispersión de la luz de barras de melanina de espaciado regular, y los efectos de interferencia a través de capas delgadas de queratina (lo mismo que sus uñas de las manos). ¿Qué pasa si los empaques pudieran cruzarse en algo claro y no tóxico que jugara con la luz para crear la ilusión de color? Iridigm, en San Francisco, está utilizando ideas estructurales de color de las mariposas tropicales para

crear una pantalla PDA que pueda leerse fácilmente en la luz del sol. En Japón, los investigadores están desarrollando una pantalla de cristal líquido cuya estructura puede ajustarse utilizando luz UV, luego reajustada para un mensaje diferente, todo sin tinta.

*Protección contra microbios:* Para protegerse contra microbios precaristas, una biomimética buscaría pistas en las pieles de los organismos que pretenden mantenerse libres de limo. El alga roja y verde (quelpo) es capaz de estabilizar un compuesto normalmente activo llamado bromo para rechazar microbios sin dañar el alga. El ingeniero William McCoy de Nalco tomó prestada esta receta de estabilización para crear Stabrex™, una alternativa de cloro que mantiene los sistemas de enfriamiento industriales libres de microbios.

*Mantenerse limpio sin detergente:* Si la meta es la de mantener el empaque limpio, la inspiración se esconde en las superficies microscópicas de las hojas. Las plantas, igual que el loto de pantano, no pueden soportar que la suciedad interfiera con su interacción con la luz del sol. Utilizando microscopios poderosos, los científicos alemanes se dieron cuenta de que las hojas de loto tienen superficies montañosas que mantienen las partículas de suciedad tambaleándose en los picos en lugar de adherirse. El agua de lluvia envuelve y rueda las partículas sueltas, alejándolas. Un número de nuevos productos están disponibles en las superficies de autolimpieza de efecto de loto, incluyendo tablillas de techos, pinturas de autos y una pintura de fachada de edificios, Lotusan, hecha por ispo. La pintura se seca con protuberancias semejantes al loto, y el agua de lluvia limpia la superficie.

Unos cuantos de los ejemplos promisorios de sustancias inherentemente benignas en el mercado o bajo desarrollo incluyen solventes de lactato de etilo y coagulantes basados en plantas para el tratamiento de aguas potables. Millones de libras de solventes industriales tóxicos pueden ser capaces de ser reemplazados por solventes amigables con el ambiente hechos con lactato de etilo, un éster de ácido láctico. A diferencia de otros solventes, los cuales pueden crear preocupaciones de salud humana, dañar la capa de ozono o contaminar el agua subterránea, el lactato de etilo se considera significativamente más benigno. Los solventes de lactato de etilo tienen numerosas ventajas ambientales atractivas, incluyendo que son biodegradables, fáciles de reciclar, no corrosivos, no carcinógenos y que no provocan agotamiento del ozono (Henneberry, 2002). Como mayor evidencia de las características benignas de este químico, el lactato de etilo está aprobado por la Administración de Alimentos y Fármacos de Estados Unidos para su uso en productos alimenticios. Más importante, los solventes de lactato de etilo son competitivos en costo y en desempeño con los solventes tradicionales en un amplio rango de aplicaciones.

En el caso del tratamiento de aguas para el mundo en desarrollo, las tecnologías del mundo desarrollado con frecuencia no son apropiadas, no son de bajo costo o están basadas en recursos locales, en otras palabras, son insustentables. Por ejemplo, estas tecnologías con frecuencia dependen de la cloración y los coagulantes de sales metálicas (como el alumbre), cuyo planteamiento es un reto durante sus ciclos de vida, incluyendo los impactos ecotoxicológicos al ser introducidos en el ambiente como lodo postratamiento y el daño a la salud humana como resultado de su consumo en el agua tratada. Los coagulantes con base de plantas, con frecuencia los cultivos de alimentos tradicionales, están biobasados y son renovables, requieren sólo de materiales y recursos locales, son relativamente de bajo costo, y pueden desempeñarse tan bien como, si no mejor que, los coagulantes convencionales al remover la turbidez y los microorganismos, incluyendo patógenos, del agua potable. Sin embargo, esta propuesta no dirige la necesidad de protección residual contra crecimiento microbiano durante el almacenamiento.

#### 7.4.8 EFICIENCIA

Mientras que las eficiencias de todos tipos siempre han sido un componente de buen diseño, el entendimiento de lo que se puede lograr continúa evolucionando. Los diseñadores ya no consideran la energía y la masa como las únicas metas para el uso eficiente; ahora también consideran el espacio y el tiempo. Esto puede lograrse mediante la intensificación de productos y procesos en componentes más pequeños y más distribuidos.

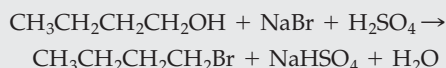
Tal vez el abarcamiento más visible y exitoso de este principio a través de los años ha sido en productos electrónicos. Hace unas décadas, las computadoras eran del tamaño de habitaciones grandes. Ahora las computadoras con tan buen poder de procesamiento caben en dispositivos del tamaño de una baraja de cartas o menor. Sin embargo, es importante recordar la advertencia general y el concepto fundamental de una perspectiva del ciclo de vida.

La generación de desperdicio se puede considerar como un defecto de diseño, y una manera de medirlo para los materiales es en términos de un factor E. Un **factor E** se define para medir la eficiencia de varias industrias químicas en términos de kilogramos de entradas de material relativas a los kilogramos del producto final (Sheldon, 1992). El factor E no considera a los químicos y los materiales que no estén directamente involucrados en



**ejemplo/7.13** Determinación del factor E

Calcule el factor E para el producto deseado, dado el siguiente proceso de producción de químicos



La tabla 7.10 proporciona detalles acerca de las moléculas involucradas.

**Tabla / 7.10****Información necesaria para el ejemplo 7.13**

Tipo	Fórmula molecular	Peso molecular	Peso (g)	Mol
Reactivo	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OH	74.12	0.8 (añadido)	0.80 (añadido)
Reactivo	NaBr	102.91	1.33 (añadido)	1.33 (añadido)
Reactivo	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	98.08	2.0 (añadido)	2.0 (añadido)
Producto deseado	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> Br	137.03	1.48	0.011
Auxiliar	NaHSO <sub>4</sub>			
Auxiliar	H <sub>2</sub> O			

**solución**

$$\text{Factor E} = \frac{\Sigma \text{ kg de entrada}}{\Sigma \text{ kg de producto}}$$

$$\text{Factor E} = \frac{0.0008 + 0.00133 + 0.002}{0.00148} = 2.8$$

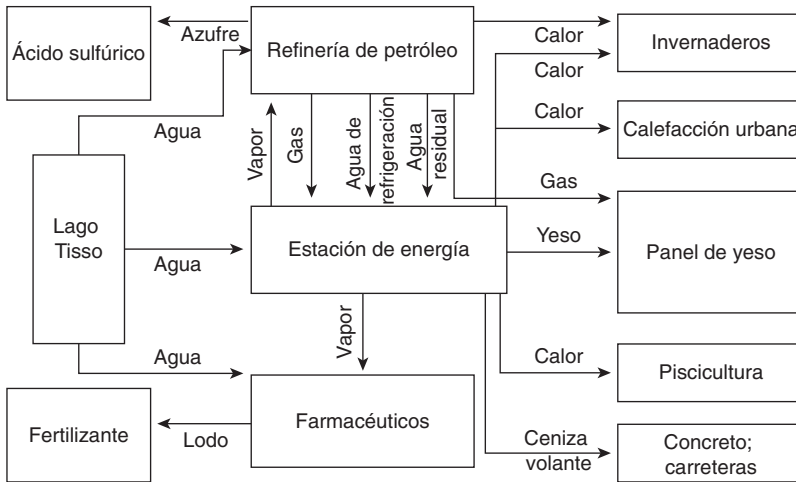
En este ejemplo, se requieren 2.8 veces más de masa de insumos de material de la que se obtiene en el producto final.

Considere que este tipo de cálculo sólo es una medida de eficiencia de masa y no considera la toxicidad de los materiales utilizados o generados.

la reacción, como los solventes y el agua de enjuague. Un factor E se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Factor E} = \frac{\Sigma \text{ kg de entrada}}{\Sigma \text{ kg de producto}} \quad (7.6)$$

De acuerdo con Sheldon, los químicos de volumen tienen un factor E de menos de 1 a 5, comparado con 5 a mayor de 50 para químicos finos, y 25 a más de 100 para farmacéuticos.



**Figura 7.18** Diagrama esquemático de un parque ecoindustrial en Kalundborg, Dinamarca, que ilustra flujos de material y energía. Aquí las aplicaciones industriales y comerciales están interconectadas de manera tal que los materiales locales que son el desperdicio de un proceso se vuelvan materia prima de un proceso cercano.

De Wernick (1997).

#### 7.4.9 INTEGRACIÓN DE FLUJOS DE ENERGÍA Y MATERIALES LOCALES

El principio de la Ingeniería Verde de integrar los flujos de energía y materiales está relacionado con los análisis anteriores sobre los tipos de ecología industrial y ecosistemas. Mientras que es importante considerar los sistemas de vuelta cerradas en donde el desperdicio iguala a los alimentos (tipo 3), no es necesario replicar siempre este concepto dentro de un solo proceso o más aún una sola instalación. Cualquier diseño es implementado dentro de un contexto de flujos de energía y materiales, algunos de los cuales pueden existir más allá de la instalación pero aun dentro de la comunidad local o regional.

Tal vez no existe mejor ejemplo actual de un diseño entre procesos de gran escala para la integración de flujos de energía y materiales que el parque ecoindustrial ubicado en Kalundborg, Dinamarca (figura 7.18). Este arreglo representa la manifestación de la ecología industrial en la que las aplicaciones industriales y comerciales en su totalidad son el desperdicio de un proceso que se vuelve una materia prima de valor agregado para un proceso cercano. En este caso, advierta que lo que normalmente se consideraría como una emisión y responsabilidad ambiental ( $\text{SO}_2$ ) es ahora una materia prima de valor agregado para la manufactura y el panel de yeso ( $\text{CaSO}_4$ ). Lo mismo es verdad para la ceniza volante generada por la estación de energía, la cual se vende a un fabricante de cemento. De modo similar, el lodo producido de la manufactura farmacéutica, normalmente un costo de disposición y una carga ambiental, se vende a una compañía de fertilizantes como una materia prima de valor agregado. Lo mismo aplica para los flujos de energía que son compartidos benéficamente entre varios sectores industriales y residenciales de la comunidad.

#### 7.4.10 DISEÑO PARA EL MANEJO DEL TÉRMINO DE VIDA

Es imperativo considerar el término de vida de un producto o sistema, incluyendo las construcciones, en la fase de diseño, ya que las opciones se hacen a partir de las estructuras de montaje, sujetadores y el número y tipo de materiales. Una estrategia para direccionar esta cuestión es el **diseño**



#### Discusión en clase

Al utilizar materiales y energía fácilmente disponibles e integrarlos en el proceso o sistema, un diseñador puede incrementar la eficiencia global del sistema, reducir los costos mediante el uso de desperdicio como materia prima en vez de material virgen, y reducir los impactos a la salud humana y el ambiente. ¿Este tipo de arreglo para compartir el desperdicio y la materia prima tiene beneficios ambientales? ¿Qué hay acerca de los beneficios económicos? La respuesta a ambas preguntas es sí. Piense en un ejemplo y comente los beneficios ambientales, sociales y económicos.

**para el desmontaje (DfD)**, el cual es el diseño para el desmantelamiento eventual (todo o en parte) para la recuperación de sistemas, componentes y materiales.

El DfD es un fenómeno creciente dentro de las industrias fabricantes ya que se presta mayor atención al manejo del término de vida de los productos. El esfuerzo es llevado por la disposición creciente de grandes cantidades de productos de consumo, con la resultante contaminación y pérdida de materiales y energía que estos productos contienen. El DfD pretende maximizar el valor económico y minimizar los impactos ambientales a través de la reutilización, reparación, remanufactura y reciclaje.

Este proceso de diseño incluye el desempeño de los montajes, componentes, materiales, técnicas de montaje o construcción, y sistemas de información y manejo para lograr esta meta. La recuperación de materiales maximiza el valor económico y minimiza los impactos ambientales a través de la reutilización, reparación, remanufactura y reciclaje. De último recurso están la recuperación de energía de materiales y la biodegradación segura. El DfD permite que los esfuerzos de soporte de flexibilidad, convertibilidad, mejorabilidad y expansibilidad eviten la disposición de productos o la eliminación de edificios.

## 7.5 Medición de la sustentabilidad

Un **indicador**, en general, es algo que apunta hacia una cuestión o condición. Su propósito es el de mostrarle qué tan bien está funcionando un sistema. Si existe un problema, un indicador puede ayudarle a determinar qué dirección tomar para direccionar la cuestión. Los indicadores son tan variados como los tipos de sistemas que monitorean. Sin embargo, como se listó en la tabla 7.11, los indicadores efectivos tienen ciertas características en común.

Un ejemplo de un indicador es el marcador de gasolina de su auto. El marcador de gasolina le muestra cuánta gasolina queda en su auto. Si el marcador muestra que el tanque está casi vacío, sabe que es momento de llenarlo. Otro ejemplo de un indicador es una tarjeta de reporte de medio curso. La misma muestra al estudiante y al instructor si están haciéndolo lo suficientemente bien como para pasar al siguiente grado o si se necesita ayuda extra. Ambos

**Tabla / 7.11**

### Características de indicadores efectivos

- Los indicadores efectivos son relevantes; le muestran algo del sistema que necesita saber.
- Los indicadores efectivos son fáciles de entender, aún para la gente que no es experta.
- Los indicadores efectivos son confiables; puede confiar en la información que le proporciona el indicador.
- Los indicadores efectivos son cuantificables; puede medir numéricamente la información que el indicador está rastreando.
- Los indicadores efectivos se basan en datos accesibles; la información está disponible o puede ser reunida mientras aún haya tiempo para actuar.

FUENTE: Con el permiso del Consorcio de Indicadores de la Comunidad ([www.communityindicators.net](http://www.communityindicators.net))

indicadores proporcionan información para ayudar a prevenir o resolver problemas, esperanzadamente antes de que se vuelvan muy severos.

Un ejemplo de un indicador unidimensional común del progreso económico es el producto interno (doméstico) bruto (GDP). Advierta, sin embargo, que muchos argumentan que el GDP no es suficiente para ser utilizado como un indicador de sustentabilidad debido a que mide la productividad económica en áreas que no serían consideradas en una visión de un mundo más sustentable; por ejemplo, las prisiones, el control de contaminación y el tratamiento para el cáncer.

Mientras que los principios de la ingeniería verde proporcionan un marco para los diseñadores, muchos enfocados en los esfuerzos de sustentabilidad también desarrollan métricas o indicadores para monitorear su progreso en cumplir con las metas de sustentabilidad. Un indicador de sustentabilidad (SI) mide el progreso hacia el logro de una meta de sustentabilidad. Los indicadores de sustentabilidad deberían ser una recolección de indicadores que representan la naturaleza multidimensional de la sustentabilidad, considerando las facetas ambientales, sociales y económicas. En términos de indicadores de sustentabilidad de campus, la Asociación de Líderes Universitarios para un Futuro Sustentable dice:

*La sustentabilidad implica que las actividades críticas de una institución de educación superior (son por lo menos) con tendencia ecológica, socialmente justas y económicamente viables, y que continuarán siendo así para las futuras generaciones.*

(ULSF, 2008).

La tabla 7.12 compara los indicadores tradicionales contra los de sustentabilidad para una comunidad, incluyendo qué nueva información de los indicadores de sustentabilidad proporcionan sobre el progreso hacia la sustentabilidad que no sea capturado por indicadores más tradicionales.

## 7.6 Políticas que regulan la ingeniería verde y la sustentabilidad

Existe un vínculo cercano, aunque con frecuencia no reconocido, entre la política y el diseño de ingeniería. Las políticas son con frecuencia dirigidas para la protección del bien público en la misma manera que la química y la ingeniería verdes están dirigidas para la protección de la salud humana y el medio ambiente. La política puede ser un regulador poderoso que influencia los diseños de ingeniería en términos de qué material y fuentes de energía se usan a través de subsidios y regulaciones estrictas sobre emisiones. De esta manera, la política puede jugar un papel significativo en el soporte de diseño de ingeniería para sustentabilidad. Dos tipos de políticas principales pueden afectar el diseño en esta escala: reglamentos y programas voluntarios.

### 7.6.1 REGLAMENTOS

Un **reglamento** es una restricción legal promulgada por las agencias administrativas gubernamentales mediante la creación de reglas soportadas por una amenaza de sanción o multa. Mientras que los reglamentos ambientales tradicionales se enfocaban en las liberaciones de final de tubería, existe un área de políticas de emergencia enfocada en el diseño sustentable. Dos de los ejemplos más establecidos incluyen las iniciativas de **responsabilidad extendida del producto (EPR)** y la cobertura de sustancias específicas.

#### Estadísticas nacionales de transportación: transportación, energía, medio ambiente

<http://www.bts.gov/>

#### Seattle sustentable

<http://www.sustainableseattle.org>

#### Asociación de Líderes Universitarios para un Futuro Sustentable

<http://www.ulsf.org/>

Tabla / 7.12

**Indicadores tradicionales contra indicadores de sustentabilidad para una comunidad y qué se dice acerca de la sustentabilidad**

Indicadores económicos	Tradicional	Ingreso medio. Ingreso per cápita relativo al promedio de Estados Unidos. Tamaño de la economía según la medición de PNB y PBI.
	Sustentable	Número de horas de empleo pagado al salario promedio requerido para soportar las necesidades básicas. Salarios pagados en la economía local que se gastan en la economía local. Dólares gastados en la economía local que pagan el trabajo local y los recursos naturales locales. Porcentaje de economía local basada en los recursos renovables locales.
	Énfasis de indicador de sustentabilidad	Qué salario puede comprar. Define las necesidades básicas en términos de consumo sustentable. Resiliencia financiera local.
Indicadores ambientales	Tradicional	Niveles ambientales de contaminación en el aire y el agua. Toneladas de desperdicio sólido generadas. Costo de combustible.
	Sustentable	Uso y generación de materiales tóxicos (para la producción y el término de uso). Millas de vehículos viajadas. Porcentaje de productos producidos que son durables, reparables o fácilmente reciclables o para hacer composta. Energía total utilizada de todas las fuentes. Radio de energía renovable utilizada en tasa renovable a energía no renovable.
	Énfasis de indicador de sustentabilidad	Actividades de medición que provocan contaminación. Uso de materiales conservativo y cíclico. Uso de recursos en tasa sustentable.
Indicadores sociales	Tradicional	Número de votantes registrados. SAT y otros marcadores de pruebas estandarizados.
	Sustentable	Número de votantes que votan en las elecciones. Número de votantes que asisten a las juntas de la ciudad. Número de estudiantes entrenados para trabajos que están disponibles en la economía local. Número de estudiantes que van al colegio y regresan a la comunidad.
	Énfasis de indicadores de sustentabilidad	Participación en el proceso democrático. Capacidad para participar en el proceso democrático. Hacer coincidir las habilidades de trabajo y el entrenamiento con las necesidades de la economía local.

La EPR, así como la directiva de desperdicios de equipo eléctrico y electrónico (WEEE,) de la Unión Europea (UE), mantienen la responsabilidad en los fabricantes originales de los productos durante su ciclo de vida. La directiva de la WEEE pretende minimizar el impacto de los bienes eléctricos y electrónicos en el medio ambiente al incrementar la reutilización y el reciclaje y al reducir la cantidad de equipos eléctricos y electrónicos enviados a rellenos sanitarios. Busca lograr esto al hacer a los productores responsables del financiamiento de la recolección, tratamiento y recuperación de equipo eléctrico de desperdicio, y al obligar a los distribuidores (vendedores) a permitir a los consumidores regresar su equipo de desperdicio sin ningún costo. Esto lleva a los ingenieros a diseñar equipos eléctricos y electrónicos con los principios de la ingeniería verde en mente. Por ejemplo, este diseño pretende la facilidad del desmontaje, la recuperación de componentes complejos y la diversidad de material minimizada. Un impacto positivo de esta propuesta desde la perspectiva de una empresa es que reconecta al consumidor con el fabricante en la etapa de término de vida.

Otra propuesta de políticas para llevar al diseño de ingeniería hacia metas sustentables es la de bloquear sustancias específicas que son preocupantes. Un ejemplo muy cercano a la directiva de la WEEE es la **Restricción de Sustancias Peligrosas (RoHS)**, de Estados Unidos. La RoHS está enfocada en “la restricción del uso de ciertas sustancias peligrosas en equipos electrónicos y eléctricos”. Esta directiva bloquea el posicionamiento en el mercado estadounidense de nuevos equipos eléctricos y electrónicos que contengan más de los niveles acordados de plomo, cadmio, mercurio, cromo hexavalente y retardadores de flama de bifenil polibromado (PBB) y éter difenil polibromado (PBDE). Al bloquear estos químicos de preocupación en niveles significativos, esta directiva está llevando a la implementación de los principios de ingeniería y química verdes en términos del diseño de químicos y materiales alternativos que reducen o eliminan el uso y la generación de sustancias peligrosas y previenen la contaminación.

### 7.6.2 PROGRAMAS VOLUNTARIOS

Otra estrategia de política para la promoción de la ingeniería verde es el establecimiento de **programas voluntarios**. Estos programas no se rigen por la ley o son aplicables, pero pretenden promocionar y motivar comportamientos deseables. El gobierno, la industria o las organizaciones no gubernamentales de terceros pueden patrocinar estos programas. Mientras que existen muchas variedades diferentes de programas voluntarios, dos tipos que han sido establecidos con éxito son ecoetiquetar y compras preferenciales.

Los estándares ambientales permiten una evaluación ambiental del impacto de un producto en factores como la contaminación, el hábitat de vida silvestre, energía, recursos naturales, agotamiento del ozono y calentamiento global, y la contaminación tóxica. Las empresas que cumplen los estándares ambientales para su producto o servicio específico pueden aplicar una **ecoetiqueta**. Las ecoetiquetas pretenden proporcionar un indicador al consumidor sobre el desempeño ambiental del producto (por ejemplo, “empaje reciclado” o “emisiones no tóxicas”). Los terceros independientes, como Green Seal, el Consejo de la Construcción Ecológica de Estados Unidos y EnergyStar, proporcionan una verificación de etiquetas ambientales y certificaciones, para que estas etiquetas sean lo más confiables. Las ecoetiquetas de las partes principales son autopremiadas, por lo que son verificadas independientemente. En Estados Unidos, esta clase de etiquetas son regidas

#### Iniciativas de la comisión europea

<http://ec.europa.eu/environment/>

#### EnergyStar

<http://www.energystar.gov/>

#### Green Seal

<http://www.greenseal.org/>

#### Edificios verdes

<http://www.usgbc.org>

por los lineamientos de la Comisión Federal de Comercio (FTC,) para el uso de declaraciones de mercado ambiental y deben ser certeras. La FTC ha tomado acciones contra diversos fabricantes por violar las leyes de la veracidad en la publicidad.

Para apoyar aún más estos programas, muchas organizaciones están implementando estas políticas **preferentemente ambientales o de compra preferencial**. Estas políticas pueden implementarse por cualquier organización (hasta su colegio o universidad) y establecer obligatoriamente una preferencia para comprar productos desde artículos de oficina hasta computadoras hasta químicos industriales con perfiles de salud ambiental y humana mejorados. Al especificar compras de este tipo, las organizaciones están creando una demanda en el mercado para productos y servicios con impactos reducidos en la salud humana y el medio ambiente, una herramienta muy poderosa para conducir a la innovación en esta área para reducir los costos de estos productos mediante economías de escala.

La tabla 7.13 proporciona razones por las que las empresas adoptan políticas de compra ambientales y los tipos de ahorros que logran como resultado. Muchas empresas adoptaron políticas de compra ambientales debido a razones de negocios tradicionales como se describe en la tabla 7.13. Aunque estas razones resultan en beneficios intangibles, existen ejemplos específicos de costos mediblemente reducidos asociados con la compra de productos preferiblemente ambientales. Estos incluyen un precio de compra más bajo (como en el caso de productos remanufacturados), costos operacionales reducidos (por ejemplo, a través de la eficiencia de energía), costos de disposición reducidos (por ejemplo, productos más durables) y costos de manejos peligrosos reducidos (por ejemplo, menos productos tóxicos). En adición, la compra de productos preferentemente ambientales puede reducir el potencial de responsabilidad futura de una organización, mejorar el ambiente de trabajo y minimizar el riesgo a los trabajadores.

**Tabla / 7.13**

**¿Por qué las empresas adoptan políticas ambientales de compra y qué ahorran?**

Razones de negocios para adoptar políticas de compras ambientales	Tipos de ahorros logrados a través de la compra preferentemente ambiental
Distinguir una empresa y sus productos de los competidores	Costos de reparación y reemplazo reducidos al usar productos más durables y reparables.
Evitar costos ocultos y buscar ahorros en costos	Costos de disposición reducidos al generar menos desperdicios
Incrementar eficiencia en la operación	Diseño y desempeño de los productos mejorados
Unirse a una tendencia de mercado industrial o internacional	Seguridad y salubridad del empleado incrementada en la instalación.
Reconocer preferencias de mercado: sirviendo a los clientes que tienen un interés declarado en los productos y prácticas "amigables al ambiente".	Costos reducidos de material para los fabricantes.

FUENTE: EPA, 1999.

## 7.7 Diseño de un futuro sustentable

Al aplicar los principios de la Ingeniería Verde y al considerar los conceptos fundamentales de la sustentabilidad, los ingenieros pueden contribuir a direccionar los retos tradicionalmente asociados con el crecimiento y desarrollo económicos. Esta nueva alerta proporciona el potencial para diseñar un mejor mañana; uno en el que nuestros productos, procesos y sistemas sean más sustentables, incluyendo el ser inherentemente benignos a la salud humana y al medio ambiente, el minimizar el uso de materiales y energía y el considerar el ciclo de vida total.

### Términos clave

- análisis de inventario
- biomimetismo
- ciclo de vida
- compra preferente o preferencialmente ambiental
- consecuencias no pretendidas
- costo del ciclo de vida (LCC)
- diseño de diagrama causal (CLD)
- diseño para el desmontaje (DfD)
- diseño para el medio ambiente (DFE)
- disposición
- ecodiseño
- ecoeficiencia
- ecoetiqueta
- ecología industrial
- evaluación del ciclo de vida (LCA)
- evaluación del impacto
- factor E
- función
- indicador
- inherencia
- ingeniería verde
- intangibles
- interés
- jerarquía de prevención de contaminación
- manejo de calidad total
- minimización de desperdicios
- pensamiento sistémico
- prevención de contaminación
- principios de ingeniería verde
- programa voluntario
- química verde
- reciclaje
- reducción de fuente
- reglamento
- resiliencia
- responsabilidad extendida del producto
- restricción de Sustancias Peligrosas
- riesgo
- Seis Sigma
- unidad funcional
- valor actual (PV)
- valor actual de una anualidad (PVA)
- valor futuro (FV)
- valor futuro de una anualidad (FVA)
- tratamiento





## capítulo/Siete Problemas

**7.1** Los gastos de tener y operar una instalación tradicional de tratamiento de aguas residuales son muy altos para la comunidad local. La comunidad está buscando ideas para direccionar esta cuestión. ¿Cuáles son las oportunidades de diseño para mejoramiento escalado con grados crecientes de libertad y cuáles son los beneficios potenciales?

**7.2** Los laboratorios de enseñanza e investigación en su escuela resultan estar fuera del cumplimiento de los reglamentos de la EPA. A la EPA le gustaría un plan declarando cómo los laboratorios pueden estar dentro de los reglamentos. Con base en la jerarquía de prevención de contaminación, proporcione por lo menos una acción para cada nivel que su universidad podría tomar con respecto al desperdicio en los laboratorios de investigación. ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de cada acción?

**7.3** Visite el sitio web de los Premios Presidenciales a los Retos de la Química Verde en [www.epa.gov/greenchemistry/pubs/pgcc/past.html](http://www.epa.gov/greenchemistry/pubs/pgcc/past.html). Seleccione un proyecto pasado ganador de premio. Basado en la descripción de este proyecto, ¿cuáles son los beneficios ambientales, económicos y sociales de este avance de química verde?

**7.4** Comente si el zapato A (piel) o el zapato B (sintético) es mejor para el ambiente con base en los datos de la tabla 7.14. ¿Es posible pesar un aspecto (aire, agua, contaminación de la tierra o desperdicio sólido) como más importante que otro? ¿Cómo? ¿Por qué? ¿Quién toma estas decisiones en nuestra sociedad?

**7.5** Usted está preparando una evaluación del ciclo de vida de diferentes opciones de transportación para llegar

de su casa al trabajo (10 millas cada tramo). Las opciones incluyen bicicleta, una persona en un auto, tres o más personas en un auto o tomar el autobús. Escriba una posible meta, alcance, función y unidad funcional para este LCA.

**7.6** Dibuje un diagrama causal que vincule el consumo de energía, emisiones de aire, cambio climático, disponibilidad de agua, temperatura de la Tierra y la salud humana/calidad de vida.

**7.7** Dibuje y luego explique en palabras un diagrama causal para los siguientes elementos de sistema: PIB, población, consumo de recursos, calidad ambiental y salud. Luego redibuje el diagrama para incluir la ingeniería verde.

**7.8** ¿El tratamiento y distribución de aguas potables centralizado es más o menos resiliente que las tecnologías de tratamiento de agua de punto de uso? ¿Por qué o por qué no? ¿Importa si estos sistemas de tratamiento de agua son implementados en el mundo desarrollado o en desarrollo?

**7.9** Proporcione un ejemplo del reemplazo de un producto por un servicio que reduce o elimina el consumo de recursos (naturales y económicos) mientras proporciona la misma función. ¿Qué beneficios se asocian con la evolución del producto al servicio para este ejemplo?

**7.10** Está a punto de comprar un auto que durará 7 años antes de que tenga que comprar uno nuevo, y el Congreso estadounidense acaba de aprobar un nuevo impuesto sobre los gases de efecto invernadero. Suponga una tasa de interés anual de 5%. Tiene dos opciones: a) comprar un auto

usado por \$12 000, elevar el convertidor catalítico con un costo de \$1 000 y pagar un impuesto anual de carbono de \$500. Este auto tiene un valor bruto de \$2 000. b) Comprar un auto nuevo de \$16 500 y pagar solo \$100 dólares anualmente en impuesto de carbono. Este auto tiene un valor bruto de \$4 500. Con base en el costo anualizado de estas dos opciones, ¿qué auto compraría?

**7.11** Proporcione un ejemplo de un producto ya sea comercialmente disponible o actualmente bajo

**Tabla / 7.14**

**Ejemplo hipotético de impactos ambientales del ciclo de vida de los zapatos por 100 pares de zapatos producidos**

Producto	Uso de energía (Btu)	Consumo de materia prima	Uso de agua (gal)	Contaminación del aire (lb)	Contaminación del agua	Desperdicio peligroso y sólido
Zapato A (piel)	1	Provisión limitada, alguna renovable	2	4	2 libras de químicos orgánicos	2 libras de lodo peligroso
Zapato B (sintético)	2	Gran provisión, no renovable	4	1	8 libras de químicos orgánicos inertes	1 libra de lodo 3 libras de desperdicio sólido no peligroso

desarrollo que utilice el biomimetismo como la base para su diseño. Explique cómo el diseño está imitando un producto, proceso o sistema encontrado en la naturaleza.

**7.12** Dos reactores, bencil alcohol y cloruro de tosilo, reaccionan en la presencia de un auxiliar, trietilamina, y el solvente tolueno para producir el producto éster sulfonato (vea la tabla 7.15). Calcule el factor E para la reacción. ¿Qué pasaría al factor E si los solventes y químicos auxiliares fueran incluidos en el cálculo? ¿Estos tipos de materiales y químicos deberían ser incluidos en una medición de eficiencia? ¿Por qué o por qué no?

**Tabla / 7.15**  
**Información útil para el problema 7.12**

Reactor	Bencil alcohol	10.81 g	0.10 mol	MW 108.1 g/mol
Reactor	Cloruro de tosilo	21.9 g	0.115 mol	MW 190.65 g/mol
Solvente	Tolueno	500 g		
Auxiliar	Trietilamina	15 g		MW 101 g/mol
Producto	Éster sulfonato	23.6 g	0.09 mol	MW 262.29 g/mol

**7.13** Elija tres de los principios de la Ingeniería Verde (recuadro 7.1). Para cada uno, *a)* explique el principio en sus propias palabras; *b)* encuentre un ejemplo (comercialmente disponible o en desarrollo) y explique cómo demuestra éste el principio y, *c)* describa los beneficios ambientales, económicos y sociales asociados, identificando cuáles son tangibles y cuáles intangibles.

**7.14** Desarrolle cinco métricas o indicadores sustentables para un sector corporativo o industrial análogas a las presentadas para las comunidades en la tabla 7.12. Compárelas con las métricas o indicadores de negocios tradicionales. Describa qué nueva información puede determinarse de las nuevas métricas o indicadores sustentables.

**7.15** Una empresa de autos ha desarrollado un auto nuevo, el ecoCar, que da 100 millas por galón (mpg), pero el costo es ligeramente más alto que los autos actualmente disponibles en el mercado. ¿Qué tipo de incentivos podría ofrecer el fabricante o pedir al Congreso estadounidense que implementara para animar a los compradores a comprar el nuevo ecoCar?

**7.16** El equipo de diseño para un proyecto de construcción se formó en su empresa la semana pasada y ya tuvieron dos juntas. ¿Por qué es tan importante para usted involucrarse inmediatamente en el proceso de diseño?

**7.17** EcoStar necesita determinar cuánto cargar por el nuevo modelo greenCar. Desarrollar, producir y comercializar el greenCar le cuesta a EcoStar \$100 000 000 por año durante tres años antes de que se vaya al mercado. Una vez que llega al mercado, EcoStar no gastará ningún dinero adicional en el greenCar. A EcoStar le gustaría recuperar su inversión en el greenCar tres años después de su ingreso en el mercado. Si EcoStar anticipa la venta de 25 000 autos greenCar por año durante esos tres años, ¿Qué tanto necesitarían cambiar por greenCar por cambio de temporada? Suponga una tasa de descuento de 10%.

**7.18** Para comparar las bolsas de plástico y de papel en términos de adquisición de materias primas, manufactura y procesamiento, uso y disposición, utilice los datos proporcionados por Franklin Associates, una firma consultora estadounidense nacionalmente conocida cuyos clientes incluyen a la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, así como muchas empresas y grupos industriales. En 1990, Franklin Associates comparó las bolsas de plástico con las bolsas de papel en términos de sus emisiones de energía y aire/agua en la manufactura, el uso y la disposición. La siguiente tabla es el resultado de su estudio:

Etapas del ciclo de vida	Emisiones de aire (contaminantes) oz/bolsa		Energía requerida BTU/bolsa	
	Papel	Plástico	Papel	Plástico
Manufactura de materiales, manufactura de productos, uso de producto	0.0516	0.0146	905	464
Adquisición de materias primas, disposición del producto	0.0510	0.0045	724	185

*a)* ¿Qué bolsa elegiría si estuviera muy preocupado por la contaminación del aire? (Advierta que la información no le dice si las emisiones son tóxicas del aire o gases de invernadero. *b)* Si se supone que dos bolsas de plástico igualan una bolsa de papel, ¿cambia la opción? *c)* Compare la energía requerida para producir cada bolsa. ¿Qué bolsa requiere menos energía para su producción?

## Referencias

- Agencia de Protección Ambiental (EPA). 1999. "Pioneros del sector Privado: ¿Cómo las empresas están incorporando la compra preferentemente ambiental". Reporte No. EPA742-R-99-001.
- Anastas, P. T. y J. C. Warner. 1998. *Green Chemistry: Theory and Practice*. Oxford: Oxford University Press.
- Anastas, P. T. y J. B. Zimmerman. 2003. "Diseño a través de los doce principios de ingeniería verde". *Environmental Science and Technology* 37 (5): 94A-101A.
- Anastas, P. T. y J. B. Zimmerman. 2006. "Los doce principios de la ingeniería verde como un fundamento para la sustentabilidad". En: *Sustainability Science and Engineering: Principles Book*, ed. M. Abraham, Nueva York: Elsevier Science.
- Aronson, D. 2003. "Targeted Innovation: Using Systems Thinking to Increase the Benefits of Innovation Efforts". *R&D Innovator* (ahora *Innovative Leader*) 6(2).
- Asociación de Líderes Universitarios para un Futuro Sustentable (ULSF). 2008. "Cuestionario de Evaluación de Sustentabilidad". Sitio web de la ULSF, [www.ulsf.org/programs\\_saq.html](http://www.ulsf.org/programs_saq.html).
- Beckman, E. 2006. "Using Principles of Sustainability to Design 'Leap-Frog' Chemical Products". Procedimientos de la 10a. Conferencia Anual de Química e Ingeniería verde, junio de 2006. Washington, D.C.
- Bell, B., P. Franks, N. Hildreth y J. Melius. 1991. "Exposición al cloruro de metileno y el peso del nacimiento en el Condado de Monroe, Nueva York" *Environ Res* 55(1):31-39.
- Benyus, J. M. 2002. *Biomimetismo: Diseño inspirado en la innovación*, Nueva York: Harper Perennial.
- Cooper, J. S. y B. Vigon, 1999. "Lineamientos de ingeniería de ciclo de vida". Preparado para la Oficina de Investigación y Desarrollo de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, Laboratorio de Investigación de Manejo de Riesgo Nacional, por Battelle Memorial Institute, Contrato No. CR822956.
- Fiksel, J. 2003. "Diseñando sistemas resilientes, sustentables". *Environmental Science and Technology* 37:5330-5339.
- Graedel, T. y B. Allenby. 1995. *Ecología Industrial*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall.
- Hart, M. 2007. Sitio web de medidas sustentables, [www.sustainablemeasures.com](http://www.sustainablemeasures.com).
- Henneberry, M. 2002. *Paint and Coatings Industrial Magazine* 6.
- Schrödinger, E. 1943. *What Is Life?* Dublín: Instituto de Dublín para Estudios Avanzados.
- Sheldon, R. A. 1992. *Química e industria* 903.
- Wernick, I. y J. Ausubel. 1997. *Ecología industrial: algunas indicaciones para la investigación*. Preparado para la Oficina de Energía y Sistemas Ambientales, Laboratorio Nacional de Lawrence Livermore.