

INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA DE ALIMENTOS

MAGDA PIEDAD VALDÉS RESTREPO

INTRODUCCIÓN

La ingeniería de alimentos tiene varias líneas de trabajo en el sector agroalimentario, cuya función principal es la transformación de materias primas para la elaboración de productos alimenticios dirigidos a la alimentación humana y animal. En el proceso de elaboración de dichos productos, los ingenieros deben evaluar la trazabilidad desde las materias primas y aditivos, pasando por el proceso de elaboración, hasta obtener el producto final; en el almacenamiento se evalúa la vida útil del producto, para ello se debe aplicar el conocimiento sobre cada operación unitaria, cuyo objetivo siempre será modificar la o las materias primas para un determinado fin, teniendo en cuenta variables de proceso y de control, los fenómenos de transferencia de calor, transferencia de masa, migración producto-empaque y reacciones químicas, físicas y biológicas, con el fin de mantener el valor nutricional del producto.

La dinámica de alimentación mundial está dirigida hacia alimentos saludables y con altos contenidos de nutrientes, esto obliga a las líneas productivas alimentarias a acelerar el mejoramiento continuo y mantenerse dentro de la competencia “tamaño reto”, es por ello que en la elaboración de cada producto dentro de cada una estas líneas se encierran procesos de transformación constituidos en su mayoría por operaciones unitarias comunes, como son: selección, clasificación, limpieza y desinfección.

ción, lavado, empaque y almacenamiento; sin embargo, cada producto enmarca una línea de proceso diverso donde intervienen operaciones unitarias sofisticadas, sumado a las variables de proceso (temperatura, presión, tiempo, etcétera), lo que hace único al proceso.

El proceso es solo un eslabón de la cadena de valor, la cual empieza con la transformación de las materias primas hasta obtener un producto, seguido del almacenamiento, transporte y comercialización. Las líneas de producción en la industria alimentaria se agrupan según el tipo de alimento: industria cárnica, láctea, pesquera, oleícola, fruver, panificación, cacao, azúcar, vinos y cervezas, las más explotadas son las industrias lácteas, cárnicas y fruver. Independiente de la línea de producción, en todas se aplican los principios básicos de la ingeniería de alimentos y de la agroindustria, por tanto, el presente capítulo pretende darle al lector algunas pautas fundamentales en su continuo aprendizaje en el mundo de la industria alimentaria.

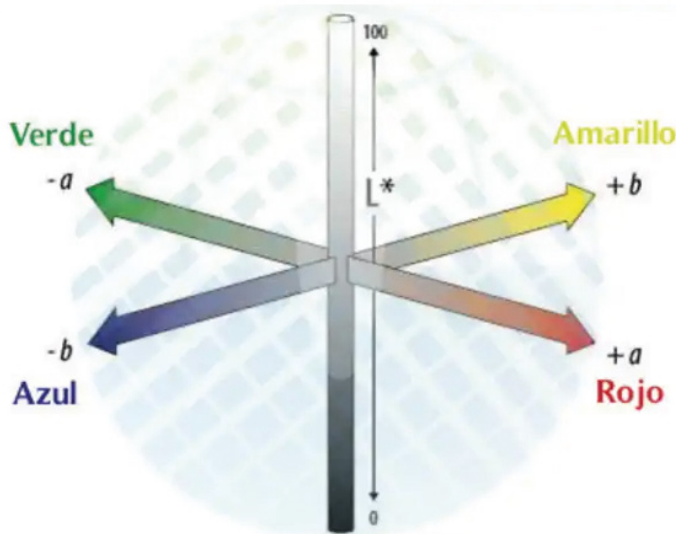
1.1. Propiedades organolépticas de los alimentos

La calidad de las materias primas que hacen parte de un producto alimenticio depende de varios factores, como son: agronómicos, ambientales, tecnológicos y comerciales, que a su vez influyen en las características sensoriales. Asociadas a estas características se reconocen cuatro propiedades organolépticas en los alimentos: color, olor, sabor y textura, las cuales se perciben a través de los sentidos. Sin embargo, la influencia del consumidor, los cambios de preferencia en alimentos y la cultura de sensaciones arraigadas han causado que la industria alimentaria emplee aditivos en sus procesos, con el fin de potenciar estas propiedades.

Color: es el primer contacto que tiene el consumidor con el alimento y suele acompañarse con la apariencia y forma, características que influyen en su decisión de consumo; es una característica subjetiva y sensorial, según Valdés-Restrepo et al. (2023) “La percepción del color es un fenómeno psicofísico donde se relacionan la fisiología de la visión, la psicología del observador y la energía espectral radiante de una fuente de luz visible”. En las frutas, el color del epicarpio cambia dependiendo del grado de madurez (según la pauta respiratoria presente durante el proceso de maduración se puede clasificar en fruto climatérico o no climatérico), variedad y ambiente (Rodríguez-Restrepo et al., 2023). El cambio de coloración se asocia con la presencia de pigmentos de forma natural en las materias primas o la formación de coloraciones ocasionadas en el proceso, debido a reacciones químicas de oxidación

y deterioro. El color se puede medir por diversas escalas y técnicas; se conocen dos escalas principales: el sistema Munsell y el sistema Hunter Lab (figura 1.1). Mediante el sistema Munsell, se establecen tres dimensiones de color: matriz, cromaticidad y luminosidad. Por otro lado, el sistema Hunter está representado por las letras L, A, B, denominado Hunter Lab. L (luminosidad), donde 0 es negro y 100 es blanco, A (rojo-verde), donde los valores positivos son rojos, los valores negativos son verdes y el cero es neutro, y B (amarillo-azul), donde los valores positivos son amarillos, los negativos son azules y el cero es neutro (Mathias-Rettig y Ah-Hen, 2014).

Figura 1.1. Coordenadas de color en el sistema Hunter Lab



Fuente: tomado de Mathias-Rettig y Ah-Hen (2014).

Las técnicas para medir el color son varias. Por ejemplo, visión digital es una técnica que genera imágenes por medio de cámaras digitales que utiliza un software y se interpreta la información como si lo hiciera el ojo humano, esta técnica tiene una amplia aplicación en el aseguramiento de calidad en la industria alimentaria, debido a que no es una técnica invasiva. Otras técnicas son: espectrofotometría, colorimetría, cartas de color, espectrorradiómetro o imágenes hiperespectrales (Valdés-Restrepo et al., 2023).

Olor: el olor va acompañado del aroma. El olor es la percepción de sustancias volátiles que dan fragancia, y el aroma es la detección de compuestos volátiles que se

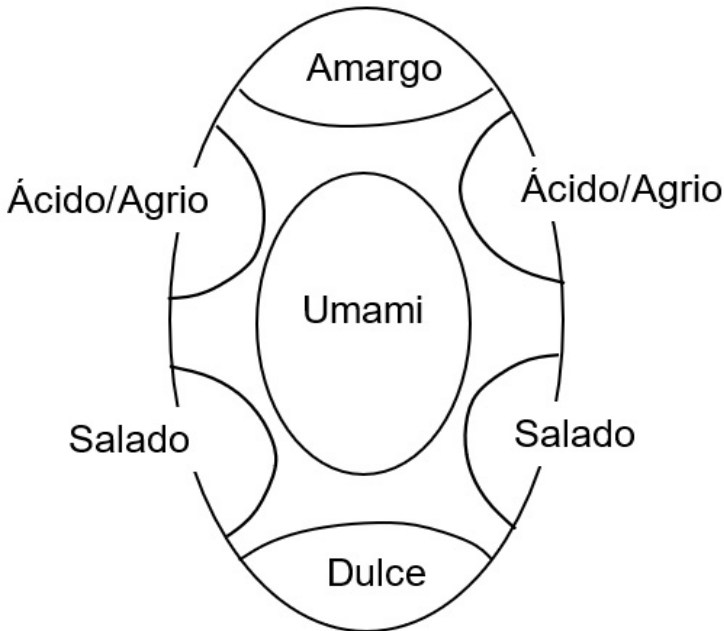
genera al masticar un alimento, los cuales se difunden entre el paladar y la faringe; el olor tiene un valor de umbral de olor, definido como la concentración mínima de una sustancia en la que personas entrenadas (panelistas) pueden identificar el olor característico de la sustancia (Amer et al., 2023). El sentido del olfato se debe a un receptor químico estimulado por las partículas aromáticas que emiten los cuerpos volátiles y estos llegan a las neuronas de dos formas: por el epitelio olfatorio (derecho e izquierdo) o por el canal que conecta la garganta con la nariz (Hernández et al. 2017). Los olores pueden ser naturales o artificiales, a aquellas materias primas que carecen de olor se les denomina inodoras. Los alimentos en contacto con el oxígeno sufren transformaciones químicas que ocasionan su deterioro y, por consiguiente, mal olor, es decir, ocurre un proceso químico de oxidación, donde se elimina un electrón de un átomo o grupo de átomos, siendo los compuestos fenólicos los que primero se oxidan en presencia del oxígeno (Lingjun, 2023).

Sabor: las papilas gustativas presentes en la lengua y en el paladar pueden identificar cinco tipos de sabores: dulce, salado, amargo, ácido y el recientemente descubierto quinto sabor, “el umami” (figura 1.2). Cuando se mastica un alimento, se liberan los sabores, estos compuestos se mezclan con la saliva y viajan hacia las papilas gustativas y es ahí donde se perciben (Duizer y Field, 2015). La reacción al sabor es tan crítica que la industria alimentaria cuenta con paleta de aditivos utilizados para estandarizar sabores y, en menor medida, enmascarar sabores (Orozco Colonia et al. 2023). Este mismo autor señala que la biomasa de las algas y cianobacterias tiene alta calidad nutricional, sin embargo, no se emplea a menudo en alimentos, debido a que resulta poco apetecible al producir sustancias como sulfuro de dimetilo y geosmina, que se producen por la degradación de aminoácidos y pueden dar olor a tierra húmeda y a compuestos volátiles; no obstante, un sabor indeseable puede ser útil, es así como la misma biomasa de algas que presenta un sabor desagradable al emplearse en alimentos dulces puede ser excelente en la preparación de un tentempié salado.

Umami significa “sabor agradable”, conocido como el quinto sabor, incluye los sabores dulce, salado, amargo y ácido. Con frecuencia se describe como un sabor a carne agradable, que se extiende por toda la lengua, se dice que actúa como el glutamato monosódico, que es un potenciador de sabor que estimula las papilas gustativas. El sabor umami fue descubierto en 1907 por el científico japonés Kikunae Ikeda, quien identificó el compuesto que inducía el umami, como L-glutamato, un aminoácido de las proteínas. Debido a este descubrimiento, Ikeda obtuvo una patente que le permitió fabricar el glutamato monosódico (GMS), que consiste en reemplazar un ion H del ácido L-glutámico con el ion Na, lo que induce el sabor uma-

mi puro sin sabor amargo. Se aceptan dos tipos de receptores umami: el heterodímero T1R1/T1R3 y los receptores metabotrópicos de glutamato (mGluR1 y mGluR4) presentes en la membrana de las células gustativas (Yamamoto e Inui-Yamamoto, 2023).

Figura 1.2. Mapa de sabores en la lengua



Fuente: elaboración propia.

Textura: es la propiedad cognitiva que se asigna a los alimentos (Irles y García, 2014) y se considera un atributo de calidad crítico para la selección en la industria alimentaria, la cual debe tener en cuenta las preferencias de textura del consumidor, que suelen cambiar con la edad de la persona (Vázquez-Frías et al., 2023), no obstante, la estructura de las materias primas es fundamental para la construcción de la textura deseada, por ejemplo, la textura de la carne se debe a la estructura de las fibras del tejido muscular, porcentaje de grasa y forma de separación de las fibras al masticar. La textura no tiene una definición exacta, lo que sí se sabe es que produce sensaciones de pegajoso, duro, tierno, blando, crujiente, harinoso, entre otros. La percepción de la textura se distingue mediante la interacción del producto

alimenticio con los dientes y la saliva, también se puede percibir mediante el tacto; según sea el producto que se quiera obtener, la textura se puede lograr aplicando tratamientos térmicos, empleando sacarosa para dar volumen y aportar color, mejorando no solo la textura sino el aspecto del producto. Se puede medir mediante análisis sensoriales o instrumentales, siendo el método instrumental más común el análisis de perfil de textura (APT) empleado para medir, cuantificar y desarrollar parámetros relacionados con la textura, el APT imita las condiciones cuando el producto es sometido a un proceso de masticación, muy empleado en productos cárnicos, quesos, frutas y hortalizas (Torres et al., 2015); el texturómetro es el equipo más empleado para medir la textura que, para la toma de decisiones, debe estar en sinergia con mediciones como dureza, consistencia, firmeza, resistencia, fibrosidad, pegajosidad, adhesividad, extensibilidad, cohesividad, masticabilidad, extruibilidad, gomosidad, resiliencia y elasticidad.

1.2. Diagramas

Las cadenas productivas emplean técnicas para la fabricación de alimentos cada vez más robustas y sofisticadas en pro de obtener productos de calidad y uniformes con procesos eficientes (Madrid Vicente, 2016). Los diagramas son una representación gráfica de cada una de las operaciones unitarias que al unir las forman un proceso, estos diagramas pueden ser:

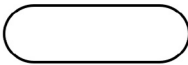
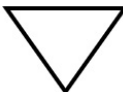
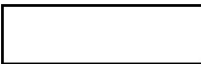
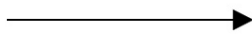
1. Diagrama de flujo de proceso
2. Diagrama de bloques de proceso
3. Diagrama de equipos de proceso

Diagrama de flujo de proceso (DFP), también conocido como flujograma (figuras 1.3 y 1.4), es una representación esquemática que incorpora la secuencia e interacción de las actividades de un proceso a través de símbolos; es una herramienta útil para el estudio de análisis de peligros y puntos críticos de control (APPCC), ya que en este diagrama se tiene una mirada global de proceso y se pueden identificar las posibles fuentes de contaminación y analizar los peligros en cada una de las etapas del proceso. Generalmente, se emplean símbolos (Peinado y Graeml, 2007) que permiten tomar decisiones y se pueden incluir equipos, materias primas, variables de proceso (temperatura, humedad, tiempos, etcétera) y reprocesos, es decir, información relevante.

Símbolos de diagrama de flujo

En los diagramas de flujo se utilizan símbolos para entender la actividad dentro del proceso. A continuación, en la tabla 1.1, se presentan los símbolos más empleados en este tipo de diagramas, sin embargo, no es obligatorio emplear todos los símbolos, solo se usan aquellos que representen las actividades según las necesidades del proceso para la toma de decisiones.

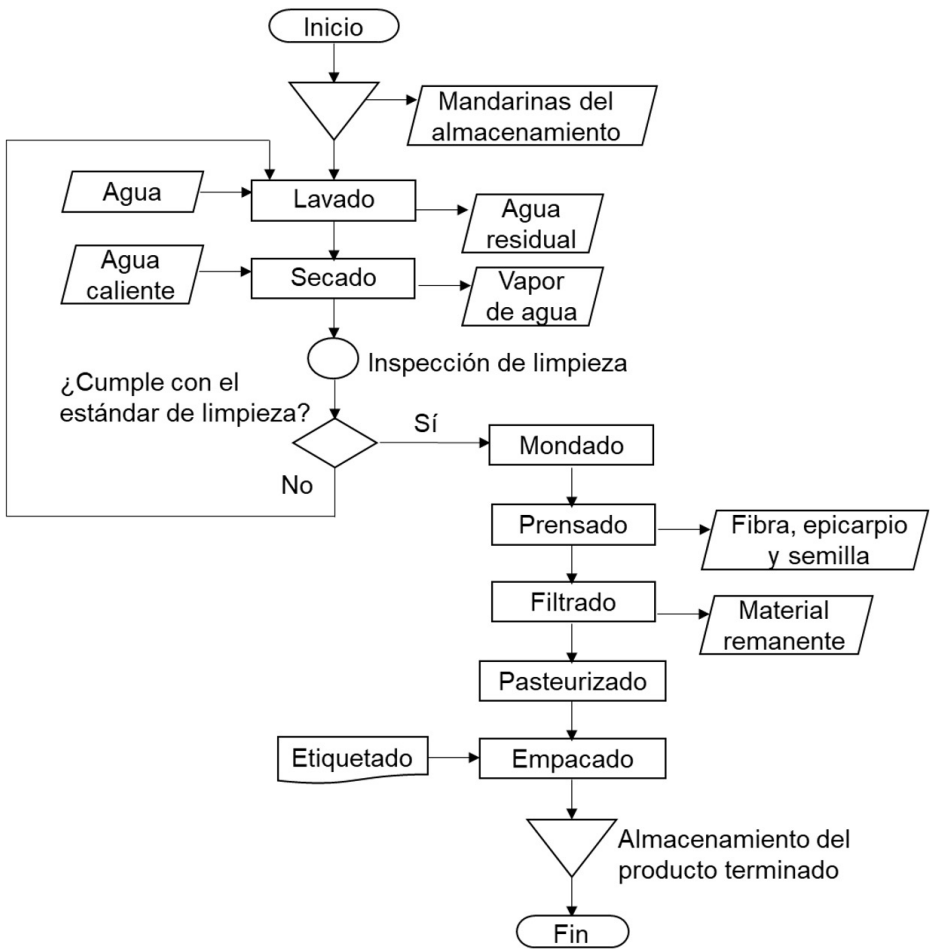
Tabla 1.1. *Símbolos empleados en diagramas de flujo de proceso*

Símbolo	Significado	Observaciones
	Conector	Indica la necesidad de conectar una parte del proceso con otra.
	Terminal	Indica el inicio o final de un proceso.
	Retraso o demora	Indica una espera dentro del proceso.
	Almacenamiento	Indica que el producto final se ha almacenado.
	Proceso	Indica la actividad que debe ser ejecutada.
	Decisión	Indica una toma de decisión.
	Línea de flujo	Indica la dirección de flujo del proceso.
	Documentación	Indica que se están empleando documentos en el proceso.
	Inspección	Indica que se está realizando un trabajo de control de calidad.
	Datos	Información relevante para el desarrollo del proceso.

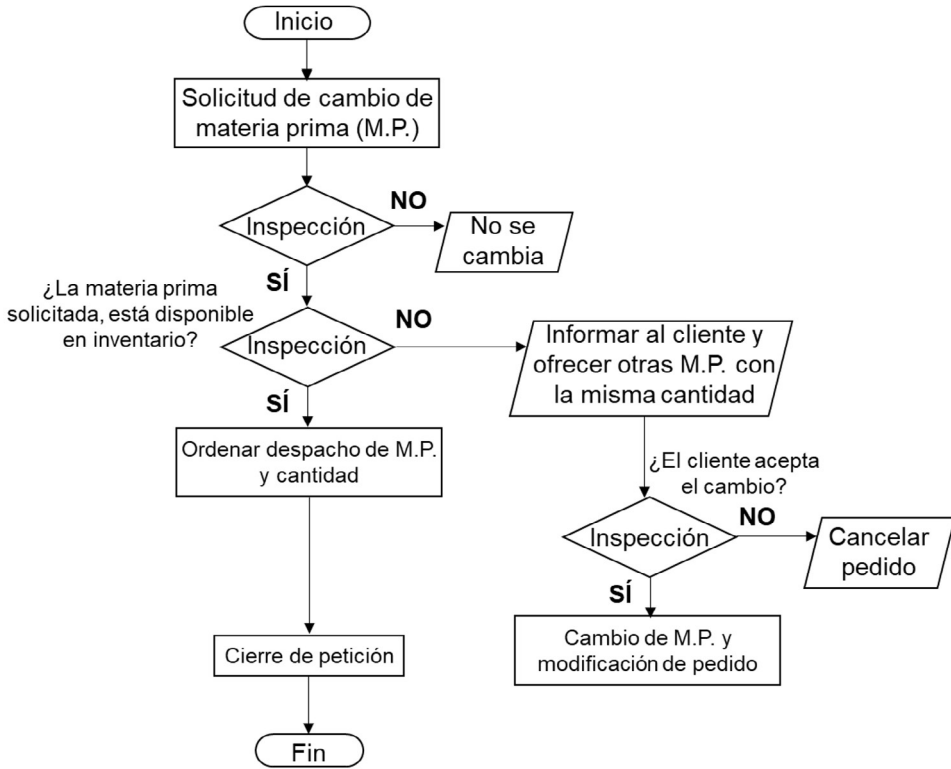
Fuente: elaboración propia.

Cuando se diseña un diagrama de flujo de proceso, se deben identificar todos los puntos o etapas involucradas para una mejor toma de decisión. A continuación, se presenta un esquema de un diagrama de flujo, donde se aplican los símbolos enunciados en la tabla 1.1.

Figura 1.3. Diagrama de flujo para un zumo de mandarina



Fuente: elaboración propia.

Figura 1.4. Diagrama de flujo para un producto alimenticio no conforme

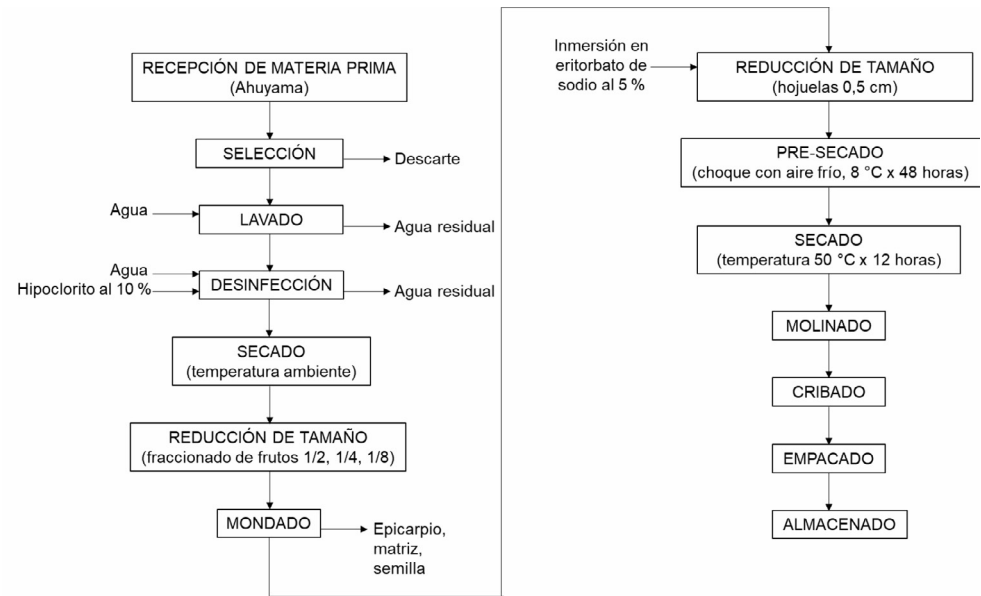
Fuente: elaboración propia.

En las figuras 1.3 y 1.4 se puede apreciar que se emplean los óvalos para indicar el inicio y el final del procedimiento de control del producto alimenticio, los rectángulos representan las acciones en cada etapa, el rombo se emplea para las bifurcaciones de toma de decisiones (sí o no existe) y las flechas indican la marcha del circuito.

Diagrama de bloques de proceso (DBP) es una representación esquemática de la secuencia de operaciones unitarias de un proceso en la elaboración de un alimento (producto) (Cedeño, 2017), los DBP se caracterizan porque cada operación unitaria se encuentra dentro de un rectángulo y debe escribirse preferiblemente en mayúscula (figuras 1.5 y 1.6). También se encuentran las corrientes de entrada, salida e intermedias representadas por flechas, las corrientes de entrada representan todo el material que entra a proceso, las corrientes de salida representan el material o residuo que sale del proceso y las corrientes intermedias representan las conexiones de una operación unitaria a otra. Dentro del rectángulo bajo la operación unitaria,

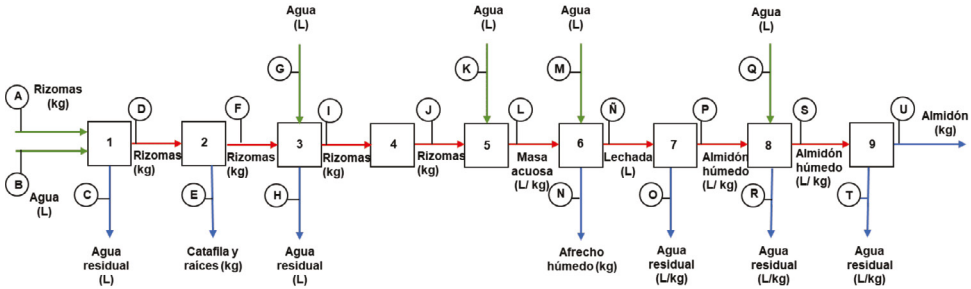
se puede registrar información contundente que sea vital para el proceso, como son las variables de control o de respuesta, por ejemplo: temperatura, presión, tiempo, entre otras, las cuales dependen del tipo de elaboración, es decir, del tipo de proceso. En el DBP puede registrarse información que determine la cantidad de producto que va a entrar o a salir del proceso, de manera que permita realizar un balance de masa, pero algo sí es claro, no entran ni salen equipos; por ejemplo, para la reducción de tamaño no entra un cuchillo o una tabla, estos elementos están inmersos dentro de la operación unitaria, por tanto, en el DBP lo que se resalta son las operaciones unitarias, las variables de control y las materias primas (figura 1.5).

Figura 1.5. Diagrama de flujo del acondicionamiento del fruto de ahuyama hasta harina



Fuente: Valdés-Restrepo et al. (2023a).

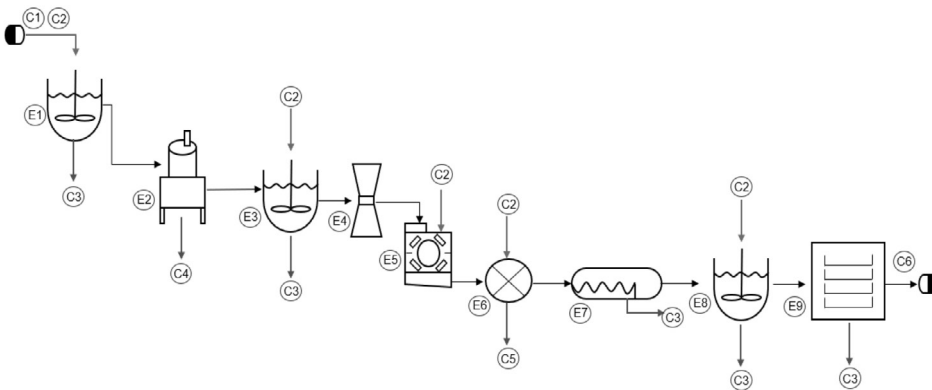
Las corrientes de entrada, salida e intermedias pueden ir acompañadas de letras que indican la trayectoria específica de esa corriente (figura 1.6) y las operaciones unitarias pueden representarse con números cuando el diagrama es muy extenso o involucra la unión de varios procesos; en cualquier caso, se debe especificar el nombre de la operación que representa el número.

Figura 1.6. Diagrama de flujo de la extracción de almidón de sagú (Maranta arundinacea)

Donde: 1. Lavado; 2. Pelado; 3. Lavado; 4. Reducción de tamaño; 5. Molinado; 6. Filtrado; 7. Tanque de sedimentación; 8. Lavado; 9. Secado.

Fuente: elaboración propia.

Diagrama de equipos de proceso (DEP), es un esquema del proceso productivo representado con equipos (figura 1.7). Se considera un diagrama más profundo que los DFP y DBP, porque se debe tener un conocimiento previo para comprender cada operación unitaria, y saber interpretar los símbolos y equipos presentes en el esquema. Los símbolos y dibujos de equipos se deben hacer lo más sencillos posible para su buen entendimiento.

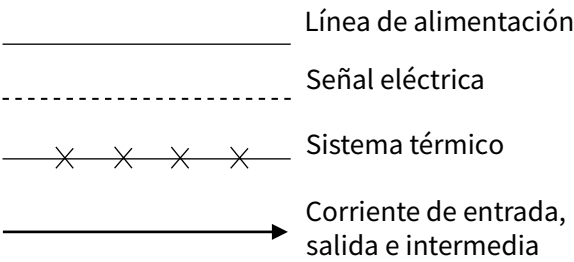
Figura 1.7. Diagrama de equipos para la extracción de almidón de sagú (Maranta arundinacea)

Donde: C: Corriente; E: Equipos; C1: Rizomas; C2: Agua; C3: Agua residual; C4: Catáfila y raíces; C5: Afrecho húmedo; C6: Almidón; E1: Tanque agitador; E2: Pelador; E3: Tanque agitador; E4: Triturador vertical; E5: Molino de martillos; E6: Filtro de aire; E7: Decantador; E8: Tanque agitador; E9: Secador de gabinete.

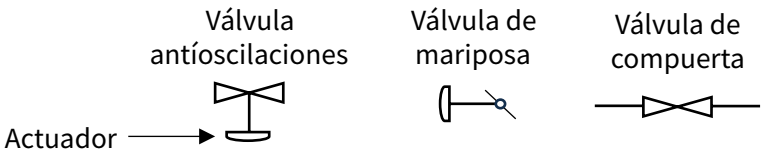
Fuente: elaboración propia.

Símbolos más empleados en los DEP: son diversos los símbolos empleados en los diagramas de procesos y de equipos, algunos de los más empleados son los siguientes:

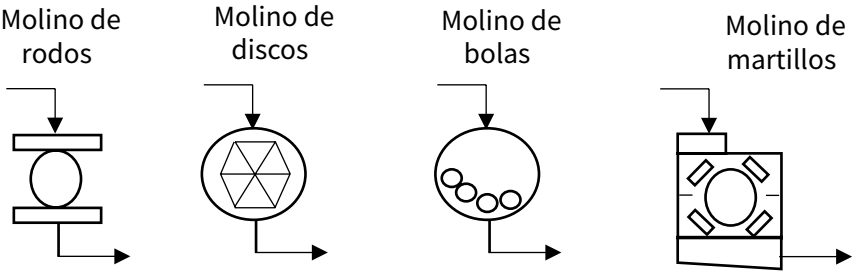
Tipos de corrientes



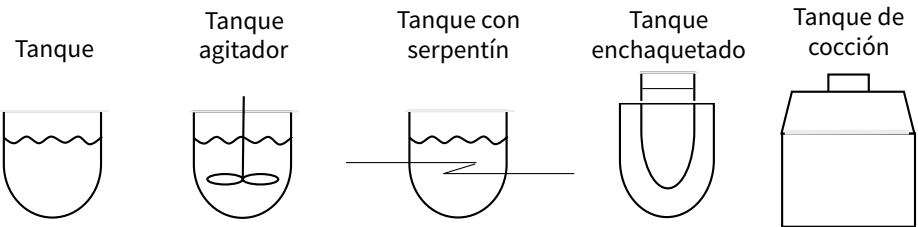
VÁLVULAS



MOLINOS

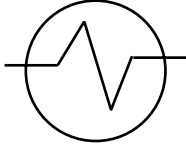


TANQUES

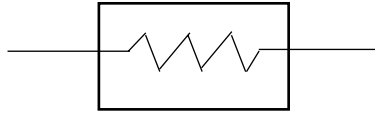


INTERCAMBIADORES

Intercambiador de calor

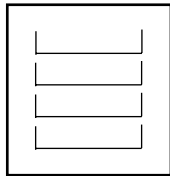


Cambiador de calor de placas

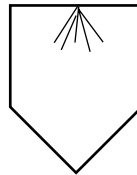


SECADORES

Secador de gabinete

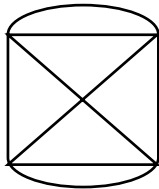


Secador por aspersión

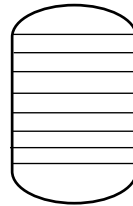


TORRES

Torre empacadora

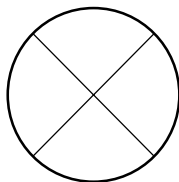


Torre de platos



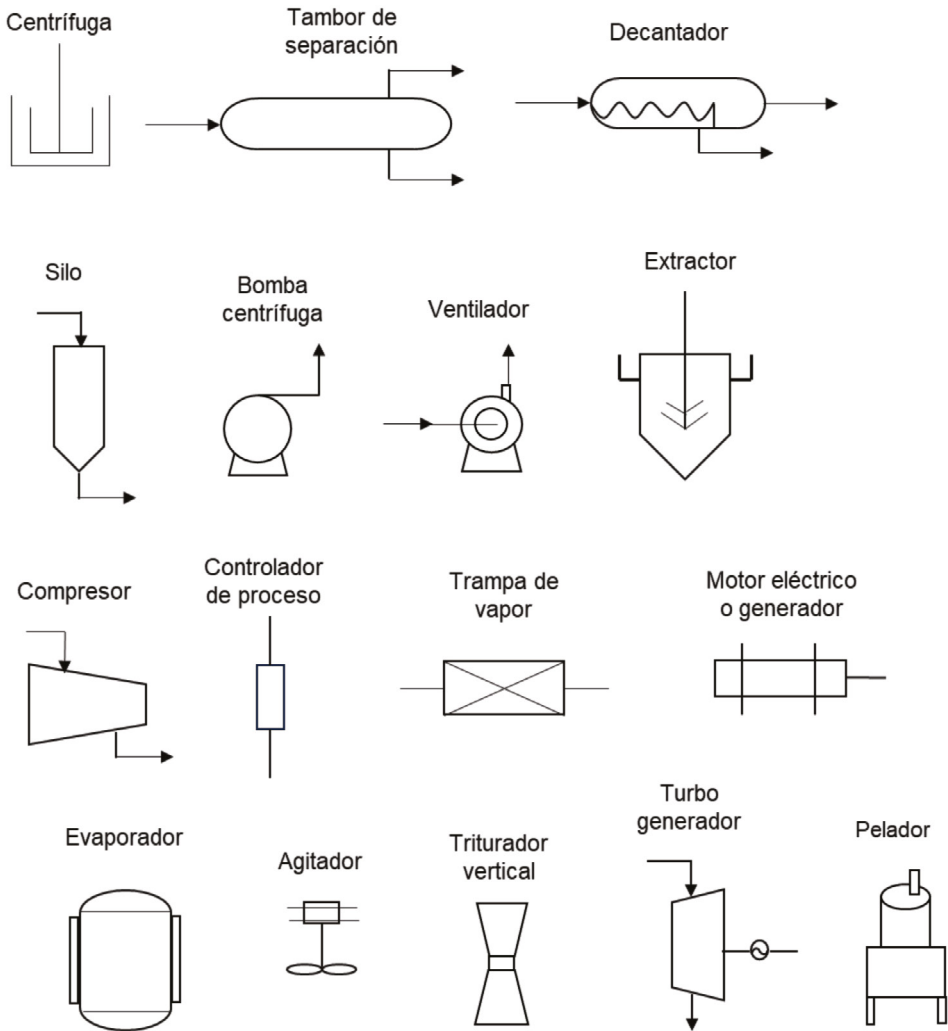
FILTROS

Filtro de aire



Filtro prensa





1.3. Aditivos e ingredientes

Según la Comisión del Codex Alimentarius, un aditivo alimenticio es cualquier sustancia que no se consume normalmente ni se utiliza como ingrediente frecuente en alimentos, la cual se puede adicionar en las fases de fabricación, elaboración, preparación, tratamiento, envasado, empaquetado, transporte o almacenamiento, siendo un elemento que afecta las características del alimento.

Las sustancias que se utilizan para potenciar las propiedades organolépticas se pueden dividir en dos categorías: ingredientes naturales y aditivos artificiales o sintéticos que, según la matriz alimentaria empleada, pueden ser: conservantes, antioxidantes, emulsificantes, potenciadores de sabor, acidulantes, edulcorantes, antiaglomerantes, antiespumantes, espesantes, emulgentes, colorantes, humectantes, saborizantes, entre otros.

Existe una amplia gama de pigmentadores naturales, como frutas, verduras y especias, ejemplo de ellos son: remolacha, zapallo, verduras, arándanos, uvas, etcétera. Entre los conservantes naturales se identifican la sal y el azúcar, cuyo fin es extraer líquido y absorber humedad de los alimentos, además del vinagre, que se ha empleado como conservante y para mejorar la calidad organoléptica. Hay plantas que ayudan a retener el sabor y el color de los alimentos, como el romero, el orégano, el eneldo, el perejil y la albahaca; en los modificadores de sabor y color se encuentran la cúrcuma, el azafrán, el achiote, la pimienta y el pimentón. Los aditivos artificiales o sintéticos son los que se obtienen como resultado de productos no naturales, como ejemplo de ellos se encuentran la mayoría de los conservantes, como ácido de sodio, sorbato de potasio y ascorbato de sodio.

Los números E

La Unión Europea ha asignado a los aditivos números de entre 3 y 4 cifras precedidos de la letra E, que significa Europa, cuyo objetivo es identificar el aditivo, conocer su función, cantidad permitida y denominación química (Sánchez Juan, 2013). El primer dígito indica la categoría del aditivo o el papel principal de cada aditivo, el segundo dígito hace referencia a la familia del aditivo y el resto de dígitos definen o identifican el aditivo.

Clasificación de los aditivos

El Comité de Codex sobre Aditivos Alimentarios y Contaminantes de los Alimentos (CCFAC) ha establecido el Sistema Internacional de Numeración de Aditivos Alimentarios (SIN) (Codex Alimentarios, 2021), que establece la clasificación numérica E (<https://url.unad.edu.co/qqSns>). E1-colorantes, E2-conservantes, E3-antioxidantes, E4-edulcorantes, emulgentes, estabilizantes, espesantes y gelificantes, E5-agentes antiaglomerantes, ácidos, bases y sales, E620 a E641-potenciadores de sabor, E901 a E904-agentes de recubrimiento, E950 a E967-edulcorantes.

El sistema internacional de numeración de los aditivos alimenticios define algunas clases funcionales:

Antiaglutinantes: sustancias que reducen la tendencia de las partículas de un alimento a adherirse unas a otras.

Antiespumantes: aditivos alimenticios que impiden o reducen la formación de espuma.

Antioxidantes: aditivos alimenticios que prolongan la vida en almacén de los alimentos, protegiéndolos del deterioro ocasionado por la oxidación.

Colorantes: sustancias que dan o restituyen el color a un alimento.

Edulcorantes: aditivos alimenticios (diferentes a los azúcares mono o disacáridos) que confieren a un alimento un sabor dulce.

Emulsionantes: aditivos alimenticios que forman o mantienen una emulsión uniforme de dos o más fases en un alimento.

Espesantes: aditivos alimenticios que acrecientan la viscosidad de un alimento.

Espumantes: aditivos alimenticios que posibilitan la formación o el mantenimiento de una dispersión uniforme de una fase gaseosa en un alimento líquido o gaseoso.

Estabilizadores: aditivos alimenticios que posibilitan el mantenimiento de una digestión uniforme de dos o más sustancias.

Gasificantes: aditivos alimenticios utilizados para introducir dióxido de carbono en un alimento.

Gelificantes: sustancias que dan textura a un alimento mediante la formación de un gel.

Humectantes: sustancias que impiden la desecación de los alimentos, contrarrestando el efecto de un escaso contenido de humedad en la atmósfera.

Leudantes: aditivos alimenticios o combinaciones de aditivos alimenticios que liberan gas y, de esa manera, aumentan el volumen de una masa o rebozo.

Secuestrantes: aditivos que controlan la disponibilidad de un catión.

1.4. Actividad del agua y curvas de adsorción y desorción

Actividad de agua (a_w)

Los microorganismos necesitan un medio adecuado (temperatura, pH y agua, entre otros) para crecer y multiplicarse, es por ello que la mayoría de los métodos de conservación, como la liofilización, deshidratación, congelación, evaporación, adición de azúcares y sales, entre otros, buscan reducir la cantidad de agua y alargar la vida útil del producto. Por lo tanto, es conveniente determinar de forma precisa la actividad de agua (a_w) de cada producto, para identificar el riesgo de incorporación en una matriz alimenticia y su vida útil.

La actividad de agua (a_w) y el contenido de agua de un alimento son conceptos relacionados pero diferentes en el campo de la ciencia de los alimentos; la actividad de agua (a_w) mide la disponibilidad de agua para crecimiento microbiano que se encuentra en un producto alimenticio, y se define como la presión de vapor de agua en un alimento dividido por la presión de vapor de agua pura a una misma temperatura (condiciones estándar) (Sicheng et al., 2023), mientras que el contenido de agua o humedad mide la cantidad de agua libre presente en el producto. La a_w tiene valores que van del 0 al 1 y se determinan dependiendo de la composición y contenido de agua libre en el alimento, entre más cercano a 1 sea la a_w , mayor es la cantidad de agua disponible en el alimento y propenso a la multiplicación de microorganismos.

$a_w = 0,98$: pueden crecer microorganismos patógenos y algunas levaduras. Ejemplo: carne, pescado, leche.

$a_w =$ entre 0,93 y 0,97: proliferan los microorganismos patógenos, cuyos alimentos susceptibles son las carnes en general, los embutidos fermentados, quesos de corta maduración y el pan.

$a_w =$ entre 0,85 y 0,92: proliferan bacterias como *Staphylococcus aureus*, que pueden conllevar a la intoxicación alimentaria y algunos hongos pueden crecer en este medio. Ejemplo: embutidos curados, leche condensada.

$a_w =$ entre 0,60 y 0,84: crecen las bacterias y algunos microorganismos osmófilos (microorganismos adaptados a altas presiones osmóticas como altas concentra-

ciones de azúcar) o halófilos (bacterias que pueden sobrevivir en medios con alta salinidad) que pueden aparecer en frutos secos, cereales o quesos.

$a_w < 0,60$: no hay crecimiento microbiano, pero pueden permanecer durante largo tiempo, sobre todo aquellos microorganismos que sobrevivieron durante el procesamiento del alimento. Ejemplo: miel, chocolate, dulces en general y galletas.

Existen diferentes técnicas para la medición de la a_w ; dependiendo de la técnica de medición, el resultado puede ser diferente, por tanto, es necesario establecer las curvas de isoterma de sorción de vapor de agua preferiblemente a la temperatura de almacenamiento, debido a que estas pueden cambiar según el tipo de alimento o producto y su afinidad con el agua.

Medición del contenido de humedad

El contenido de humedad influye en las propiedades físicas y químicas de la materia prima y para su medición se emplean diversos métodos, principalmente se utilizan estos tres: secado, midiendo la pérdida de peso por estufa, secado en termobalanza y la titulación de Karl Fischer.

Método de secado por estufa. Consiste en secar la muestra hasta peso constante; inicialmente se pesa la muestra, se registra el peso y se introduce en una estufa preferiblemente de aire recirculante a 105 °C durante 24 horas, luego se coloca en un desecador y se registra el peso final y por medio de diferencia de peso se determina la humedad presente en la muestra.

Método de secado en termobalanza. Es un método seguro y eficiente que permite evaporar la humedad de una muestra de forma continua y se puede llevar un registro de la pérdida de peso de la muestra hasta peso constante.

Método de Karl Fischer. Es un análisis químico fundamentado en la oxidación del dióxido de azufre mediante yodo en una solución metanólica, además, es un método más de valoración volumétrico que cuantitativo para determinar el contenido de agua en sólidos y líquidos. La muestra que se va a analizar es sumergida en un disolvente que no contenga agua, el disolvente más empleado es el metanol y luego con una bureta se añade el reactivo que contiene dióxido de azufre, yodo y una amida, el agua que contiene la muestra reacciona con el reactivo de Karl Fischer hasta que se consume en su totalidad, quedando el yodo libre en la disolución, la valoración se determina volumétricamente con un electrodo de platino. Existen dos direccio-

nes de titulación: titulación coulombimétrica, para muestras con bajo contenido de humedad es inferior al 1 %, que consiste en titular la muestra con el reactivo de Karl Fischer donde la reacción de oxidación electrolítica provoca la producción de yodo y titulación volumétrica, para muestras con un contenido de humedad moderado o alto, en la cual se agrega a la muestra un solvente libre de humedad y se titula con el reactivo de Karl Fischer.

Medición de la actividad del agua (a_w)

Para determinar la actividad de agua (a_w), se emplean diversos métodos, como métodos isopiésticos (a presión constante), higrómetro de punto de rocío, higrómetro eléctrico, higrómetro de condensación, psicrómetros (termómetros de bulbos húmedo y seco), método de intervalos, entre otros, siendo el higrómetro de punto de rocío el más empleado.

Medida de punto de rocío. Consiste en colocar la muestra en una cámara hermética la cual tiene un espejo que, a medida que pasa el aire sobre la superficie, la temperatura se reduce gradualmente, el espejo se enfría y comienza a condensarse el vapor de agua en la superficie del espejo, y la temperatura a la que el vapor de agua comienza a condensarse se conoce como la temperatura de punto de rocío. Dentro de la cámara, el aire puede enfriarse hasta el punto de saturación sin modificar el contenido de humedad, se dice que se alcanza el equilibrio cuando la humedad relativa y la actividad de agua de la muestra dentro de la cámara son iguales; por tanto, es necesario medir la temperatura a la que se produce la condensación y la temperatura de la superficie de la muestra. Es un instrumento empleado en la industria no solo para determinar la humedad relativa y la actividad de agua, sino para comprobar la crujencia de un producto alimenticio, como *snacks*, papas fritas, pan, galletas, leche en polvo, café liofilizado, frutas liofilizadas y algunas carnes.

Curvas de adsorción y desorción

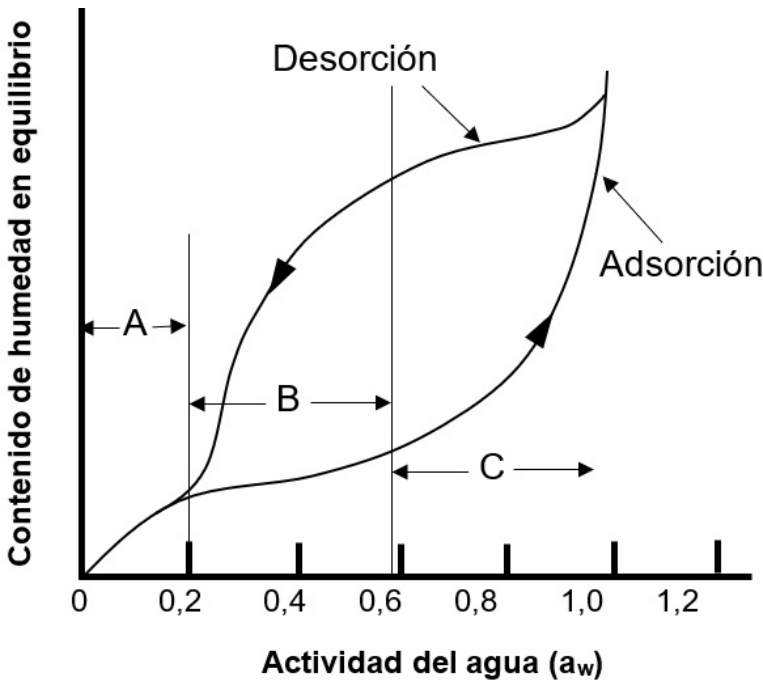
Para una misma humedad relativa hay dos isotermas: de adsorción y de sorción, debido a que el material o producto alimenticio puede presentar un contenido de humedad mayor o menor a la humedad de equilibrio para la condición ambiental presente, fenómeno que se conoce como histéresis.

La isoterma de adsorción de alimentos es una curva para conocer la actividad de agua del alimento a una temperatura determinada según su contenido de agua, es decir, indica la cantidad de agua retenida por un alimento con respecto a la hume-

dad relativa de la atmósfera que lo rodea. A su vez, las isothermas se dividen en tres regiones representadas con las letras A, B y C. En la región A, las moléculas de agua se encuentran ligadas al sólido en sitios específicos, en estos sitios se encuentran los grupos hidroxilo de los polisacáridos y aminos de las proteínas que se unen por medio de puentes de hidrógeno y fuerzas ion-dipolo, a esta zona se le denomina monocapa. En la región B, el agua se encuentra en multicapas. Y en la región C, el agua se encuentra libre. Por tanto, la relación entre la actividad de agua y el contenido de humedad a una temperatura dada es característica de cada producto y se llama isoterma de sorción.

El incremento en actividad de agua está correlacionado con un incremento en el contenido de humedad, pero no es una relación lineal. Las isothermas de sorción presentan diferentes formas, las cuales van a depender de la composición física y química del producto alimenticio; sin embargo, la mayoría de las isothermas de sorción en alimentos tienen una forma sigmoidea. En la figura 1.8 se muestra la representación de isothermas de adsorción y desorción con relación a la a_w y el contenido de humedad.

Figura 1.8. Isothermas de adsorción y desorción



Fuente: elaboración propia.

Modelos de isotermas

A partir de las isotermas de sorción se pueden determinar los contenidos de humedad críticos en los alimentos y predecir los cambios que se pueden presentar durante el almacenamiento. Para ello, se han desarrollado modelos matemáticos de dos o más parámetros para describir las isotermas de sorción de alimentos. En el área de los alimentos se emplean seis modelos matemáticos: modelo de Brunauer, Emmett y Teller (BET), GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer), Henderson, Caurie, Oswin, Peleg y Smith. Sin embargo, los más empleados son, el modelo de BET, GAB, Henderson y Caurie.

1. **Modelo de Brunauer, Emmett y Teller (BET).** Considera la relación existente entre la humedad y la actividad de agua a_w . Método que determina la cantidad de agua ligada en sitios polares específicos del adsorbente (Anderson, 1946). La limitación se encuentra en que las isotermas se ajustan dentro de un intervalo limitado de valores de a_w (de 0 a 0,55)

$$\frac{a_w}{M(1-a_w)} = \frac{1}{M_1 C} + \frac{C-1}{M_1 C} a_w \quad (1)$$

Donde:

a_w = actividad de agua

M = proporción de agua sobre el extracto seco

M_1 = contenido de agua (sobre extracto seco) de una capa monomolecular

C = constante, característica del material relacionada con el calor desprendido en el proceso de sorción

2. **Modelo de GAB.** Este modelo fue propuesto por Guggenheim, Anderson y de Boer, como una refinación de modelo de BET, donde la energía de interacción de las multicapas es similar a la energía de la segunda capa del adsorbente en el adsorbato, pero diferente a la fase líquida (Guggenheim, 1966). Es una ecuación de tres parámetros, que utiliza para ajustar los datos de sorción de un producto alimenticio, actividades de agua de 0,9.

$$W_e = \frac{W_0 \cdot C \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w) \cdot [1 + (C - 1) \cdot K \cdot a_w]} \quad (2)$$

Donde:

We = humedad de equilibrio, expresada en kg por cada 100 kg del sólido seco

Wo = humedad del producto correspondiente al punto de adsorción (punto de saturación)

C = constante de Guggenheim, característica relacionada con el calor de adsorción de la monocapa

K = factor de correlación relacionado con el calor de sorción de la multicapa

a_w = actividad de agua

3. Modelo de Henderson. (Guzman y Zapata, 2018).

$$w_{e=0,01} \cdot \left(\frac{-\log_{10}(1 - a_w)}{10^f} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

We = humedad de equilibrio

n y f = parámetros característicos del producto

4. Modelo de Caurie. Se considera un modelo que arroja buenos resultados para muchos alimentos, en el intervalo de a_w = 0 – 0,85.

$$W_e = \exp \cdot \left(a_w \ln(r) - \frac{1}{4,5 \cdot W_s} \right) \quad (4)$$

We = humedad de equilibrio

r = constante característica del material

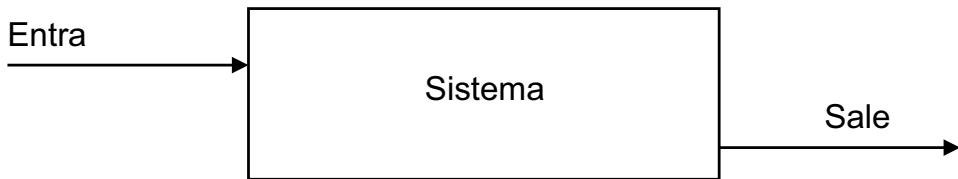
= contenido de humedad que proporciona la máxima estabilidad del alimento deshidratado durante el almacenamiento

1.5. Materia y energía

Se considera materia, todo aquello que está constituido por partículas subatómicas, es decir, más pequeñas que el átomo y ocupa un espacio, tiene masa (peso, volumen y dimensiones cuantificables), constituida por propiedades físicas y químicas, y puede absorber energía. La materia se puede encontrar en diferentes estados: sólido, líquido, gaseoso, plasma y coloidal. A su vez, la energía es la capacidad para realizar un trabajo, por tanto, el trabajo es un proceso donde se deforma un cuerpo, esta tiene una magnitud física, ya que se puede medir. La energía se puede presentar en diferentes formas: potencial, eléctrica, cinética, mecánica, radiante, térmica, nuclear y química.

La ley de la conservación de la materia explica que la materia no se crea ni se destruye, se transforma. Por tanto, en teoría, en un sistema ideal (figura 1.9), la cantidad total de materia prima que entra en un proceso debe ser igual a la cantidad total que sale. Sin embargo, esta condición difícilmente se da en la realidad; aunque los equipos se enchaquetan para mantener el frío o el calor, siempre hay pequeñas pérdidas de calor o se quedan en los equipos trazas de partículas de materias primas al pasar de una operación unitaria a otra, lo que hace que lo que entra no sea exactamente igual a lo que sale.

Figura 1.9. Sistema ideal que representa la ley de conservación de la materia



Fuente: elaboración propia.

Albert Einstein (1879-1955) mostró que la materia se transforma en energía y la energía puede transformarse en materia. A lo que se le conoce como “teoría de la relatividad” y se expresa con la siguiente ecuación: $E = m \cdot c^2$, donde a un cuerpo en reposo (E) se le puede medir la masa (m) multiplicada por la velocidad de la luz ($c =$ aproximadamente 3×10^8 m/s).

Cuando se habla de procesos, es esencial conocer los fundamentos de los balances de materia y energía, ya que con ellos se determinan los flujos entre operaciones unitarias y procesos.

Pasos generales para realizar cálculos de balance de materia y energía:

1. Leer despacio el enunciado y entenderlo.
2. Graficar el proceso mediante un diagrama de flujo, con las corrientes de entrada, salida e intermedias.
3. Registrar en el diagrama de flujo toda la información entregada en el ejercicio o la información medida, derivada de un proceso de investigación.
4. Convertir todas las unidades de medida en un mismo sistema de unidades.
5. Seleccionar una base de cálculo.
6. Verificar que en cada sistema el número de grados de libertad sea cero.
7. Planear y dar respuesta a las ecuaciones independientes generadas en el balance.