



Balances de materia y energía en ingeniería de bioprocesos

Pedro J. Fito Suñer | María Luisa Castelló Gómez
José Tarrazó Morell | Marta Castro Giráldez



Editorial

Universitat Politècnica
de València

BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA EN INGENIERIA DE BIOPROCESOS

**Pedro J. Fito Suñer
María Luisa Castelló Gómez
José Tarrazó Morell
Marta Castro Giráldez**



Editorial

Universitat Politècnica
de València

Colección Académica

Para referenciar esta publicación utilice la siguiente cita: Fito, P. J., Castelló, M.L., Tarrazó, J. y Castro-Giraldez M. (2020). *Balances de materia y energía en Ingeniería de Bioprocesos*. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València

© Pedro J. Fito Suñer
María Luisa Castelló Gómez
José Tarrazó Morell
Marta Castro Giráldez

© 2020, Editorial Universitat Politècnica de València
Venta: www.lalibreria.upv.es / Ref.: 6634_01_01_01

ISBN: 978-84-9048-938-3

Si el lector detecta algún error en el libro o bien quiere contactar con los autores, puede enviar un correo a edicion@editorial.upv.es

La Editorial UPV autoriza la reproducción, traducción y difusión parcial de la presente publicación con fines científicos, educativos y de investigación que no sean comerciales ni de lucro, siempre que se identifique y se reconozca debidamente a la Editorial UPV, la publicación y los autores. La autorización para reproducir, difundir o traducir el presente estudio, o compilar o crear obras derivadas del mismo en cualquier forma, con fines comerciales/lucrativos o sin ánimo de lucro, deberá solicitarse por escrito al correo edicion@editorial.upv.es

Autores

Pedro J. Fito Suñer

Profesor titular en el departamento de Tecnología de Alimentos y es co-director del grupo FoodPhotonics de la Universitat Politècnica de València. Ha dirigido varios proyectos competitivos de investigación en el área de los fenómenos de transporte y la fotónica. Profesor desde 1998, enseña fenómenos de transporte en sistemas biológicos.

María Luisa Castelló Gómez

Doctora Ingeniera Agrónoma desde 2007 y profesora de la Universitat Politècnica de València desde 2004. Imparte docencia en el área de Ingeniería de Procesos y es coautora de diversos artículos científicos dentro de este ámbito. Además, es coordinadora del título propio Diploma de Extensión Universitaria en Tecnología de Alimentos de la UPV.

José Tarrazó Morell

Profesor titular en el departamento de Tecnología de Alimentos de la Universitat Politècnica de València. Desde 1993 imparte fundamentos de Ingeniería de las Industrias Agroalimentarias. Ha publicado en la Editorial de la UPV, libros de teoría y problemas sobre estos temas.

Marta Castro Giráldez

Doctora Ingeniera Agrónoma y profesora del Departamento de Tecnología de Alimentos de la Universitat Politècnica de València. Además, es co-directora del grupo FoodPhotonics. Ha participado en diversos proyectos de investigación en el área de los fenómenos de transporte y la fotónica, aportando múltiples artículos científicos.

Resumen

El presente libro muestra la aplicación de balances de materia y energía a sistemas biológicos y biotecnológicos, incluyendo herramientas multimedia para su mejor comprensión. El contenido se estructura en tres capítulos: en el primero se realiza una introducción a como la ingeniería de procesos puede transformarse en una herramienta en el diseño de plantas biotecnológicas, y en el análisis de sistemas biológicos; en el segundo, se muestra cómo aplicar balances de materia en estos sistemas y, por último, en el tercero, se muestra la aplicación de los balances de energía a sistemas biológicos.

Comentarios previos

Este libro pretende enseñar, de manera interactiva, a plantear y realizar balances de materia y energía intercalando teoría escrita y en video, problemas y test de autoevaluación. Se recomienda que los alumnos empiecen el documento leyendo el texto y posteriormente vean los videos de cada apartado, ya que la información que aparece en los videos es un resumen del texto y se plantea como refuerzo para comprensión.

Todo el libro ha seguido la anotación y las unidades del sistema internacional de unidades y medidas publicado en el Green book 2007 IuPAC.

Para poder ver correctamente todo el contenido multimedia del libro, se recomienda descargarse previamente el software Adobe Acrobat Reader (<https://get.adobe.com/es/reader/>).

Índice

INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA DE PROCESOS	1
1. Introducción a la ingeniería de procesos	1
1.1. Fundamentos básicos en la ingeniería de procesos	2
1.2. Balance general	5
1.3. Estado Estacionario y Transitorio	6
BALANCES DE MATERIA	8
2. Introducción a los balances de materia	8
2.1. Estudio de grados de libertad	16
2.1.1. Análisis de variables independientes y ecuaciones determinadas	16
2.1.2. Estudio de grados de libertad	17
2.2. Balances de materia en estado estacionario	19
2.3. Balances de materia en estado transitorio	29
2.4. Colección de problemas de balances de materia.....	33
2.4.1. Colección de problemas de balances de materia en estado estacionario.....	33
2.4.2. Colección de problemas de balances de materia en estado transitorio.....	39
BALANCES DE ENERGÍA	42
3. Introducción a las energías más comunes en sistemas biológicos.	42
3.1. Tipos de energías.....	44
3.2. Introducción a los balances de energía.....	57
3.3. Balances de energía en estado estacionario.....	60
3.4. Balances de energía en estado transitorio.....	64
3.5. Colección de problemas de balances de energía	69
3.5.1. Colección de problemas de balances de energía en estado estacionario	69
3.5.2. Colección de problemas de balances de energía en estado transitorio	74
BIBLIOGRAFÍA.....	76
4.1. Bibliografía citada en el texto.....	76
4.2. Bibliografía recomendada	78
4.3. Vídeos y Podcast recomendados.	78
SOLUCIONES.....	79
Soluciones de balances de materia en estado estacionario.	79
Soluciones de balances de materia en estado transitorio.	83
Soluciones de balances de energía en estado estacionario.....	84
Soluciones de balances de energía en estado transitorio.....	85

INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA DE PROCESOS

1. Introducción

Desde el inicio del universo, se han producido cambios en la materia y la energía provocados por distintos fenómenos, estos cambios permitieron la formación de todos los cuerpos que conforman el universo actual. Mientras la complejidad de las cosas crecía, aumentaban exponencialmente los distintos fenómenos que producen dichos cambios. El sistema más complejo que existe en el universo, el sistema celular que permite la vida, es también el sistema en el que más tipos de cambios de materia y energía se producen.

La humanidad, desde la antigüedad, ha utilizado los cambios en la materia y la energía para transformar las cosas, desde utensilios y comida en la prehistoria, hasta el ensayo que permitió descubrir el bosón de Higgs en 2012 en el acelerador de hadrones del CERN. Leucipo de Mileto (siglo V a.C.) describió por primera vez el átomo, como la partícula mínima indivisible que forma la materia y Aristóteles (siglo IV a.C.) definió por primera vez la energía como “fuerza viva” ([Asimov, 1999](#)), palabra que, veintitrés siglos después, usaría Gottfried Leibniz para definir la energía cinética ([Nelson, 2005](#)).

Los fundamentos científicos necesarios para poder cuantificar los cambios en la materia y la energía tardaron en consolidarse. En el siglo XVIII Lavoisier estableció la Ley de conservación de la materia, ley que unificaba aportaciones de Descartes, Leibniz y Lomonosov al describirse como “la materia no se crea ni se destruye solo se transforma” ([Estevan, 2010](#)). Esto permitió que en el siglo XIX Mayer estableciera la Ley de conservación de la energía, con aportaciones de Joule o Helmholtz, definiéndose de la misma manera que la materia ([Logunov, 1998](#)). La fusión de ambas permitió, años después, definir el primer principio de la termodinámica, que inicialmente se definió únicamente con la energía y posteriormente incluyó la materia, enunciándose como “La materia y la energía ni se crean ni se destruyen, sólo se transforman”. En 1905 Einstein demostró que la ley no era estrictamente cierta al mostrar en su teoría de la relatividad que masa y energía eran intercambiables. Einstein y posteriores teorías de la mecánica cuántica han demostrado que en determinadas condiciones puede no cumplirse, pero que en la mayoría de los casos sigue siendo válida.

En paralelo a la búsqueda de cómo cuantificar los cambios de la materia y la energía, en el siglo XVII, Isaac Newton abrió un nuevo capítulo para la ciencia presentando una ecuación que describía el movimiento de los fluidos, con ella nacían los fenómenos de transporte. En el siglo

XIX Fick, basándose en la teoría cinética de los gases ideales de Boltzmann y Maxwell, desarrolló una ecuación para predecir el transporte de especies químicas ([Bird et al., 2006](#)). En el mismo siglo, Fourier, ilustre matemático, desarrolló un modelo que permitía predecir la energía térmica transmitida a través de un sistema. Dichas ecuaciones ascendieron a la condición de ley gracias a distintos descubrimientos que se desarrollaron entre los siglos XIX y XX, aportados por Reynolds, Prandtl o Colburn, pero también mostraron amplias excepciones en las que no se cumplían. De estas excepcionalidades surgieron alternativas en fluidos como los modelos de Ostwald o Maxwell y en materia y energía con las relaciones de reciprocidad de Onsager ([Demirel, 2007](#)). Por este trabajo, Lars Onsager recibió en 1968 el premio nobel de química.

En la primera mitad del siglo XX, en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), distintos investigadores del departamento de química, compendieron el conocimiento adquirido en los dos últimos siglos para montar un nuevo departamento y para plasmar las bases de lo que más tarde se denominaría Ingeniería de Procesos. Se dieron cuenta de que, para poder diseñar cualquier proceso industrial, era necesario aplicar conjuntamente todo este conocimiento.

Ingeniería de Procesos: área del conocimiento que estudia como cuantificar y predecir los cambios que sufre un sistema acotado cuando se le aplican actividades de transformación. Las transformaciones macroscópicas que puede sufrir un sistema pueden ser relativas a su materia o a su energía. Esto permite determinar y cuantificar los pasos de transformación que sufren una serie de materias primas que se ponen en contacto, aplicando cambios específicos en su entorno, con el fin de obtener una serie de productos finales.

La ingeniería de procesos, originariamente ingeniería química, comenzó con gran relevancia en la industria, siendo la base para el diseño de procesos de fabricación industrial en diversas áreas. A partir de esta ha surgido la ingeniería agroalimentaria, la ingeniería biotecnológica, la ingeniería química y nuclear, etc.

1.1. Fundamentos básicos en la ingeniería de procesos

Las herramientas agrupadas en la Ingeniería de Procesos nos permiten cuantificar las transformaciones de materia y energía, así como la velocidad a la que se producen, en un proceso de conversión de una serie de materias primas en un producto. Inicialmente podremos definir el **Proceso** como la secuencia de cambios, físicos y químicos, que sufren una serie de materias primas hasta convertirse en uno o varios productos.

Este proceso se realizará en etapas secuenciadas, de manera que en cada etapa se producirá una transformación de materia y/o energía obteniéndose productos intermedios. A cada etapa de transformación se le denominará Operación Unitaria ([Ibarz, 2005](#)).

Operación unitaria: tradicionalmente se ha considerado como operación a cada equipo perteneciente a una planta industrial. Sin embargo, realmente hace referencia a un volumen determinado en el cual entran y salen corrientes de productos con uno o más componentes, produciéndose en su interior algún tipo de transformación, bien sea por intercambio de componentes entre corrientes, por transformación química o bioquímica de sus componentes o por la acumulación de parte de las corrientes de entrada o salida en el interior del volumen.

Proceso: conjunto de operaciones unitarias que tienen como objetivo producir algún tipo de transformación en una serie de materias primas para obtener un determinado producto o productos.

Tradicionalmente el concepto de operación unitaria ha estado ligado a un equipo industrial, con una transformación claramente definida. En la figura 1.1 podemos ver como el proceso de obtención de aceite y harina a partir de semillas de girasol se realiza en 5 operaciones unitarias que corresponden con los equipos industriales usados en el proceso.

Una vez definidas las operaciones unitarias, y con el fin de facilitar la comprensión del proceso, cada operación unitaria se representa con un bloque, escribiendo en su interior un nombre que describa la transformación que se produce en su interior, utilizando flechas para indicar las corrientes que entran o salen de cada operación unitaria.

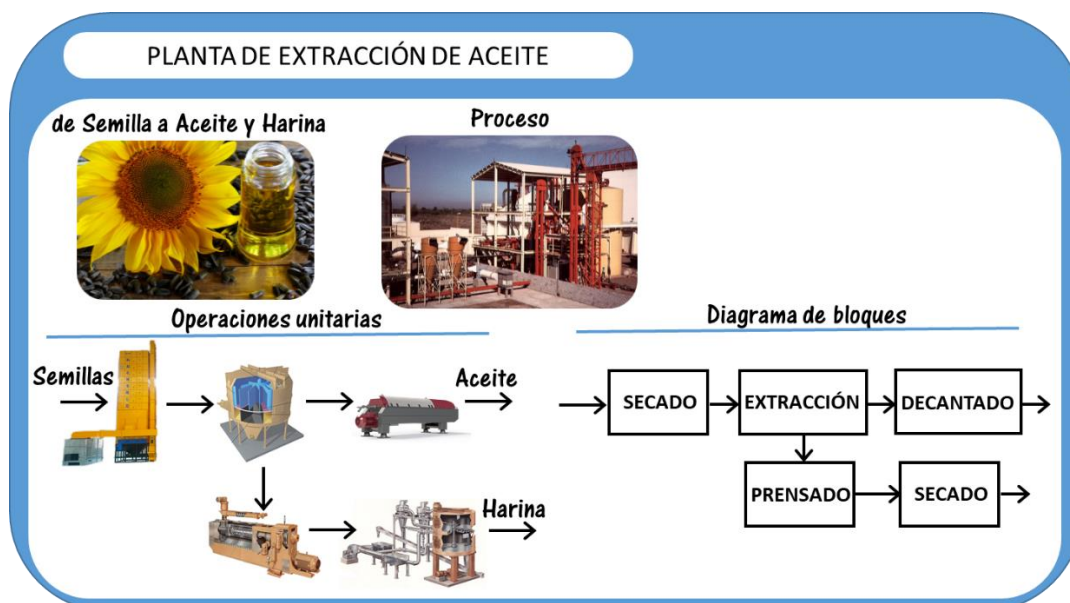


Figura 1.1 Proceso de obtención de aceite y harina proteica procedentes de semillas de girasol

Sin embargo, el estudio de procesos no se limita a los industriales, cualquier proceso de transformación en el universo puede ser descrito y cuantificado de la misma manera. Se pueden realizar análisis de procesos de transformación desde galaxias y planetas hasta sistemas celulares o atómicos. Un ejemplo es el análisis del proceso de digestión del etanol que se muestra en la figura 1.2.

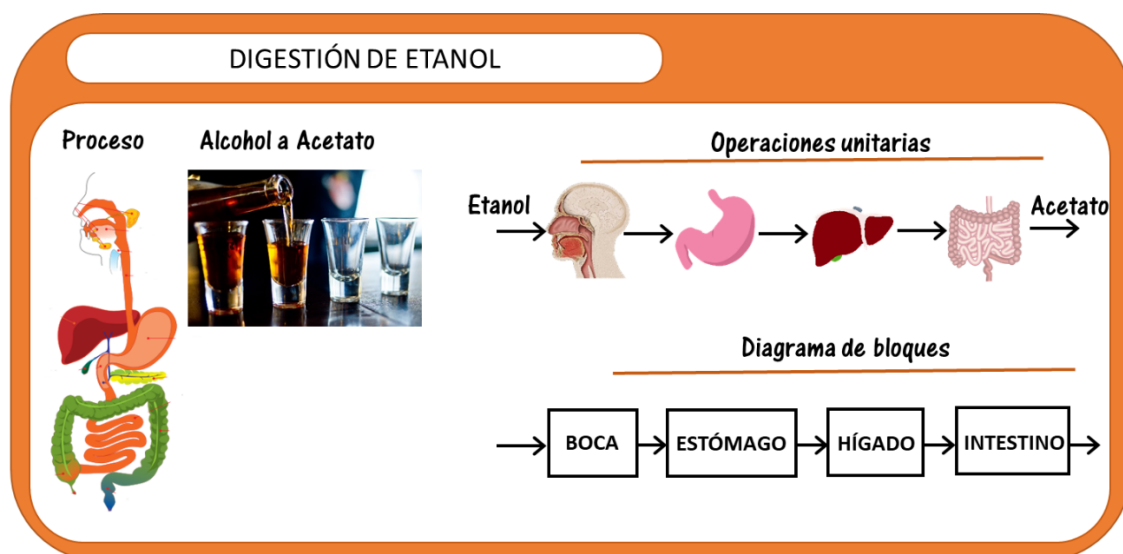


Figura 1.2. Proceso de digestión del etanol

Es más, al analizar un proceso, no es necesario subdividirlo en operaciones unitarias, es posible analizarlo subdividiéndolo en varias operaciones unitarias juntas o incluso en partes inferiores a una operación unitaria.

En la ingeniería de procesos moderna no existen límites para el análisis de un proceso. La acotación de las divisiones en las que repartimos el estudio del proceso las marcamos nosotros. Para acotar libremente un subsistema en un proceso nace el concepto de **volumen de control**.

Volumen de control: Acotación de una región determinada del proceso para ser estudiada. Al volumen de control que se desea estudiar se denomina también sistema. Cuando el volumen de control incluye todo el proceso se denomina **volumen global**. El volumen de control puede ser desde volúmenes diferenciales en una operación unitaria, una o varias operaciones unitarias hasta como máximo todo el proceso.

Los procesos pueden ser de dos tipos, los procesos formados por operaciones unitarias que transforman constantemente, requiriendo entradas de materias primas y salidas de producto sin que el sistema se detenga, denominados procesos en **continuo**. Si en el proceso existe alguna operación unitaria que requiere detener sus entradas y salidas para poder realizar la transformación entonces el proceso se denomina **intermitente o por cargas** (Felder y Rousseau, 1999).

Existe un tercer tipo para los procesos industriales denominados procesos **semicontinuos**. Estos procesos incluyen una operación por cargas, la diferencia con el proceso intermitente radica en que el tiempo de transformación requerido por esta operación es compensado en el resto de la línea aumentando la capacidad de la operación por cargas, es decir, si la línea procesa 1 t/h y la operación requiere 4 horas de transformación, la operación por cargas se dimensiona para que pueda transformar 4 t.

Proceso intermitente: todo proceso que incluya una operación unitaria que exija para su funcionamiento parar el movimiento del producto obligando a todo el proceso a pararse.

Proceso continuo: proceso compuesto por operaciones que provocan los cambios necesarios en el producto sin detener el movimiento del mismo manteniendo igual la masa de entrada y de salida de la operación. De esta manera, el proceso se mantiene funcionando siempre sin que la producción varíe con el tiempo.

Proceso semicontinuo: proceso con una operación unitaria por cargas que consigue mantener el proceso con producción constante aumentando la producción de la operación por cargas hasta un valor capaz de abastecer el final de la línea de producción en los intervalos de tiempo de paro de dicha operación.

1.2. Balance general

Los procesos de transformación que se producen en cada proceso se rigen por el primer principio de la termodinámica, es decir, **“la materia y la energía ni se crean ni se destruyen, solo se transforman”**. Esto implica que tanto para la materia como para la energía las posibilidades de transformación dentro de un sistema son limitadas.

Analicemos una operación unitaria formada por una planta (ver figura 1.3). Esta planta interactúa con la tierra, el aire y el sol, intercambiando materia y energía.

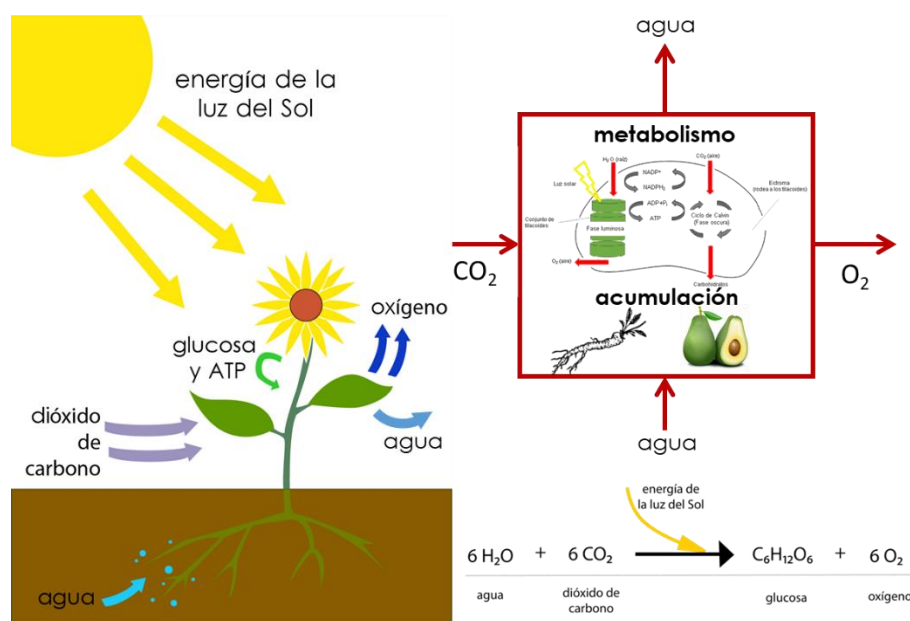


Figura 1.3. Balance General aplicado a una planta

Veamos las posibilidades de la materia y la energía dentro de esta operación unitaria:

Al analizar los intercambios de materia, podemos ver que procedente del aire **entra** dióxido de carbono y **salen** agua y oxígeno, y procedente de la tierra entran sales y agua. Parte del agua y el dióxido de carbono **reaccionan** para formar glucosa y oxígeno. Parte del agua, la glucosa y las

sales se **almacenan** en raíces y frutos. De esta forma, las especies químicas pueden **entrar o salir** de la planta, pueden **reaccionar** para consumirse o producirse y, por último, pueden **acumularse**.

En cuanto a la energía tendremos que, procedente del sol, la planta recibirá energía radiante, absorbiendo parte para transformarla en energía química para la fotosíntesis, y en energía térmica para calentar la planta. La otra parte de la energía radiante la reflejará, mostrando a los observadores los colores que posee. Procedente del aire y de la tierra se producirá una ganancia o pérdida de calor dependiendo de la temperatura del entorno. Por esta razón, al igual que ocurría con la materia, la energía podrá **entrar o salir** de la planta, podrá **transformarse** en otros tipos de energía o podrá **acumularse**.

De esta manera podemos definir el balance general de la siguiente manera:

$$\text{ENTRADAS} + \text{GENERACIÓN} = \text{SALIDAS} + \text{ACUMULACIÓN} \quad (\text{ec. 1.1})$$

Donde los términos de **entradas y las salidas** serán la suma de las corrientes de materia o energía que atravesarán los límites de la operación unitaria analizada, mientras que los términos de **generación y de acumulación** representarán las transformaciones que se producen dentro de la operación unitaria. El término de **generación** representará las especies químicas que reaccionan o las energías que se transforman, siendo negativo si se consume y positivo si se produce. El término de **acumulación** representará la materia o energía que se incrementa o disminuye en el interior de la operación unitaria sin transformarse.

1.3. Estado Estacionario y Transitorio

Tal y como se explicaba anteriormente, los procesos pueden ser continuos o intermitentes, esto implica que cada operación unitaria puede trabajar a su vez en continuo o por cargas. La diferenciación del sistema de trabajo de estos dos tipos de operación unitaria está directamente relacionada con el tipo de transformación que se produce en su interior. Si una operación trabaja en continuo, implica que constantemente está entrando y saliendo materia o energía sin que el interior sufra una transformación. Esto significa que una operación unitaria trabajando en continuo debería poder funcionar un tiempo infinito, es decir que su funcionamiento no dependerá del tiempo. En cambio, una operación unitaria que funcione por cargas, requiere parar el proceso durante el tiempo de transformación y, en consecuencia, su funcionamiento dependerá de la variable tiempo.

Que en una operación unitaria la transformación no dependa del tiempo, implica que la materia se mantenga en movimiento constante de avance y que el tiempo de transformación coincida con el tiempo de estancia de la materia en el interior de la operación unitaria. Es decir, que si situamos un sensor que mida propiedades químicas o físicas en un punto determinado de la operación unitaria, la medida que dé debe de ser constante e independiente del tiempo. Cuando la operación unitaria funciona independientemente del tiempo se dice que el sistema se encuentra en **estado estacionario**.

De manera inversa, cuando la operación unitaria funciona por cargas, las transformaciones que se produzcan en el sistema serán dependientes del tiempo. En estos casos, se dice que el sistema se encuentra en **estado transitorio** ([Bird, et al. 2006](#))

Respecto al balance general, la dependencia del tiempo afecta a la acumulación de materia o energía del sistema ya que, cuando la operación unitaria se encuentra en estado estacionario, el sistema no puede depender del tiempo, por lo que la acumulación ha de ser cero. Mientras que en una operación unitaria que esté en estado transitorio, sí que tendrá acumulación.

Estado estacionario: se dice que un sistema está en estado estacionario cuando todas las propiedades químicas y físicas, en un punto del sistema, permanecen constantes e invariables con el transcurso del tiempo, pudiendo ser distintas de unos puntos a otros.

Estado transitorio: se dice que un sistema está en estado transitorio cuando todas las propiedades físicas y químicas, en cualquier punto del sistema, varían con el transcurso del tiempo.

Los procesos que trabajan en estado estacionario, en el momento de arranque o parada tienen comportamiento transitorio y tardan un tiempo determinado en alcanzar el estado estacionario.

Pincha aquí [aquí](#) o usa el código QR si no ves correctamente los vídeos o si quieres ir a la autoevaluación.



http://tiny.cc/6634_intro

Código QR 1.1 Video y Autoevaluación del contenido del capítulo.

Capítulo 2

BALANES DE MATERIA

2. Introducción

Como se ha explicado en el capítulo anterior, los cambios de materia que se pueden producir en un determinado sistema o volumen de control, seleccionado por nosotros, se rigen por el primer principio de la termodinámica. Es decir, que las especies químicas que entran en nuestro volumen de control pueden transformarse en otras especies químicas, pueden quedarse almacenadas en el interior o pueden salir. Si nos fijamos en la figura 2.1 podemos ver un ejemplo del análisis descrito anteriormente sobre una célula. Una serie de especies químicas atraviesan la membrana a través de los canales proteicos y algunas reaccionan en los distintos metabolismos celulares, como el respiratorio, otras se almacenan en los reservorios de la célula, y, por último, algunas especies químicas son excretadas fuera de la célula.

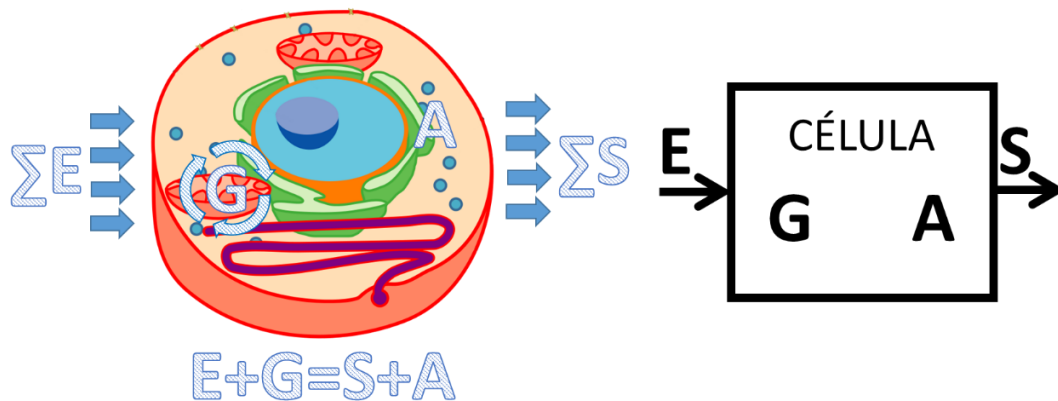


Figura 2.1. Volumen de control sobre una célula y la aplicación del balance general. Donde E representa las entradas, S las salidas, G las transformaciones químicas, bioquímicas o microbiológicas y A acumulación

Por tanto, podremos definir los términos del balance general aplicado a la materia, de la siguiente manera:

Para seguir leyendo, inicie el proceso de compra, [click aquí](#)