

CAPÍTULO 5

MÉTODOS PARA EVALUAR LA EFICIENCIA PRODUCTIVA

5.1 INTRODUCCIÓN

La evaluación de la eficiencia productiva es un proceso que se realiza no solamente en los diagnósticos de producción más limpia, sino en la gestión empresarial en general, para verificar el uso de recursos, para determinar costos del proceso productivo, para proyectar la producción, para implementar nuevos proyectos, para realizar nuevas inversiones, etc.

Los métodos para la evaluación de la eficiencia productiva más comúnmente usados, pero no los únicos, se basan en:

- Balances de masa y energía.
- Consumos, producción y descargas específicos.
- Correlaciones entre el consumo de insumos y la producción.
- Análisis de la cinética, de la concentración y de otras propiedades de fluidos y de procesos mecánicos.
- Análisis de la cinética química, de la entalpía y de la entropía de reacción.

En esta guía se desarrollan los primeros tres métodos.

5.2 LA CULTURA DE LA MEDICIÓN

Para alcanzar un mejor desempeño, todas las actividades productivas requieren de mediciones que tengan un mayor o menor grado de exactitud. En las actividades industriales y económicas, la información y el grado de exactitud de la misma pueden estar relacionados, en muchos casos, con su propia supervivencia. Los procesos industriales están caracterizados por el uso de cantidades importantes de insumos (materias primas, agua, energía, etc.) los mismos que, sometidos a una transformación, dan lugar a productos, subproductos, residuos y desechos.

La cantidad de pérdidas, residuos, mermas, fugas, etc., (tanto de insumos como de productos) no contabilizada adecuadamente puede significar pérdidas económicas importantes para las empresas, o costos elevados en su tratamiento o disposición.

Para prevenir o reducir la generación de desechos, se debe examinar cada operación en el contexto global del proceso, a fin de identificar su origen y cantidad, los problemas operativos inherentes y las posibles soluciones y mejoras. El enfoque del examen de cada operación puede orientarse para detectar:

- uso ineficiente o pérdidas de agua, energía y otros insumos;
- residuos que pueden ser utilizados;
- residuos que ocasionan problemas de procesamiento;
- residuos considerados peligrosos o contaminantes;
- desechos cuyos costos de disposición final son elevados.

El examen de las operaciones requiere de balances de masa y energía que se obtienen después de observar, medir, registrar datos y realizar el análisis de muestras de insumos, por un lado, y de productos, subproductos, residuos y desechos, por otro; todo esto, en forma metódica y exhaustiva.

De este modo, una actividad industrial que implica un proceso de producción, requiere de mediciones que sean lo más exactas posibles, en cada una de las operaciones unitarias que la conforman para ser eficiente y rentable. Las cantidades de materiales que ingresan y su calidad

deben verificarse, porque ellas representan costos para la empresa. De igual manera, se debe evaluar la cantidad de los productos, subproductos, residuos y desechos que salen del proceso, porque permite obtener información valiosa, como: mercados de venta, políticas de precios y márgenes de utilidad. Adicionalmente, debe verificarse la calidad, sobretodo de los productos, para optimizar las condiciones técnicas de todo el proceso.

Medir es determinar una cantidad comparándola con su respectiva unidad. La medición es importante para determinar el rendimiento de nuestras operaciones y procesos, y es clave para efectuar un buen control y posteriormente para evaluar el desempeño de nuestras actividades. De acuerdo a las experiencias del CPTS, una gran parte de las empresas no mide, o no mide bien, por lo que es muy difícil establecer indicadores reales que permitan evaluar el comportamiento y las tendencias de la empresa.

Las medidas deben ser exactas, precisas, reproducibles, periódicas, sencillas, claras, relacionadas con los ahorros económicos y comparables en el tiempo. Medir no siempre es una tarea fácil, implica contar con infraestructura e instrumentos de apoyo para controlar la evolución de las reacciones en cada operación, la calidad de materias primas, productos y subproductos, lo que significa, a veces, la necesidad de contar con un laboratorio de control para medir los principales parámetros del proceso, como temperatura, pH, viscosidad, densidad, etc.

ACTIVIDAD INDUSTRIAL



**¡Está saliendo menos producto!
¿Habremos introducido la suficiente materia prima?**

“Lo que no se mide no se puede evaluar y lo que no se puede evaluar no se puede mejorar”

La cultura de la medición no implica solamente la actividad de medir, sino también las de recolección y de análisis sistemático de muestras (gaseosas, líquidas, sólidas) para evaluar cualitativa y cuantitativamente un proceso, una operación o la contaminación generada, en función del tiempo; esto se conoce como monitoreo.

Algunas de las razones para implementar un programa de monitoreo son:

- Mejorar el control del proceso y realizar acciones que permitan el uso más eficiente de los recursos.
- Conocer los contenidos de las descargas para evaluar el cumplimiento de las normas ambientales.
- Proporcionar los datos mensuales y anuales para elaborar registros de indicadores que permitan una evaluación permanente.
- Proporcionar las bases para la elaboración de planes de adecuación ambiental.
- Evitar descargas accidentales, fugas y rebalses.
- Determinar la carga contaminante del efluente.
- Controlar el proceso de tratamiento.
- Controlar la descarga final hacia la planta de tratamiento o directamente hacia el cuerpo receptor.

5.2.1 Consideraciones para un monitoreo exitoso

Un monitoreo exitoso depende de muchos factores como:

- Personal bien entrenado. Esto es muy importante sobretodo si se trata de manejar equipos de medición complejos o de interpretar resultados complicados. Las mediciones no deben ser hechas, necesariamente, por la empresa, se puede contratar servicios de terceros.
- Herramientas adecuadas y bien mantenidas. La calibración de los equipos y un mantenimiento preventivo ayudan a evitar errores en la medición.
- Condiciones apropiadas (ambientales, de infraestructura, tiempo). La toma de las muestras y las mediciones deben aplicarse siguiendo normas o estándares (nacionales o internacionales) de modo que sean reproducibles y se minimicen los errores.
- Representatividad de la muestra. La confiabilidad de un resultado depende de la importancia que tenga la muestra en el universo o conjunto de donde se la extrae. Las variaciones que pueden presentarse en las muestras, como sus concentraciones, o las condiciones en las que se las toma, deben ser compensadas tomando, por ejemplo, muestras compuestas.
- Hojas de registro. Durante el proceso de medición, los datos deben registrarse en forma clara, identificando fecha, hora de muestreo, hora de medición, responsable, características de la muestra, condiciones de operación productiva en el momento de la medición o toma de muestra y otros datos de interés.
- Cadena de custodia de las muestras. Es un conjunto de hojas de registros que aseguran el rastreo de la muestra y, por tanto, que la muestra ha sido tomada, manipulada, transportada, preservada, analizada, almacenada, etc., en condiciones exigidas por las normas. Esto evitará cualquier modificación en la muestra y los resultados de los análisis serán confiables. La cadena de custodia es de especial importancia para las muestras que van a ser analizadas en laboratorios externos a la planta.

Comúnmente, los pasos que deben seguirse en un monitoreo son:

5.2.1.1 Toma de muestras

Las muestras deben ser tomadas siguiendo criterios establecidos en procedimientos normalizados de operación, sean estos nacionales o internacionales. Uno de los principales errores que se comete en la toma de muestras, al no respetar dichos criterios, radica en la representatividad de la muestra.

Es recomendable realizar un muestreo representativo con muestras compuestas

Uno de los criterios que debe tomarse en cuenta para que una muestra sea representativa, es que debe cubrir un periodo definido, con el fin de compensar las posibles variaciones de las concentraciones de contaminantes y del caudal. La representatividad de la muestra dependerá del tipo de muestra obtenida. Es así que entre los principales tipos de muestra se encuentran:

1.	Muestra simple o parcial	Muestra tomada en un momento determinado.
2.	Muestra compuesta por tiempo	Muestra obtenida mezclando muestras simples o parciales, de volumen idéntico, tomadas a intervalos regulares (por ejemplo, un litro cada hora durante el periodo de monitoreo).

3.	Muestra compuesta proporcional al caudal	Muestra obtenida, durante el periodo de monitoreo, mezclando muestras simples o parciales tomadas a intervalos de tiempo regulares y cuyos volúmenes son proporcionales al caudal existente el momento de la toma de muestra. También, es la muestra obtenida, durante el periodo de monitoreo, mezclando muestras simples o parciales tomadas con una frecuencia proporcional al caudal, es decir, con intervalos de tiempo menores cuando los caudales crecen, y con intervalos mayores cuando el caudal decrece.
----	------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Un ejemplo de la necesidad de tomar una “muestra compuesta por tiempo”, está representado en la Figura 5.1, en la que se puede apreciar que las cargas o flujos máxicos tienen variaciones significativas durante un periodo de varias horas. Si se hace un muestreo momentáneo después de 4 horas, el resultado, 30 kg/h, sería mucho más alto que la carga representativa. En cambio, si se toma una muestra momentánea después de 8 horas la carga correspondiente de 10 kg/h sería mucho más baja que la carga representativa. En cambio, si se hace una muestra compuesta, con una muestra parcial cada hora, el resultado sería de aproximadamente 19 kg/h que es un promedio representativo para el periodo de 8 horas de medición.

Después de realizar la toma de la muestra, ésta debe ser adecuadamente manipulada, transportada, preservada, codificada, almacenada (cadena de custodia). Dependiendo del tipo de muestra que se trate, existen procedimientos normalizados para su gestión¹.

Además, el monitoreo debe respetar un proceso para asegurar la calidad del muestreo y el análisis. Este proceso se basa en la elaboración de un plan, su implementación y revisión.

Dentro del plan de muestreo, se requiere una definición de los objetivos del muestreo, es decir qué, porqué, cuándo, cómo, dónde, con qué precisión y exactitud¹ se deberá muestrear. Otro aspecto importante son los costos económicos implicados en el muestreo. Por ejemplo, puede diseñarse un plan en el que se pretenda muestrear las descargas siguiendo el curso de un río que no tiene caminos que faciliten su acceso y, por ello, sea necesario recorrer todo o gran parte del curso del río a pie. Por otro lado, una vez tomada la muestra, se pretenda conocer la concentración de parámetros que nada tienen que ver con las descargas de la industria, por ejemplo realizar un análisis de cromo en las descargas provenientes de una lechería.

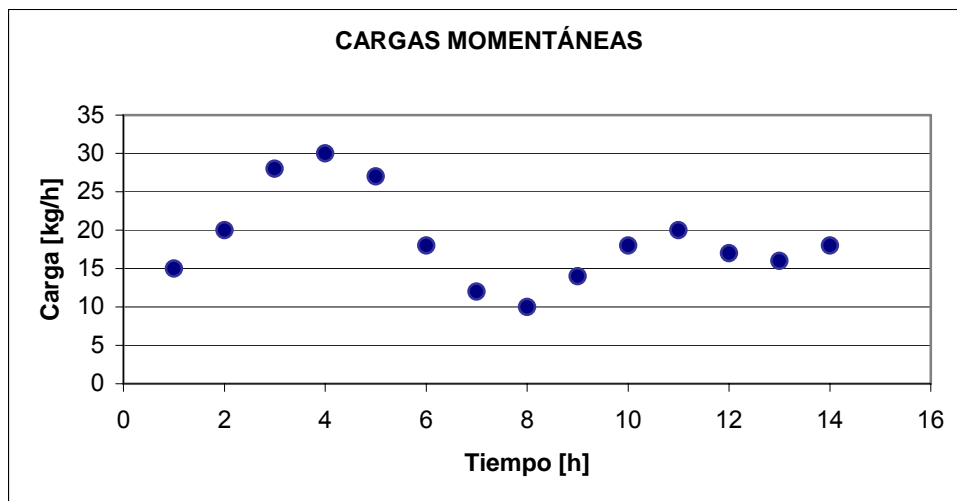


Figura 5.1 Ejemplo de variación de cargas en función del tiempo
Elaboración: CPTS

La implementación del plan consiste en la colección/recolección de muestras en la industria y/o el medio ambiente que la rodea, su análisis y el reporte de resultados. Es necesario señalar que toda

¹ Para las definiciones de “precisión” y “exactitud”, consultar el Capítulo 7 Glosario de términos.

la implementación debe ser realizada en base a procedimientos normalizados de operación (PNO) que aseguren su calidad. Uno de los principales PNO es la cadena de custodia, que consiste en un seguimiento minucioso de la muestra, que comienza con la salida, del almacén, de los frascos para tomar la muestra, de las personas que los manipulan, los transportan, toman la muestra, aprueban la muestra, la transportan al laboratorio, las analizan, transcriben los resultados, los aprueban, los emiten y, finalmente, los entregan al o a los interesados.

Finalmente, la revisión implica la verificación de los datos, su validación y su evaluación por parte del o de los interesados, con el fin de verificar la precisión y exactitud de los resultados de los análisis (ver más adelante: control de resultados).

5.2.1.2 Caudal para determinar la carga por hora y la carga específica

Existen varias razones por las que se debe medir el caudal (gaseoso o líquido), entre ellas:

- Para optimizar el consumo de agua, a través de la determinación de los consumos específicos por operación unitaria.
- Para calcular la carga que se envía hacia un cuerpo receptor, planta de tratamiento o a la atmósfera. Para esto se necesita conocer no solo el caudal sino también la concentración de los contaminantes. La carga (M), se obtiene multiplicando la concentración (C) por el caudal (Q).

$$M[\text{kg/h}] = C[\text{kg/L}] \times Q[\text{L/h}] \quad (6)$$

- Para calcular la carga específica que sale de una planta, además de conocer el caudal y la concentración, se necesita conocer la producción durante el periodo de monitoreo. De esta manera, se podrá comparar el comportamiento de una planta con el de otras similares o evaluar su propio rendimiento. La carga específica (M_e), es la carga calculada según la ecuación (6) dividida por la cantidad de producción, en kg, durante el mismo periodo de tiempo.

$$M_e \left[\frac{\text{kg contaminante}}{\text{kg producto}} \right] = \frac{M[\text{kg contaminante/h}]}{\text{Producción}[\text{kg producto/h}]} \quad (7)$$

Existen numerosos instrumentos y técnicas para la medición del consumo, cuya selección depende del objetivo que se persigue con la medición; la tecnología del medidor; de las características del proceso y del fluido que se quiere medir. Por ejemplo, un caudalímetro mide el volumen de agua que pasa por el conducto por unidad de tiempo (m^3/h , L/min , etc.); un flujómetro mide la velocidad promedio que adquiere el agua al pasar por una sección determinada (m/s); mientras que un totalizador registra el volumen total de agua consumido (m^3 o L), en forma acumulativa.

Casi todos los medidores que a continuación se presentan son de tipo volumétrico, aunque también existen medidores de tipo másico. Dada la amplia variedad de los mismos solo se hace referencia a los más comunes.

Cuadro 5.1 Instrumentos de medición de flujo, caudal y/o consumo de agua.

Canales a presión o tuberías cerradas		
Técnica	Instrumento Primario ó Hidráulico	Tipo de fluido ⁽¹⁾
Presión diferencial - instrumentos de gasto y área fijos	Tubos tipo Venturi; toberas; placas de orificio, codos	Gases y líquidos
Flujo y área variables - con presión diferencial fija	Rotámetros	Gases y líquidos
Velocidad puntual	Tubo Pitot, tubo de Prandtl, Annubar	Gases y líquidos
Medidores de corriente y velocidad	Medidor de hélice o propela; medidor de turbina (flujómetro, caudalímetro); medidor	Gases y líquidos

	de molinete	
Medidores de desplazamiento positivo ⁽²⁾	Pistón oscilante; paletas deslizantes; engranajes (rueda oval y helicoidales)	Gases y líquidos
Dispositivos electromagnéticos	Medidor a tubería; medidor de sonda	Líquidos
Técnicas sónicas	Medidor ultrasónico Doppler; medidor ultrasónico por impulsos	Gases y líquidos
Técnicas a base de trazadores y dilución	Dilución de sal; tintes fluorescentes	Gases y líquidos
Medidores de fuerza dinámica (medición del caudal másico)	Transductor	Gases y líquidos
Canales abiertos		
Técnica	Instrumento Primario ó Hidráulico	Tipo de fluido⁽¹⁾
Instrumentos de carga diferencial	Vertederos: triangular; rectangular; Cippoletti	Líquidos
	Canaletas tipo: Parshall, Palmer, Bowls, Leopold Lagco	Líquidos
	Orificios: redondo; rectangulares; ovalados	Líquidos
	Compuertas: planas; inclinadas; curvas	Líquidos
	Toberas	Líquidos
Técnicas de medición de velocidad	Tubo Pitot; medidores de corriente (molinetes y rotámetros)	Líquidos
Técnicas a base de trazadores	Dilución de sal; tintes fluorescentes	Líquidos
Técnicas tiempo y volumen:	Balde y cronometro; cambio de nivel en tanque ⁽³⁾	Líquidos
Técnica de pendiente y radio hidráulico	Conducto o canal donde circula el agua	Líquidos

Fuente: Adaptación de "Azad (1976)".

- (1) Esta información es sólo referencial, ya que cada instrumento de medición tiene sus propias especificaciones.
- (2) Los instrumentos primarios aquí mencionados se usan para el caso de fluidos líquidos. Para gases se usa el mismo principio pero los instrumentos tienen ciertas diferencias.
- (3) En esta técnica, no existe un medidor primario simplemente se calcula el caudal en función del tiempo transcurrido en que un volumen de agua se reduce o incrementa.

5.2.1.3 Análisis

Generalmente, los análisis se realizan en un laboratorio externo a la planta. Es importante que el laboratorio sea reconocido y, de ser posible, esté certificado. Los métodos de análisis utilizados deben ser normalizados según estándares internacionales reconocidos^{xii}. El error más común en resultados de monitoreo se debe, justamente, a análisis realizados incorrectamente. Es por ello que un control de los resultados es de suma importancia.

5.2.1.4 Registro

El registro de datos constituye una de las partes más importantes del monitoreo. Los datos deben registrarse en protocolos o bitácoras elaborados según los requerimientos de la empresa. Estos registros permitirán contar con datos históricos que, después de su procesamiento, reflejarán el comportamiento de la empresa, sus tendencias y constituyen una fuente para la toma de decisiones. La periodicidad del registro de datos dependerá de las características de lo que se esté midiendo y de los objetivos que se persigue con esta información (en la Sección 5.4 se da ejemplos de hojas de registro).

Los datos se pueden almacenar en diferentes formatos: en papel o en medios electrónicos. El modo más simple, pero no necesariamente más adecuado, es mantener los registros en papel. Si se opta por registrar datos por medios electrónicos se dispone de instrumentación sofisticada como los "data loggers" que son pequeñas computadoras de campo que registran inmediatamente las lecturas tomadas in situ y que después descargan la información a programas de computadora para su análisis. Aún si se registran los datos en papel, éstos deberían descargarse en programas de computadora, lo que facilita el análisis de los resultados.

5.2.1.5 Control de los resultados

Como se mencionó, el error más común en programas de monitoreo es consecuencia de análisis mal hechos, es decir con resultados analíticos erróneos. Por esto, es muy importante controlar si los resultados son coherentes y volver a realizar el muestreo si existe duda sobre los resultados. A esto se suma que las condiciones del muestreo deben ser similares, para obtener una muestra con las mismas características que aquella cuyos resultados fueran observados.

Una forma de controlar si los resultados del análisis son confiables, es entregar dos muestras idénticas al laboratorio, pero como si fueran diferentes. Si los resultados analíticos de las dos muestras no son similares se debe dudar del análisis y rehacer el muestreo. Otra forma de controlar los resultados es utilizar un balance de materia para estimar las concentraciones en las diferentes muestras. Si los resultados se desvían mucho del estimado se debe dudar del análisis y rehacer el muestreo.

5.2.1.6 Análisis de los resultados

Una vez terminado el monitoreo, es importante preparar un informe que contenga los resultados y el análisis correspondiente, para distribuirlo de acuerdo a lo establecido en las normas de la empresa o a lo que decida la instancia responsable. Un resultado de monitoreo que no es procesado y conocido por las instancias responsables no tiene ningún valor.

5.3 ELABORACIÓN DE UN DIAGRAMA DE FLUJO

Un proceso productivo está constituido por una o varias operaciones unitarias. Una operación unitaria puede realizarse en varias etapas. A fin de identificar claramente todas las operaciones unitarias y sus interrelaciones se debe dibujar un diagrama de flujo que refleje fielmente lo que ocurre en el proceso.

Para sistemas de producción complejos, donde existan varios procesos independientes, se puede preparar un diagrama de flujo general, mostrando todos los procesos, cada uno representado por un bloque y, en hojas separadas, además, preparar diagramas de flujo para cada proceso individual, indicando en detalle sus operaciones unitarias. Si éstas fueran complejas, se puede, a su vez, preparar diagramas de flujo, por separado, con el detalle que sea requerido.

El diagrama de flujo debe, además, incluir operaciones complementarias o de soporte, tales como limpieza, almacenamiento, preparación de tanques y otras (si es necesario, éstas pueden presentarse por separado).

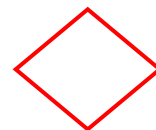
Entre los símbolos más frecuentemente usados para elaborar un diagrama de flujo están:



Inicio/Fin



Operación unitaria



Decisión



Documento



Operación manual



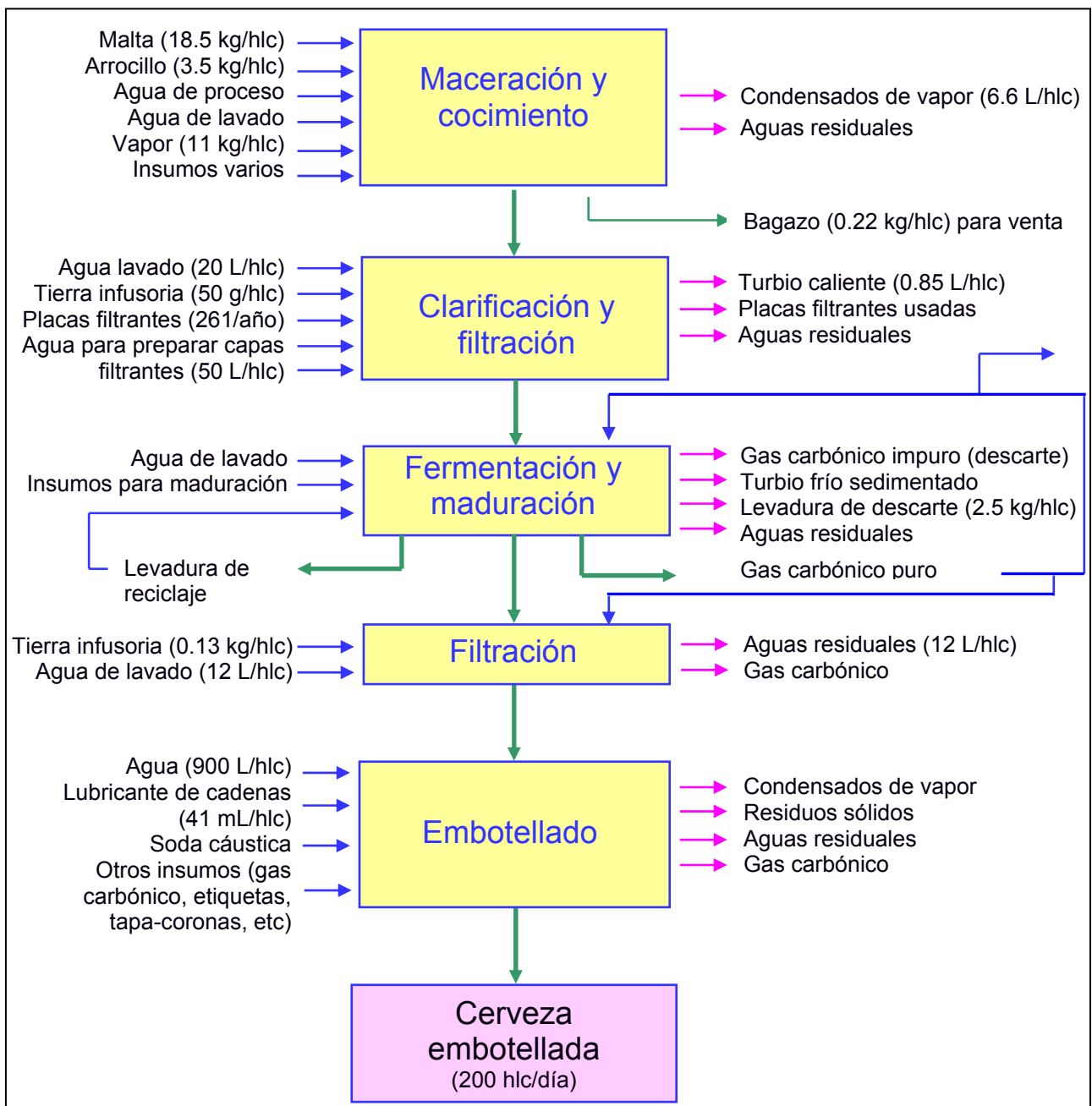
Conector fuera de la página



Conector

Uno de los símbolos más usados es el que corresponde a “operación unitaria”. Cada operación unitaria es representada en secuencia y se la acompaña de sus respectivas entradas y salidas. Las entradas corresponden a las materias primas o, en general, a los insumos utilizados (incluyendo la energía) cuya combinación permite su transformación (sea esta física o química) en producto. Las salidas son de dos tipos: residuos y desechos. Los residuos pueden ingresar en algún proceso o ser un subproducto con calidad suficiente para su comercialización en un mercado específico. Cada entrada y salida debe ser cuantificada, ya sea en cantidad y/o concentración de insumo, residuo o desecho.

Opcionalmente, puede utilizarse colores para resaltar las entradas / salidas. Asimismo, dependiendo de los objetivos y de la posibilidad de medir, puede ser muy útil describir el producto intermedio, la cantidad, la producción específica u otros. En la Figura 5.2 se muestra, como ejemplo simplificado, el diagrama de flujo de una cervecería típica.



* hlc = hectolitro de cerveza

Figura 5.2 Diagrama de flujo de una cervecería
Elaboración: CPTS

El diagrama de flujo es una de las mejores herramientas para identificar los flujos de materia/energía en las operaciones unitarias

5.4 BALANCE DE MASA

El balance de masa se basa en la conservación de la materia. Como se sabe:

“la materia no se crea ni desaparece, sólo se transforma”

De acuerdo a ello, en un sistema cualquiera, las entradas son iguales a las salidas.

El diagrama de flujo es el punto de partida para efectuar un balance de masa. Una vez que se lo ha elaborado, debe cuantificarse, lo más exactamente posible, las entradas y las salidas, así como, de ser posible, los costos asociados a éstas. Dependiendo de la complejidad de los procesos y de la información disponible, es muy probable que se requiera investigar ciertos procesos en profundidad.

A continuación, se explica la forma de cuantificar los flujos de entrada y salida, y la forma en que se los debe igualar para elaborar un correcto balance de masaⁱⁱ

5.4.1 Bases para identificar y cuantificar entradas y salidas

Todos los insumos que entran a un proceso u operación, salen como productos y como residuos/desechos. En este sentido, un balance de masa se define como la verificación de la igualdad cuantitativa de masas que debe existir entre los insumos de entrada y los productos y residuos de salida.

El balance de masa es aplicable tanto a un proceso, como a cada una de las operaciones unitarias que componen un proceso. Cuando no es posible identificar todas las salidas, se debe incluir un término que corresponda a la diferencia de masas, como “no identificada”.

En un balance de masa, la suma de todas las masas que entran en un proceso u operación, debe ser igual a la suma de todas las masas que salen de dicho proceso u operación, es decir, la suma de masas de los productos, residuos y de todos los materiales de salida no identificados. Si bien se puede asumir que la pérdida de masa está dada por la diferencia de masas entre las entradas y las salidas, en algunos sistemas productivos es necesario tomar en cuenta la masa que pudiera quedar residente en la operación, a fin de estimar correctamente la cantidad de la pérdida de masa no identificada.

Es decir:

Si:	$M_E + M_{RI} = M_{RI} + M_{i1} + M_{i2} + \dots + M_{iz}$		
y	$M_S + M_{RF} = M_{RF} + M_P + M_R + M_N$		
Balance de Masa:	$M_E + M_{RI} = M_S + M_{RF}$		
Donde:	M = Masa	M_{i1} = Insumo 1	M_R = Residuo
	M_E = Masa de Entrada	M_{i2} = Insumo 2	M_P = Producto
	M_S = Masa de Salida	M_N = No identificado
	M_{RI} = Masa residente inicial	M_{iz} = Insumo z	M_{RF} = Masa residente final

Los materiales de salida no identificados, generalmente, se atribuyen a pérdidas de insumos y productos por derrames, fugas y otras causas similares, cuyo origen puede ser detectado, pero sus masas no pueden ser cuantificadas.

Si bien el balance de masa incluye al agua, es conveniente realizar un balance específico sólo para agua, a fin de mostrar detalles que normalmente no deben incluirse en un balance global. Por su

parte, el balance de energía, no se incluye en el balance de masa, por lo que se lo realiza en forma separada.

Para hacer el balance de masa se requiere de toda la información sobre las entradas y salidas, incluyendo parámetros de operación, así como de información existente a nivel de la administración. En la Figura 5.3, se representa las entradas y salidas globales en una operación unitaria; mientras que en la Figura 5.4, se representa un detalle de las entradas y salidas, cuyas masas deben cuantificarse para hacer un balance.

Una de las principales razones para contabilizar la masa de los residuos, es el aspecto económico, debido a que las pérdidas significan costos. El balance de masa ayuda a la cuantificación de los residuos, y es el primer paso para su minimización. Los pasos siguientes son la identificación de los problemas asociados a los residuos, las oportunidades de mejora, el establecimiento de los objetivos y la elaboración de los planes.

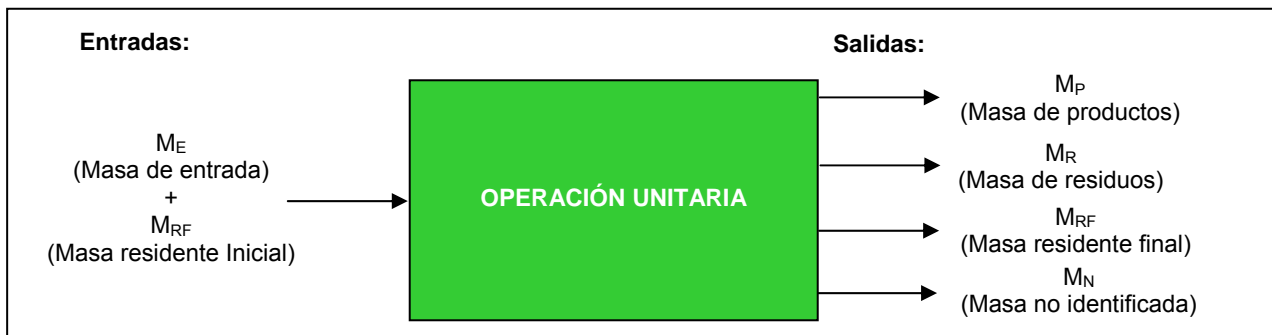


Figura 5.3 Entradas y salidas en una operación unitaria
Elaboración: CPTS

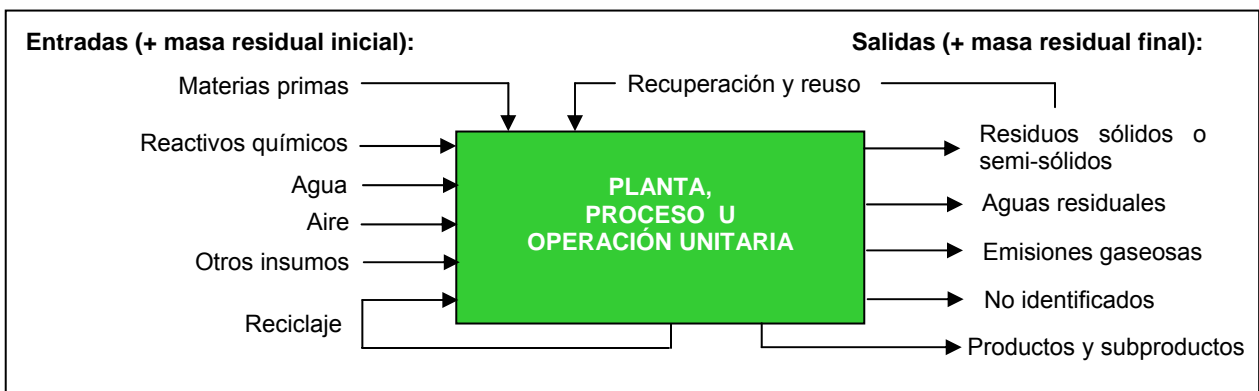


Figura 5.4 Detalle de los componentes típicos de un balance de masa
Elaboración: CPTS

5.4.2 Cuantificación de las entradas

Entre los insumos que ingresan a un proceso u operación unitaria, además de materias primas, se puede incluir materiales reciclados, productos químicos, agua, aire y otros, que deben ser cuantificados. Para evaluar el consumo de cada los insumos debe examinarse todos los registros existentes. Por ejemplo, para materias primas, debe revisarse los inventarios que deben reflejar los movimientos de ingresos (compras) y de las salidas de almacenes. Contar con un registro de

almacenes es muy útil, pues las compras de material y su correspondiente uso deben estar registrados. Un ejemplo se ilustra en el Cuadro 5.2.

Cuadro 5.2 Registro de almacén por insumo

Año: 2005		Insumo: <i>Sal común</i>		Unidad (kg, litro, tonelada, libra, N° de piezas, otro): <i>kg</i>			
Día	Compras	Salida de almacén para producción	Operación de destino	Saldo en almacén (saldo nuevo = saldo anterior + compras - egresos)	Pérdidas (saldo registrado - inventario del almacén)	Observaciones	Firma(s)
<i>01-ene</i>				<i>200</i>			<i>KP</i>
<i>05-feb</i>	<i>1,000</i>			<i>1200</i>			<i>KP</i>
<i>06-abr</i>		<i>200</i>	<i>Salado</i>	<i>1000</i>			
<i>07-jun</i>		<i>300</i>	<i>Piquelado</i>	<i>700</i>			
<i>31-dic</i>	<i>10,000</i>	<i>8,000</i>	<i>Salado y piquelado</i>	<i>2000</i>	<i>100</i>		<i>A.O.L</i>
<i>Total del año 31-dic</i>	<i>11,000</i>	<i>8,500</i>	<i>Saldo corregido</i>	<i>2,600</i>	<i>100</i>	<i>Se realizó un inventario físico a fin de año</i>	<i>A.O.L</i>

Elaboración: CPTS

La determinación cuantitativa de las entradas netas de insumos al proceso o a las operaciones unitarias, requiere del control de las pérdidas previas en almacenamiento, por transferencia y manipuleo (incluye pérdidas por evaporación, fugas, goteos de tanques, etc.), además puede tener como base un registro global de compras de insumos y pérdidas, como las que se ilustran en el Cuadro 5.2, y que pueden computarse, por ejemplo, en un protocolo como el que se ilustra en el Cuadro 5.3.

Cuadro 5.3 Cantidad de insumos de entrada por un periodo determinado (hora, día, semana, mes, año)

Operación Unitaria	Materia Prima 1 [kg o t/periodo]	Materia Prima 2 [kg o t/periodo]	Material reciclado [kg o t/periodo]	Agua [m ³ /periodo]	Energía eléctrica [kWh/periodo]	Combustibles [m ³ N* de gas o litros de diesel etc./periodo]
Operación Unitaria 1							
Operación Unitaria 2							
.....							
Pérdidas en almacén y otras no identificadas							
Total:							

Elaboración: CPTS

* m³N: metros cúbicos bajo condiciones normales

Una vez que se tenga un control de las entradas netas de los insumos al proceso y a cada operación unitaria, se debe determinar el consumo específico de cada insumo; es decir, es la cantidad total de un insumo utilizado por unidad de producto producido. Es importante que se utilice una misma unidad de referencia para todos los insumos. Si no se dispone de información sobre los consumos específicos, se debe adoptar medidas para poder determinarla. Las mediciones deben hacerse durante un intervalo de tiempo apropiado, para que las cifras sean

confiables y puedan extrapolarse en el tiempo, con el fin de computar valores mensuales o anuales.

En varias operaciones unitarias, el agua constituye tanto materia prima como un medio de enfriamiento, lavado de gases, lavado en general, enjuagues de producto, limpieza a vapor y otros. Adicionalmente, el agua se emplea para consumo doméstico. Los consumos específicos de todos estos usos deben también cuantificarse como parte de las entradas.

Recomendación: Se debe tener cuidado en la evaluación del agua, ya que el contenido de humedad en los productos en sí o en los materiales empleados para su fabricación puede variar a lo largo del proceso. Por esta razón, es mejor utilizar, en el balance, mediciones en base seca, es decir sin humedad.

En algunas operaciones unitarias se puede reciclar residuos provenientes de las mismas u otras operaciones unitarias. Los consumos específicos de estos residuos reciclados también deben computarse como parte de las entradas. Respecto al consumo de energía, se debe hacer un balance de energía específico para todo el proceso y para cada operación unitaria, tal como se describe en la Sección 5.5 del presente capítulo.

Los datos sobre los consumos específicos de los insumos en las entradas, deben mostrarse en los diagramas de flujo del proceso y de cada operación unitaria, a partir de los datos registrados (se puede usar un protocolo como el que se ilustra en el Cuadro 5.3, pero con consumos específicos).

A continuación se presenta un ejemplo de cómo puede efectuarse el registro del consumo de un insumo.

Como se mencionó, el agua es un insumo que se utiliza como materia prima y para diversos fines. El uso del agua en el lavado, enjuague, limpieza, consumo doméstico y otros, normalmente representa una buena oportunidad para optimizar el consumo específico, mediante prácticas y medidas sencillas que, en la mayoría de los casos, conllevan ahorros económicos significativos.

El consumo de agua, sea ésta de red, de pozo o de otra fuente, debe ser registrado mediante medidores. Los medidores son, definitivamente, una buena inversión, ya que permiten el control del consumo de agua y, de esta manera, facilitan la identificación de oportunidades que conducen a la optimización de su uso. Para su registro, por cada medidor, se puede usar un protocolo como el que se presenta en el Cuadro 5.4.

Cuadro 5.4 Registro para la recolección diaria de datos de consumo de agua de un medidor

Registro de consumo de agua			Mes:	Año:
Número del medidor:			Ubicación:	Unidades:
Día	Por	Lectura del medidor	Consumo	Comentarios
			← Colocar aquí la última lectura del mes anterior	
1				
2				
3				
...				
...				
...				
29				
30				
31				
Consumo mensual total				

Elaboración: CPTS

Cuando no se cuenta con medidores de agua, la elaboración del balance de masa exige idear algún método para estimar tanto su consumo global en el proceso, como en cada operación unitaria. Dicho método puede basarse en la evaluación o en un estimado de la cantidad de agua suministrada por las fuentes de suministro en uso, aprovechando algunas de sus características, como por ejemplo:

- la forma y capacidad del tanque de almacenamiento y la frecuencia con que se llena y vacía el mismo, utilizando marcas para medir los cambios de nivel del agua;
- la forma de transporte del agua (bombeo, manual, gravedad), el caudal y el tiempo de suministro por operación y por día. El caudal puede determinarse como un promedio de varias medidas realizadas con un balde (tacho) de volumen conocido y un cronómetro;
- superficie para coleccionar agua de lluvia y nivel pluvial por año.

Para cada operación unitaria, se debe considerar los usos del agua, el volumen y la frecuencia de cada uso. Para obtener esta información se debe encarar un monitoreo, especialmente en aquellas operaciones intermitentes, tales como la limpieza con vapor y los lavados en general.

En la práctica, se puede hacer determinaciones del caudal a través de mediciones del tiempo que toma llenar un balde de, por ejemplo, 10 litros. Después se observa la duración del uso (por día o por lote), incluyendo la intermitencia de dicho uso cuando corresponda, a fin de estimar el consumo. Para esto, se puede utilizar un protocolo como el que se ilustra en el Cuadro 5.5.

Cuadro 5.5 Medición del caudal y consumo de agua en cada proceso u operación unitaria.

Proceso u operación unitaria	Tiempo de llenado del balde (t) [minutos]	Volumen del balde (V) [litros]	Caudal $C = V/t$ [litros/minuto]	Duración del uso por día o por lote de producción (D) [minutos]	Consumo total por día o por lote = $C \times D$ [litros]	Observaciones
Operación Unitaria 1						
Manguera 1						
Tanque 1	*					
Máquina A	**					
.....						
Total OU 1						
Operación Unitaria 2						

Elaboración: CPTS

* El dato se refiere a la medición del tiempo de llenado del tanque 1

**El dato se refiere a la medición del tiempo de llenado de la maquina A

En base a esta información, se debe preparar un resumen del consumo de agua para cada operación unitaria, por día o por año, y desglosado por tipo de uso. Esta información puede registrarse en un protocolo similar al mostrado en el Cuadro 5.6.

Cuadro 5.6 Resumen del consumo de agua en cada operación unitaria, desglosado por tipo de uso.

Operación unitaria (OU) o sección	Agua utilizada en el proceso u operación [kg/día] o [kg/año]	Limpieza [kg/día] o [kg/año]	Vapor [kg/día] o [kg/año]	Otros [kg/día] o [kg/año]	Consumo total por operación o por sección de la planta [kg]
OU 1					
OU 2					
.....					

.....					
Administración					
Consumo total					

Elaboración: CPTS

5.4.3 Cuantificación de las salidas

La cuantificación de las masas correspondiente a todas las salidas del proceso y de cada una de las operaciones unitarias, requieren del registro detallado de las cantidades del producto principal, los subproductos, los residuos reutilizables o reciclables, las aguas residuales, los efluentes gaseosos y los desechos sólidos que necesitan ser almacenados y/o enviados fuera de la planta para su disposición final.

La cuantificación de la cantidad del producto principal es un factor clave en la eficiencia del proceso o de la operación unitaria. Se debe cuantificar, para cada operación unitaria, los productos intermedios que, en la operación actual, constituyen salidas y, en la operación unitaria siguiente, constituyen entradas.

Recomendación: Si el proceso u operación unitaria, se lleva a cabo con reacciones químicas, es importante comprender cómo afecta esto al balance de masa. Es muy útil en estos casos, realizar cálculos en base a las ecuaciones químicas igualadas, y a partir de la estequiometría analizar el comportamiento de los materiales.

Todos los datos mencionados, tanto para el proceso como para sus operaciones unitarias, deben ser registrados en un protocolo similar al propuesto en el Cuadro 5.7, y deben ser adaptados a los requerimientos de la empresa.

Cuadro 5.7 Salidas de las operaciones unitarias*

Operación Unitaria (OU)	Producto [cantidad]	Subproducto [cantidad]	Residuos a reciclaje interno [cantidad]	Residuos Almacenados [cantidades]	Residuos fuera de planta [cantidad]	Aguas residuales [cantidad]	Efluentes gaseosos [cantidad]	Total OU
OU 1								
OU 2								
.....								
.....								
Total del proceso								

Elaboración: CPTS

* Las cantidades se pueden expresar en kg o toneladas por año o por unidad de producto.

5.4.3.1 Cuantificación de aguas residuales

Los materiales contenidos en las aguas residuales representan, directa o indirectamente, una pérdida de insumos y, además, implican un costo de tratamiento. Los flujos de cada operación unitaria, así como los flujos del proceso global, requieren ser cuantificados (ver Cuadro 6.1), muestreados y analizados.

A continuación, se presenta sugerencias sobre cómo efectuar un estudio de salidas de aguas residuales:

- Identificar los puntos de descarga de los efluentes; es decir, identificar por dónde abandona la planta el agua residual.

- Identificar dónde confluyen los flujos de las diversas operaciones unitarias o áreas de proceso, incluyendo el punto donde se inicia y termina el flujo global. Esta acción permite esquematizar toda la red de drenaje de la planta.
- Conociendo la red de drenaje, se puede diseñar un programa apropiado de muestreo y de medición de flujos para monitorear, tanto las aguas residuales de cada operación unitaria como la composición del flujo global de la planta.
- Ejecutar un programa de monitoreo exhaustivo, tomando muestras sobre un amplio rango de condiciones de operación, tales como producción al máximo, arranque, cierre, lavado, etc. En el caso de sistemas combinados de drenaje de aguas de lluvia y de desecho, efectuar las mediciones de flujos y toma de muestras antes de que se mezclen con las aguas de lluvia. En el caso de sistemas combinados de descargas de aguas servidas (provenientes de servicios sanitarios) y de descargas de producción, efectuar las mediciones de flujos y toma de muestras antes de que se mezclen entre sí.
- Medir el caudal de los flujos intermitentes o pequeños de aguas residuales. Para caudales pequeños, puede emplearse un cronómetro y una cubeta o balde. Los caudales grandes ó continuos pueden evaluarse empleando técnicas tales como la de la placa de orificios o la del vertedero rectangularⁱⁱⁱ.

Las aguas residuales deben ser analizadas para determinar la concentración de algunos parámetros importantes. Se debe tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- Incluir en el análisis parámetros tales como pH, DQO, DBO₅, sólidos suspendidos (SS), aceites y grasas (A&G).
- Especificar otros parámetros químicos a analizar, dependiendo de las entradas de insumos. Por ejemplo, para empresas que trabajan con metales pesados (como el cromo en una curtiembre), éstos son parámetros importantes. Para cada proceso, solamente se necesita medir o estimar los parámetros más relevantes.
- Tomar muestras para análisis de laboratorio en recipientes limpios y secos. En el caso de flujos continuos, tomar muestras compuestas. Por ejemplo, para un proceso de 10 horas, tomar cada hora una muestra de 100 mL para obtener un litro de muestra compuesta (el volumen de la muestra debe ser siempre el mismo). Para tanques por lotes y escurrimiento periódico, puede ser adecuada una sola muestra instantánea, pero del lote bien mezclado. Para asegurar la calidad de los análisis, es preferible que el personal del laboratorio contratado realice la toma de muestras.

Para optimizar el número de muestras y de análisis, se puede identificar las salidas importantes y relacionarlas con las características de la operación que origina dichas salidas; así como con las propiedades, comportamiento y reacciones que sufren las masas de entrada. Por ejemplo, si el agua que ingresa es sólo para enfriamiento, sin que entre en contacto con materia soluble, es de esperar que el agua de salida tenga la misma composición que la de entrada y, por tanto, no requiere, en principio, de un análisis (o puede realizarse el análisis una sola vez a fin de verificar esta hipótesis).

De manera similar, si un material entra en una operación, por ejemplo, en forma mecánica y sin transformaciones químicas, la cantidad de sólidos incorporada al agua residual puede estimarse por la diferencia entre el peso de entrada y el peso de salida del sólido, sin necesidad de realizar un análisis para determinar la cantidad de materia sólida, disuelta o no, que se ha incorporado al agua. Sin embargo, es posible que por hidratación del sólido (humedad), el peso de salida deba ser corregido por un factor de hidratación, que tendría que ser determinado.

Los resultados obtenidos (cantidad de aguas residuales y sus cargas contaminantes) pueden ser registrados en un protocolo como el que se propone en los Cuadros 5.8.a y 5.8.b.

Cuadro 5.8.a Aguas residuales – Caudales, concentraciones y cargas para cada operación unitaria (OU)

Origen de las aguas residuales	Descarga [m ³ /día] o [L/h]	Concentración parámetro 1 [mg/L]	Carga 1 [mg/h] = Concentración x Descarga	Concentración parámetro 2 [mg/L]	Carga 2 [mg/h] = Concentración x Descarga	Destino: Alcantarillado, reciclaje u otro
OU 1						
OU 2						
.....						
.....						
Total		—		—		

Elaboración: CPTS

Cuadro 5.8.b Aguas residuales – Cantidades por unidad de producción para cada operación unitaria (OU)

Origen de las aguas residuales	Producción por unidad de tiempo [producción/h]	Cantidad de..... por unidad de producción [mg/ unidad de producción]	Cantidad de..... por unidad de producción [mg/ unidad de producción]	Cantidad de..... por unidad de producción [mg/ unidad de producción]	Destino: Alcantarillado, reciclaje u otro
OU 1					
OU 2					
.....					
.....					
Total (descarga específica)					

Elaboración: CPTS

NOTA: Las unidades de la descarga específica son [mg/unidad producción], y se obtiene de las siguientes operaciones: (descarga (L/h) x concentración (mg/L))/ producción por tiempo (producción/h) = cantidad del elemento descargado / unidad de producción.

5.4.3.2 Cuantificación de efluentes gaseosos

Para elaborar un balance de masa que sea lo más exacto posible, se requiere, también, cuantificar los efluentes gaseosos asociados al proceso o a cada operación unitaria.

Los efluentes gaseosos no siempre son identificables y, por lo tanto, puede ser muy difícil medirlos. Cuando no es posible cuantificarlos, se los puede estimar en base a relaciones estequiométricas, a ecuaciones de gases o a otras relaciones. Se puede calcular la cantidad de gases producida a partir de la cantidad de insumos usados y de acuerdo a las reacciones químicas involucradas. Por ejemplo, en la combustión del carbón, éste se transforma en dióxido de carbono, generando calor según la siguiente reacción estequiométrica:



Sin embargo, el contenido de carbono (C) en un combustible depende de su naturaleza y, en consecuencia, la cantidad del dióxido de carbono (CO₂) varía en función a dicho contenido.

En el caso de solventes orgánicos volátiles, se puede asumir, según sea el caso, que una parte o el total del solvente se transforma en gas (es decir, se volatiliza). Por ejemplo, 1 kilogramo de solvente usado para limpieza, genera a la salida de la operación prácticamente 1 kilogramo de solvente en forma de gas.

Se debe registrar los datos correspondientes a los efluentes gaseosos, indicando cuáles han sido estimados y cuáles son los que provienen de resultados de mediciones. Para determinar los caudales de gases se usan diversos instrumentos, que se muestran en el Cuadro 5.1. Para casos en los que se requiera determinar la concentración de los componentes de un efluente gaseoso, se sugiere recurrir a laboratorios especializados, a fin de que éstos sean los que realicen los muestreos y las correspondientes mediciones.

5.4.3.3 Cuantificación de residuos sólidos o semisólidos

Muchos procesos producen residuos que no pueden ser tratados en la planta, por lo que se necesita transportarlos a otras instalaciones para su tratamiento y/o disposición final. Los residuos pueden ser sólidos o semisólidos (lodos). Pueden ser peligrosos o no-peligrosos. El transporte y tratamiento de estos residuos fuera de la planta, son frecuentemente costosos. Por lo tanto, la minimización de residuos significará ahorros económicos.

Para el registro corriente de disposición de residuos sólidos, se puede aplicar el protocolo sugerido en el Cuadro 5.9.

Cuadro 5.9 Registro de datos para residuos sólidos

Día	Cantidad [en turriles, m ³ o toneladas]	Tipo de residuo	Origen del residuo	Destino	Observaciones	Firma
01	14 m ³	Virutas	Del rebajado	Relleno		
02						
.....						
.....						
.....						
30						
31						
Mes: Enero				Año: 2005		Producción en este mes:

Elaboración: CPTS

El control puede facilitarse midiendo el volumen y peso de los residuos recolectados en turriles, durante un día o semana normal de trabajo. Al final, se debe llenar un protocolo como el que se ilustra en el Cuadro 5.10.

Cuadro 5.10 Resumen de la generación de residuos de diferentes operaciones y su disposición

Origen	Descripción	Cantidad [t/año; m ³ /año o t/producto]	Servicio / Destino	Costos / Ingresos [US\$/año o US\$/producto]
<i>Operación 1, recepción</i>	<i>Sal, sólido</i>		<i>Relleno sanitario</i>	
<i>Operación 2, remojo</i>	<i>Lodo</i>			
.....				
.....				
.....				
<i>Sección almacenes</i>	<i>Pérdidas</i>			
.....				
.....				

Total				
-------	--	--	--	--

Elaboración: CPTS

5.4.4 Elaboración de un balance de masa

A través del balance de masa, no sólo se tiene una mejor comprensión de lo que ocurre con las entradas y salidas, sino también permite identificar el origen de los residuos y, a menudo, la existencia de pérdidas de masa que, de otra manera, pasarían desapercibidas. El balance inicial debe ser considerado como una evaluación aproximada que debe ser revisada y perfeccionada.

De acuerdo al tamaño y complejidad de la planta, se puede elaborar un balance de masa para cada operación unitaria o un solo balance para todo el proceso, puede ser suficiente. Para esto, se debe contar con información elaborada para cada operación unitaria y para el proceso global. Una vez evaluada la información, se decide si deben incluirse todas las entradas y salidas en el balance de masa, y/o se hacen balances unitarios por separado. Para fines de seguimiento y evaluación de la planta, se debe procurar utilizar siempre las mismas unidades de medición (preferentemente, el Sistema Internacional (SI) de unidades), la unidad de tiempo (por hora, día, mes o año) y la referencia para calcular los consumos específicos (por unidad de producción o por unidad de materia prima). Asimismo, se debe usar valores medidos en unidades estándar con referencia al, o los diagramas de flujo. Con la información obtenida para las entradas y salidas de masa en cada operación unitaria, se puede estructurar el balance de masa de acuerdo al protocolo ilustrado en el Cuadro 5.11.

Cuadro 5.11 Forma de presentar el balance de masa de cada operación unitaria

OPERACIÓN UNITARIA 1
Entradas [Cantidades, en unidades estándar por unidad de tiempo o por unidad de producción] Materia Prima 1 Materia Prima 2 Materia Prima 3 Reuso/Reciclaje de Residuos Agua (*) Total
Salidas [Cantidades, en unidades estándar por unidad de tiempo o por unidad de producción] Productos Subproductos Pérdidas de materia prima medidas durante almacenamiento y manejo Residuos reusados/reciclados o transportados fuera de la planta para recuperación Aguas residuales (*) Efluentes gaseosos Residuos líquidos peligrosos transportados fuera de la planta Residuos sólidos (o lodos) peligrosos transportados fuera de la planta Residuos líquidos no peligrosos transportados fuera de la planta Residuos sólidos (o lodos) no peligrosos transportados fuera de la planta Total
Diferencia de entradas y salidas = Masas no identificadas

Elaboración: CPTS

(*) Puede realizarse también un balance de agua específico

El balance de masa se elabora, normalmente, usando unidades de peso, ya que la magnitud de un volumen puede cambiar con la temperatura. Para convertir unidades de volumen a unidades de peso, es útil contar con una tabla de densidades, para líquidos y gases, en función de la

temperatura. Así también, para conocer la masa de un gas puede recurrirse a la ecuación de estado de los gases ($PV = nRT$)².

Una vez concluido el balance de masa global, y/o de cada operación unitaria, es conveniente repetir el procedimiento con respecto a cada residuo de interés, incluyendo el balance de agua. Esto supone registrar todas las entradas y salidas de insumos hacia y desde las operaciones unitarias, pues las diferencias entre las entradas y salidas, son un indicio importante de que ocurren pérdidas.

Para un insumo dado, los totales globales e individuales (por operación unitaria) deben ser revisados para detectar fallas en la información o inexactitudes. La suma de las entradas debe ser igual a la suma de las salidas. Si se tiene una diferencia significativa de masa, se debe investigar con mayor profundidad cada operación. En el caso de que las salidas sean menores que las entradas, se debe buscar pérdidas potenciales o descargas de residuos. Las salidas podrían aparentar ser mayores que las entradas si se cometen errores grandes de medición o estimación, o si se pasan por alto algunas entradas.

Un buen balance de masa no solo refleja la adecuada recolección de datos, sino que asegura entender el proceso y sus operaciones. En la práctica, rara vez ocurrirá que, por la complejidad que supone la determinación de valores exactos, las entradas igualen a las salidas, por lo que se requiere tener un buen criterio para determinar qué nivel de precisión es aceptable.

Algunos ejemplos de balances de masa se presentan en el Anexo F – 1.

5.5 BALANCE DE ENERGÍA

El balance de energía o balance energético es la cuantificación de las existencias³ y de los flujos de energía, y está sustentado en la primera ley de la termodinámica o principio de conservación de energía establece que:

“la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma”

En una empresa cualquiera, el balance energético, expresado en unidades físicas, permite seguir los flujos energéticos en un proceso, controlarlos y compararlos con referencias, y así, optimizarlos. Este concepto está basado, por una parte, en el Primer Principio de la Termodinámica (conservación de la energía); y, por otra, en el hecho de que en el análisis energético del proceso de fabricación de un producto, pueden considerarse las consecuencias del Segundo Principio de la Termodinámica. Esto significa que se puede calcular la energía mínima teórica necesaria para obtener ese producto. Este mínimo teórico necesario puede servir de referencia comparativa con los consumos reales industriales y, así, poder fijar metas para una mejora de los procesos desde el punto de vista energético. Está demás recalcar que el mínimo teórico es sólo una referencia, no así una meta a alcanzar.

El balance de energía se basa en la aplicación, del método “entrada-salida”, al estudio de la energía total (E_t) que interviene en un proceso. La energía total (E_T) es la cantidad de energía equivalente (directa o indirecta), que se suministra al proceso para la fabricación de un producto, y que debe ser medida en el lugar de producción. Si el proceso fuera exotérmico, es decir si el

² P: presión, V: volumen, n: número de moles, R: constante universal de los gases, T: Temperatura.

³ Por ejemplo, en un proceso por lotes, una existencia es el calor residual de un horno que se aprovecha para procesar el siguiente lote. También se refiere a la energía equivalente al combustible almacenado o residente en una operación unitaria.

proceso generara energía, se debe añadir, a la energía suministrada del exterior, la energía generada por el proceso, para satisfacer la relación:

$$E_{\text{Total}} = E_T = E_{\text{suministrada}} + E_{\text{exotérmica}}$$

En los párrafos precedentes cuando se hace referencia a proceso, debe entenderse que éste puede ser una operación unitaria, un proceso mismo, un conjunto de operaciones unitarias o de procesos en una planta industrial o en una empresa de servicios.

Siguiendo el mismo método explicado en detalle para obtener el balance de masa, se puede elaborar un balance de energía en cada operación unitaria o proceso en los que interviene. Sin embargo, debe tomarse en cuenta las particularidades de las distintas formas de energía que se usan en la actividad industrial. La presente guía se ocupa de la energía térmica (calor) y de la energía eléctrica, por ser las formas de energía más comúnmente utilizadas en la industria.

La energía térmica o calor, proviene del proceso de combustión de combustibles como la leña, el gas natural (GN), el gas licuado de petróleo (GLP) y otros; también de reacciones químicas que ocurren en el proceso de producción o de manera específica para generar calor; y finalmente, las reacciones nucleares.

El aprovechamiento del calor se verifica a través de distintos mecanismos, entre ellos: la producción de vapor para luego ser conducido y aprovechado en distintos intercambiadores y reactores; el calentamiento de aire u otros gases, que también pueden ser conducidos y aprovechados en diferentes equipos u hornos; el uso directo de la llama que, generalmente, se usa en el lugar donde se produce la combustión o generación de calor, etc. En cualquier caso, el objetivo final es aprovechar la energía térmica para producir un cambio controlado, como la cocción de alimentos, el secado de productos, el calentamiento de ambientes y hasta la generación de otro tipo de energía, como la eléctrica.

La energía eléctrica, a su vez, es la forma de energía más versátil y limpia; se la puede conducir a través de distancias muy grandes, su aplicación es amplia y su manipulación es relativamente simple. A partir de la energía eléctrica, se puede obtener también calor, sin embargo, la utilidad principal, en la industria y los servicios, es la generación de movimiento mecánico a través de motores de diferentes potencias. La iluminación artificial de ambientes es también uno de los usos más extendidos de la energía eléctrica.

A continuación se da las pautas generales para la elaboración de balances de energía térmica y eléctrica; así como algunos ejemplos.

5.5.1 Energía Térmica

La Figura 5.5 muestra un diagrama en el que se representan las entradas y salidas de energía térmica que ocurren en un proceso o en una operación unitaria.

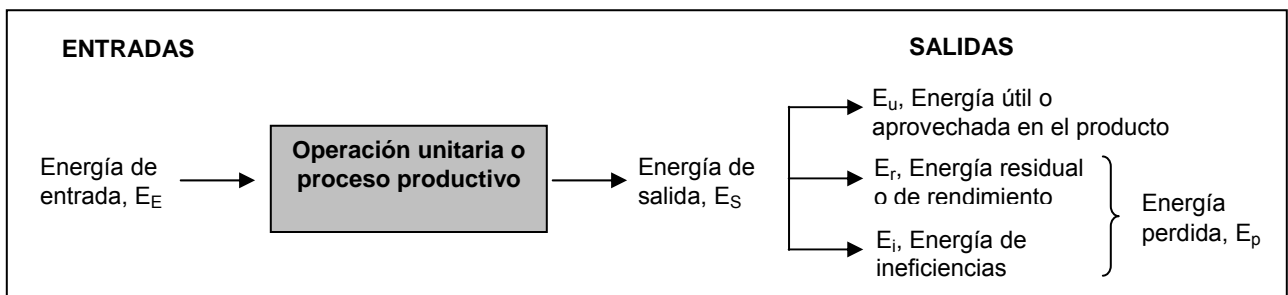


Figura 5.5 Entradas y salidas de energía en un proceso o en una operación unitaria

Elaboración: CPTS

De manera general, en base al diagrama de la Figura 5.5, el balance de la energía térmica puede ser expresado mediante las relaciones matemáticas que se muestran en la Figura 5.6, donde E_E es la energía total que ingresa al proceso u operación unitaria y debe ser igual, en procesos no exotérmicos (que generan calor), a E_S que es la energía de salida o energía total (E_T). Esta última esta compuesta por la suma de E_U y E_p , es decir de la energía útil y de la energía pérdida. La energía útil (E_U) es una parte de la energía total (E_T) que se consume estrictamente para que ocurra la transformación química, física o físico-química de los insumos en productos (la energía útil, normalmente, puede ser calculada, obteniéndose un valor teórico cuyo uso es aceptable en los balances de energía). A su vez, la energía perdida (E_p) es la suma de la energía residual o de rendimiento (E_r) y de la energía perdida debido a ineficiencias (E_i), por deficiencias o fugas.

Energía de entrada (E_E):	Energía de salida (E_S):	Balance:
$E_E =$ Suma de todas las energías de entrada	$E_S = E_U + E_p$ $E_p = E_i + E_r$ $E_S = E_U + E_i + E_r$	$E_E = E_S = E_T$
Donde:		
E_U : Energía útil E_p : Energía perdida E_i : Energía perdida por ineficiencias E_r : Energía residual		

Figura 5.6 Relaciones asociadas al balance de energía térmica en procesos no exotérmicos
Elaboración: CPTS

La energía residual o de rendimiento (E_r), es la energía que se pierde como parte del rendimiento termodinámico de una máquina térmica, por ejemplo, la energía que se pierde con los gases residuales de combustión que salen por la chimenea de hornos y calderas, y que no está disponible por ser necesaria para que opere el tiraje normal de estos equipos.

La energía perdida por ineficiencias (E_i), es la energía que se pierde por fugas, por ejemplo, la energía perdida por radiación/convección a través de las paredes sin aislar o con mal aislamiento de una caldera u horno; el exceso de gases que salen por la chimenea. También comprende otro tipo de ineficiencias operativas, entre ellas, la energía perdida por una mala combustión de los quemadores; el accionar de equipos sin carga, etc.

Adicionalmente, se define la energía disponible (E_{disp}) como la energía efectivamente disponible; es decir, la energía de entrada o total ($E_E = E_T$) menos la energía residual (E_r):

$$E_{disp} = E_E - E_r = E_T - E_r \quad (1)$$

El balance de energía, siguiendo el principio de conservación de la energía, supone que, para los procesos no exotérmicos, la energía total de entrada (E_E) es igual a la energía total de salida (E_S).

Entonces, reemplazando E_E por E_S , se tiene que:

$$E_{disp} = E_S - E_r = E_T - E_r \quad (2)$$

Sustituyendo $E_S = E_U + E_i + E_r$ (ver Figura 5.6) en la ecuación 2, se obtiene:

$$E_{disp} = E_U + E_i \quad (3)$$

Por otra parte, el rendimiento termodinámico de una máquina, R_η , se define como la razón entre la energía disponible (E_{disp}) y la energía total de entrada (E_E):

$$R_{\eta} = \frac{E_{\text{disp}}}{E_E} = \frac{(E_E - E_r)}{E_E} = 1 - \frac{E_r}{E_E} \quad (4)$$

De acuerdo a esta ecuación, y considerando que termodinámicamente E_r no puede ser cero, el rendimiento termodinámico de una máquina es siempre inferior a la unidad.

El rendimiento termodinámico es una referencia del rendimiento teórico máximo que se puede alcanzar con una máquina, y depende de las características de su diseño y construcción, por tanto, variará de una máquina a otra. Este parámetro permite conocer el nivel de eficiencia que se puede alcanzar si se reduce al máximo las pérdidas de energía que son controlables, como las fugas, las deficiencias en el aislamiento u otras ineficiencias.

Otro concepto, distinto al del rendimiento termodinámico, es la eficiencia térmica de un proceso o de una operación unitaria, R_{ξ} , que se define como la razón entre la energía útil (E_u) y la energía disponible (E_{disp}):

$$R_{\xi} = \frac{E_u}{E_{\text{disp}}} = \frac{E_u}{E_u + E_i} \quad (5)$$

La eficiencia térmica puede, en principio, ser igual a la unidad si se logra eliminar las pérdidas de energía por ineficiencias operativas (E_i).

Este parámetro permite conocer cuánto de la energía introducida en una máquina está siendo aprovechada efectivamente en la transformación de un producto y cuánto de esta energía se desperdicia debido a pérdidas en el equipo o maquinaria que se está usando, en ambos casos, respecto a la energía disponible (E_{disp}). Por ejemplo, cuando se produce vapor, la energía útil para producir un kg de vapor es, aproximadamente, 640 kcal, mientras que la energía disponible (una vez descontada la energía residual (E_r), de la energía total (E_T)) puede alcanzar a 1000 kcal. Esto implica que E_{ξ} es 0.64 y la energía que se pierde por ineficiencias (E_i) en la máquina, es 360 kcal.

Finalmente, el rendimiento energético total (R_T) se define como el producto del rendimiento termodinámico de la máquina (R_{η}) y la eficiencia térmica del proceso o de la operación unitaria (E_{ξ}):

$$R_T = R_{\eta} \times R_{\xi} = \frac{E_{\text{disp}}}{E_E} \times \frac{E_u}{E_{\text{disp}}} = \frac{E_u}{E_E} \quad (6)$$

Del resultado de la ecuación anterior, se deduce que el rendimiento energético total (R_T) es la razón entre la energía útil (E_u) y la energía de entrada (E_E), que también es la energía total (E_T).

En muchos casos, en una operación específica, se conoce, por una parte, la cantidad total de energía que se ha introducido a una máquina (E_E o E_T), y se puede calcular la energía útil o efectivamente aprovechada en la transformación (E_u), pero no se conoce el rendimiento termodinámico de la máquina (R_{η}). Entonces, el rendimiento energético total (R_T), o rendimiento global, permite evaluar de manera general el rendimiento que se está obteniendo de la energía global de la máquina en cuestión. Si se toma el ejemplo del vapor de agua, la energía útil (para producir 1 kg de vapor) es de 640 kcal, y suponiendo que la energía de entrada o total es de 1,100 kcal, entonces se tendrá un rendimiento total igual a 0.58.

5.5.1.1 Cuantificación de la energía térmica de entrada (E_E)

La manera adecuada de cuantificar la energía de entrada es contar con medidores del o de los combustibles utilizados, en cada una de las operaciones unitarias, y registrar los consumos diarios y los volúmenes de producción que se obtienen en ese mismo periodo. Por ejemplo, la cantidad de gas natural (GN) que consume un horno y la cantidad de material secada en 8 horas. Lo propio se

puede hacer con el consumo de GN en una caldera y la cantidad de vapor que se genera. A partir del registro de estos datos, se puede obtener los consumos específicos, según lo que se explica en la Sección 5.7. El Cuadro 5.12 ilustra un ejemplo de protocolo que puede utilizarse para el registro diario de datos.

Cuadro 5.12 Registro de datos de las entradas de energía y del consumo específico

Operación Unitaria	Combustible 1			Combustible 2		
	Consumo	Producción	Consumo específico	Consumo	Producción	Consumo específico
O U 1						
O U 2						
.....						
.....						
Pérdidas en almacén o no identificadas						
Total:						
Equivalente energético (kcal, MJ o Btu)						

Elaboración: CPTS

En caso de no contar con los medidores para cada operación unitaria, se puede determinar el consumo global a partir de un medidor principal en la acometida de la planta o por el registro de volúmenes comprados, si se trata de combustibles como diesel, GLP, fuel oil, etc. En este último caso se deberá tomar en cuenta las pérdidas en almacenamiento, especialmente por evaporación y/o fugas en las tuberías (ver Cuadro 5.12).

Una vez determinadas las entradas netas de combustibles al proceso u operación unitaria, se debe convertir la cantidad total de combustible (kg, L, m³, mpc) en su equivalente energético (kcal, MJ o Btu). Para ello es necesario conocer el poder calorífico del combustible empleado.

El Cuadro 5.13 muestra el poder calorífico (en kcal, por unidad de volumen o masa) para tres de los combustibles más utilizados:

Cuadro 5.13 Poder calorífico de combustibles en kcal

Combustible	Poder Calorífico
Gas Natural (GN)	263,340 kcal/mpc
Gas Licuado de Petróleo (GLP)	11,833 kcal/kg
Diesel	10,972 kcal/kg

Fuente: Plan Nacional de Energía, Ministerio de Energía e Hidrocarburos

En la práctica, el cómputo de E_E puede realizarse identificando solo las operaciones donde se usa energía en cantidades significativas (generalmente, en el calentamiento de agua, procesos de secado, y otros).

Si no se dispone de información sobre el consumo específico para las operaciones individuales, se debe aplicar algún método para determinar las cantidades de consumo promedio de energía por lote de producción o por período de tiempo. Las mediciones deben hacerse durante un intervalo de tiempo apropiado, para que las cifras puedan extrapolarse en forma confiable a valores mensuales o anuales.

5.5.1.2 Cuantificación de la energía térmica de salida (E_S)

La cuantificación de la energía de salida (E_S) es más compleja que la de entrada (E_E). El cómputo de E_S toma en cuenta, por una parte, la energía útil (E_U) que corresponde estrictamente a la energía teórica que se consume, durante el proceso u operación, para transformar la materia prima en producto; y, por otra, la energía perdida (E_P), que corresponde al total de la energía no aprovechada. Como se explicó anteriormente, esta última tiene dos componentes: el primero, corresponde a la energía residual que se pierde debido al rendimiento propio de la máquina (E_r); y el segundo, a la energía que se pierde por radiación, transmisión y convección (E_i), atribuible a fugas de calor, falta de aislamiento, mala combustión, etc.

Para el cómputo de E_S , en una operación unitaria o proceso, normalmente se requiere efectuar mediciones específicas como la temperatura en las paredes de los equipos; la temperatura en chimeneas; cuantificar las fugas de calor; etc. Por ejemplo, para calcular E_S en una caldera, se deberá calcular la energía útil (E_U) (teórica). Para esto es necesario conocer la cantidad de vapor producido en un determinado tiempo (kg de vapor /hora) y la temperatura y/o presión del vapor.

Por otra parte, deberá hacerse una estimación, lo más exacta posible, de la energía perdida (E_P), para lo que deberán efectuarse mediciones de las características de la combustión, a partir de los humos de chimenea⁴; de las temperaturas en las paredes de la caldera, para calcular las pérdidas por radiación/convección y, finalmente, el régimen de purgas de la caldera. Conociendo la eficiencia de diseño de la caldera, se puede obtener, por diferencia, la energía perdida por ineficiencias (E_i).

En el caso específico de calderas, hornos, secadores y otros equipos térmicos, se puede conocer la eficiencia de construcción a partir de los datos de placa o en los manuales de funcionamiento. Por esta razón, es necesario que las empresas guarden de manera segura los manuales y especificaciones del proveedor. Es recomendable que la empresa cuente con una biblioteca donde se guarden dichos documentos, junto a los reportes de mantenimiento. Todos los datos, pueden ser registrados en un protocolo similar al propuesto en el Cuadro 5.14.

Cuadro 5.14 Registro de las energías de salida por unidad de producción (UP)*

Operación Unitaria	Energía útil (E_U) [cantidad / UP]	Energía residual (E_r) [cantidad / UP]	Pérdidas de energía por ineficiencias (E_i) [cantidad / UP]
OU 1			
OU 2			
....			
....			
Total			

Elaboración: CPTS

(*) Las cantidades también se pueden expresar en kcal por mes ó kcal por año.

En algunas situaciones, resulta complicado estimar las pérdidas por ineficiencias (E_i). En estos casos, se suele computar E_i por diferencia entre la energía total de entrada (E_E) y la suma de las energías útil (E_U) y la residual (E_r) (ver ecuación de E_S en la Figura 5.6, en la cual se ha sustituido E_S por E_E , y se ha despejado el término E_i):

$$E_i = E_E - (E_U + E_r) \quad (7)$$

⁴ La medición de los gases de combustión se puede realizar con un analizador de gases, o a partir de mediciones de la temperatura, de los flujos de los humos, y relacionar estas mediciones con la estequiometría de la combustión.

El riesgo de estimar las pérdidas de energía mediante este cálculo, es que cualquier valor de E_u o de E_r no computado correctamente, queda registrado, por defecto o por exceso, como parte del valor de E_i . Por ejemplo, un error que puede cometerse fácilmente al medir la energía residual de una caldera (E_r), es el incluir en este término la energía en exceso que se pierde con los gases que salen por la chimenea, debido a un uso innecesario o a un exceso de combustible, o a una mala transferencia de calor por falta de limpieza y mantenimiento del intercambiador de calor.

5.5.1.3 Procedimientos para realizar el balance de energía térmica

El vapor en una industria se destina para diversos propósitos, entre ellos, el calentamiento de insumos en una operación determinada, la evaporación de líquidos, el calentamiento de agua, etc. Generalmente, el uso de vapor se efectúa a través de intercambiadores de calor, que es la forma más eficiente de usarlo, o de manera directa, como vapor “vivo”.

En los ejemplos 1 y 2, que se presentan a continuación, se detallan los procedimientos para efectuar los balances de energía para una caldera y para un evaporador, respectivamente.

5.5.1.4 Ejemplo 1. Balance de energía de una caldera

La generación de vapor se efectúa en una caldera en la que se introduce agua y en la que se utiliza un combustible, que puede ser gas natural, GLP, diesel, u otro, para calentar el agua y luego vaporizarla a la temperatura y presión convenientes para el uso al cual está destinado. Un esquema simple de una caldera se presenta en la Figura 5.7.

Para obtener el balance se debe efectuar las mediciones necesarias, con la mayor exactitud posible y en un determinado periodo de tiempo, para determinar la energía de entrada (E_E) en la caldera (combustible) y compararla con la energía de salida E_S (energía útil más energía perdida). Ver Figura 5.6.

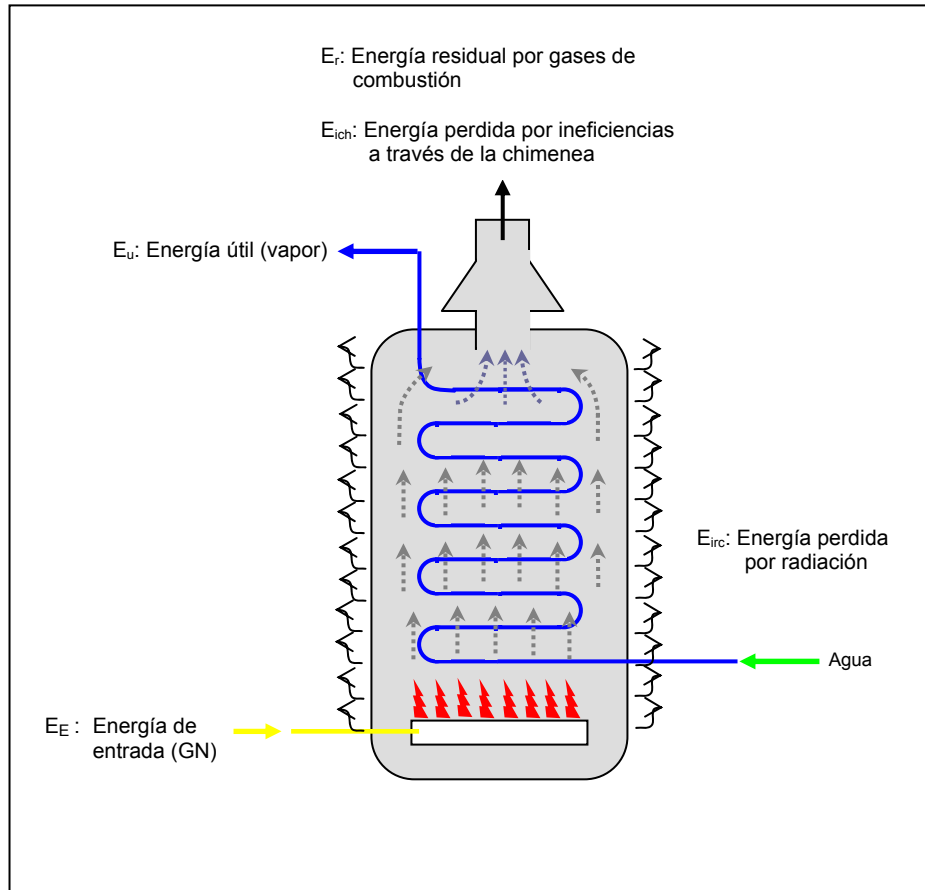


Figura 5.7 Esquema general de una caldera
Elaboración: CPTS

a. Determinación de la energía de entrada E_E : la fuente de energía para vaporizar el agua proviene del combustible que se usa en la caldera. Por lo tanto, será necesario conocer la cantidad que, de dicho combustible, ingresa a la caldera en un determinado tiempo. La cantidad de energía de entrada será igual a la cantidad del combustible multiplicado por su poder calorífico.

$$E_E = m [\text{mpc}] \times P_c \left[\frac{\text{kcal}}{\text{mpc}} \right] \quad (\text{Tomando el gas natural como ejemplo})$$

donde:

m: volumen de gas natural [millar de pies cúbicos, mpc]

Pc: poder calorífico del gas natural [kcal/mpc]

Dependiendo del tipo de combustible que se esté usando, habrá que tener cuidado con las unidades que se usan para medir la cantidad y el poder calorífico (Pc) del mismo. Para combustibles sólidos y líquidos se usan, normalmente, unidades de energía por unidad de masa, como kcal/kg, kjoul/mol; para combustibles gaseosos, como el gas natural, se usan unidades de energía por unidad de volumen, como kcal/mpc, BTU/m³.

b. Determinación de la energía de salida (E_S): como se ha definido anteriormente, la energía de salida (E_S) es igual a la suma de la energía útil (E_u), la energía que se pierde por ineficiencias (E_i) y la energía residual o de rendimiento (E_r).

$$E_s = E_u + E_i + E_r$$

Para calcular la energía de salida en la caldera, habrá que estimar cada uno de los factores que componen la fórmula anterior. A continuación se presenta un procedimiento para determinarlos:

1. Cálculo de la energía útil (E_u): en el caso de la caldera, la energía útil es igual a la energía consumida para producir una cantidad de vapor a una determinada presión, según los requerimientos de la planta. Por su parte, la masa de vapor será igual a la masa de agua introducida a la caldera⁵:

$$m_v = m_{H_2O}$$

la masa de agua puede determinarse leyendo el volumen en el medidor instalado a la entrada de la caldera, o, en caso de no existir el medidor, midiendo el volumen de condensados de vapor a la salida de la caldera. En muchas plantas, los condensados de vapor se reciben en un depósito desde donde se bombea nuevamente a la caldera; si este es el caso se puede medir el volumen de condensado producido en un periodo de tiempo determinado.

En caso de no existir un depósito de condensados, es posible medir el volumen de vapor producido en un determinado periodo de tiempo, haciendo burbujear el vapor producido en un recipiente con agua fría, y determinar la cantidad del vapor condensado por diferencia entre el volumen inicial de agua fría y el volumen obtenido después de hacer burbujear el vapor. Este último procedimiento permite tener un valor confiable, pero debe ser efectuado con mucho cuidado debido, principalmente, a la presión y temperatura del vapor que se está midiendo. Para obtener un dato lo más exacto posible, el burbujeo de vapor en el agua fría debe controlarse a fin de que éste no escape del recipiente. Esto implica que el extremo de la manguera por donde sale el vapor debe sumergirse hasta el fondo del recipiente y cuidando que el agua donde se efectúa el burbujeo no llegue al punto de ebullición. Es recomendable no sobrepasar los 70 °C.

$$m_{H_2O} [kg] = V_{H_2O} [L] \times \rho_{H_2O} \left[\frac{kg}{L} \right] = V_{condensado} [L] \times \rho_{H_2O} \left[\frac{kg}{L} \right]$$

donde:

V_{H_2O} : volumen de agua [L]

$V_{condensado}$: volumen de condensado [L]

ρ_{H_2O} : densidad del agua [kg/L]

Finalmente, la energía útil será:

$$E_u [kcal] = m_{H_2O} [kg] \times C_{p_{H_2O}} \left[\frac{kcal}{kg \text{ } ^\circ C} \right] \times (T_f - T_0) [^\circ C] + m_{H_2O} [kg] \times L_{H_2O} \left[\frac{kcal}{kg} \right]$$

donde:

L_{H_2O} : calor latente de vaporización del agua [kcal/kg]

$C_{p_{H_2O}}$: capacidad calorífica del agua a presión constante [kcal/kg °C]

T_f : temperatura final del agua [°C]

T_0 : temperatura inicial del agua [°C]

⁵ Esta igualdad se cumple cuando la caldera está trabajando en régimen, es decir, se está hablando del flujo de entrada y de salida de agua en su estado líquido y gaseoso, respectivamente, sin incluir el volumen adicional de agua (volumen "muerto") que está en el interior de la caldera.

2. Cálculo de la energía perdida por ineficiencias (E_i): la energía que se pierde por ineficiencias se debe, principalmente, a las pérdidas por radiación y convección por falta o mal estado del aislamiento en la superficie de la caldera, a la pérdida de agua caliente que se elimina por las purgas que se efectúan, y al exceso de calor que se pierde por la chimenea. En consecuencia, E_i será igual a:

$$E_i = E_{irc} + E_{ip} + E_{ich}$$

donde:

E_{irc}: energía perdida por radiación y convección

E_{ip}: energía perdida por purgas

E_{ich}: energía perdida por ineficiencias, a través de la chimenea

Para calcular la energía perdida por radiación y convección (E_{irc}), se requiere conocer la superficie exterior de la caldera o la superficie sin aislamiento, la temperatura de esta superficie y la del ambiente, el lapso que se ha tomado para hacer las mediciones, así como el coeficiente combinado de transferencia de calor por radiación y convección, h_s. Estos datos deben aplicarse a la siguiente fórmula:

$$E_{irc} = h_s \left[\frac{\text{kcal}}{\text{h m}^2 \text{K}} \right] \times A_{Ext} [\text{m}^2] \times (T_{Sexterior} - T_{amb}) [\text{K}] \times t_{op} [\text{h}]$$

donde:

A_{Ext}: área de la superficie exterior de la caldera [m²]

T_{Sexterior}: temperatura de la superficie exterior [°C]

T_{amb}: temperatura ambiente [°C]

t_{op}: tiempo que dura la operación [horas]

h_s: coeficiente combinado de transferencia de calor por radiación y convección [kcal/hora m² K]

Para calcular energía perdida por purgas (E_{ip}) se requiere conocer la masa de agua que se extrae en las purgas, su temperatura y la capacidad calorífica del agua. Estos datos se pueden aplicar a la siguiente fórmula:

$$E_{ip} [\text{kcal}] = m_{\text{H}_2\text{O purgas}} [\text{kg}] \times C_{p\text{H}_2\text{O}} \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} \right] \times (T_{\text{purgas}} - T_{\text{amb}}) [^\circ\text{C}]$$

donde:

m_{H₂O}: masa del agua proveniente de las purgas [kg]

T_{purgas}: temperatura del agua de las purgas [°C]

T_{amb}: temperatura del medio ambiente [°C]

C_p: capacidad calorífica del agua [kcal/kg °C]

Finalmente, para calcular la energía perdida por ineficiencias a través de la chimenea (E_{ich}) se requiere conocer el flujo de los gases de salida y la temperatura a la que están saliendo los mismos. Dependiendo de la temperatura de los gases de chimenea y de las dimensiones de ésta, la medición del flujo puede efectuarse con distintos equipos de medición como un anemómetro, Tubo Pitot, o un analizador de gases, entre otros.

Debe aclararse que en este punto se está calculando el calor excedente que sale por la chimenea, pues existe una cantidad de calor que se perderá debido a la energía termodinámicamente necesaria para que funcione la caldera, como se verá en el siguiente punto.

Se debe satisfacer la ecuación:

$$E_{ich} = E_{tch} - E_{rch}$$

donde:

E_{tch} : energía total que sale por la chimenea

E_{rch} : energía residual o termodinámicamente necesaria

Los gases de combustión en la chimenea deben estar, como referencia, entre 120 y 150 °C, por lo tanto, cualquier temperatura superior a 150 °C, representará una pérdida de calor, o calor excedente.

Para el cálculo respectivo se deberá aplicar la siguiente fórmula:

$$E_{ich} \text{ [kcal]} = m_{gc} \text{ [kg]} \times Cp_{gc} \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} \right] \times (T_{gc} - T_{amb}) [^\circ\text{C}]$$

donde:

m_{gc} : masa de los gases de combustión [kg]

Cp_{gc} : capacidad calorífica a presión constante de los gases de combustión [kcal/kg °C]

T_{gc} : temperatura de los gases de combustión [°C]

T_{Amb} : temperatura ambiente exterior [°C]

3. Cálculo de la energía residual o de rendimiento (E_r): como se ha explicado anteriormente, E_r es la energía que se pierde como parte del rendimiento termodinámico de una máquina térmica, en este caso la caldera, pero sin lo cual no podría funcionar. Dentro de estas pérdidas debe considerarse, por una parte, la cantidad de energía que debe salir por la chimenea para que exista el flujo de calor y la caldera funcione, la que dependerá del diseño del equipo y, por otra parte, la energía que se gasta en el calentamiento del equipo, es decir, la energía que interviene en el calentamiento de la masa de la caldera (carcaza, tuberías de intercambio de calor y cámara de combustión, principalmente). Esta última será mínima si la caldera funciona en régimen continuo o, por el contrario, será mayor si el funcionamiento es intermitente. Para el caso específico de la caldera, se tiene que:

$$E_r = E_{igc} + E_{im \text{ caldera}}$$

donde:

E_{igc} : energía perdida por los gases de combustión

$E_{im \text{ caldera}}$: energía que se pierde para calentar la masa total de la caldera

Para calcular E_{igc} se requiere medir el flujo de los gases de combustión, su temperatura y la temperatura ambiente. Debe tomarse en cuenta que la temperatura de salida depende de la construcción y características de funcionamiento de la caldera, así como del combustible utilizado. Sin embargo, se puede tomar como valor referencial, para un buen funcionamiento, el rango entre 120 y 150°C.

$$E_{igc} \text{ [kcal]} = m_{gc} \text{ [kg]} \times Cp_{gc} \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} \right] \times (T_{gc} - T_{amb}) [^\circ\text{C}]$$

donde:

m_{gc} : masa de los gases de combustión [kg]

Cp_{gc} : capacidad calorífica a presión constante de los gases de combustión [kcal/kg °C]

T_{gc} : temperatura de los gases de combustión [°C]

T_{Amb} : temperatura ambiente exterior [°C]

Para calcular $E_{im\ caldera}$ se debe conocer la masa de la carcasa de la caldera y de sus componentes que se calientan durante su operación. Este dato puede obtenerse del manual de funcionamiento y las características del aparato; en caso de no contar con esta información se puede estimar la masa considerando el material con el que está fabricado, por lo general hierro fundido, y sus dimensiones. Conociendo la masa de la caldera, la diferencia de temperaturas entre el equipo y el medio ambiente, y la capacidad calorífica del hierro fundido se tiene:

$$E_{im\ caldera} [kcal] = m_{caldera} [kg] \times C_{e_{HF}} \left[\frac{kcal}{kg\ ^\circ C} \right] \times (T_f - T_0) [^\circ C]$$

donde:

m_{gc} : masa de la carcasa y componentes de la caldera [kg]

$C_{e_{HF}}$: calor específico del hierro fundido [kcal/kg °C]

T_{gc} : temperatura final de la carcasa y componentes de la caldera [°C]

T_{Amb} : temperatura inicial de la carcasa y componentes de la caldera [°C]

c. Cálculo del rendimiento de la caldera: a partir de los datos obtenidos en el balance de energía se puede calcular la energía neta (E_N), el rendimiento termodinámico (R_η), la eficiencia térmica (E_ξ) y el rendimiento energético total R_T . Para este cálculo debe usarse las ecuaciones 3, 4, 5 y 6 de este acápite.

En el Anexo F – 8 “Balance de energía en una operación de evaporación” se describe un procedimiento para realizar el balance energético de un equipo de vaporización, usando como ejemplo la evaporación de leche natural.

5.5.2 Energía Eléctrica

Para hacer un uso óptimo de la energía eléctrica, es necesario tener el control sobre su consumo, tanto en el proceso global de producción, como en las operaciones donde el consumo es significativo.

Sin embargo, efectuar un balance energético del consumo de electricidad, en términos absolutos, por lo general, resulta complicado. Una forma razonable de cuantificar los consumos y flujos de la energía eléctrica, es a través de un sistema de control de dichos consumos y flujos de cada equipo, en cada una de las operaciones unitarias, en cada proceso y de una manera global. La forma adecuada de controlar el consumo de energía es a partir de un balance de energía en términos de consumos específicos; es decir, relacionando la cantidad de energía eléctrica que se consume [kWh] por unidad de producto elaborado [kg], [tonelada], etc. El consumo específico puede ser medido, de manera global, calculando la razón entre el consumo total de energía y la producción total, o puede efectuarse de manera específica para cada una de las operaciones que se desarrolla en la planta o en cada equipo.

Para controlar el consumo de energía eléctrica, es necesario contar con información, tanto de su consumo, como de la producción. El registro de la información puede ser diario, semanal o mensual, dependiendo del tipo de industria, de la exactitud de la información que se requiera y/o de las exigencias de control que se imponga la industria.

Para obtener información sobre el consumo de energía eléctrica, las empresas deberán instalar, además del medidor principal, medidores en las operaciones con mayores consumos de energía o que tengan consumos permanentes, como en el caso de las bombas de agua. Además, la empresa deberá llevar un control de los volúmenes de producción total y de los volúmenes de insumos y productos intermedios procesados en cada una de las operaciones, registrándolos con la misma frecuencia con la que se registra el consumo de energía eléctrica.

Por ejemplo, en las empresas, se puede usar un protocolo, como el que se ilustra en el Cuadro 5.15, para registrar el consumo de energía y los volúmenes de producción. La información puede ser registrada en forma diaria para cada una de las operaciones o de los equipos más importantes, en los que se haya instalado un medidor específico.

En los medidores 1, 2, 3, en la columna de “Consumo”, se debe anotar el total diario de energía eléctrica consumida, por medidor. En tanto que en la columna de “Cantidades procesadas”, se debe anotar la cantidad de insumos (en kilogramos o toneladas) que ha sido procesada en el equipo 1 o en la operación asociada.

Cuadro 5.15 Protocolo para el registro del consumo de energía eléctrica por tipo de equipo u operación

Día	Medidor 1			Medidor 2			Medidor 3		
	Equipo 1			Equipo 2			Compresores		
	Consumo [kWh]	Cantidad procesada [t]	Consumo específico [kWh/t]	Consumo [kWh]	Cantidad procesada [t]	Consumo específico [kWh/t]	Consumo [kWh]	Cantidad procesada [t]	Consumo específico [kWh/t]
01									
02									
03									
...									
...									
29									
30									
Total									
Lectura anterior									
Día	Medidor 4			Medidor 5			Medidor Principal		
	Operación X			Bombeo de agua			Consumos en Planta		
	Consumo [kWh]	Cantidad procesada [t]	Consumo específico [kWh/t]	Consumo [kWh]	Volumen consumido [m ³]	Consumo específico [kWh/m ³]	Consumo [kWh]	Cantidad procesada total[t]	Consumo específico [kWh/t]
01									
02									
03									
...									
...									
29									
30									
Total									
Lectura Anterior									
Mes:				Año:			Producción del mes:		

Elaboración: CPTS

El medidor 5 está dedicado exclusivamente al bombeo de agua. Se recomienda registrar tanto el consumo de energía eléctrica como el volumen total de agua consumida, el mismo que deberá ser medido en la entrada principal del sistema de distribución de agua. Con estos datos, y con los de la producción total, se puede calcular y registrar el consumo específico de energía eléctrica en función de:

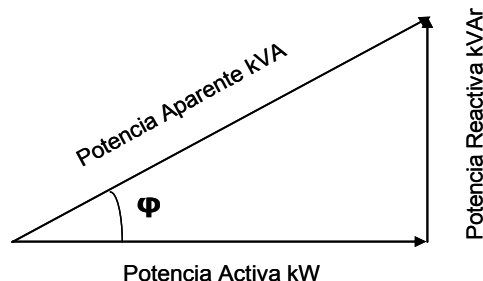
- El volumen total de agua consumida (expresado en kWh/m³ agua).
- La cantidad total de materia prima utilizada o de producto producido (expresado en kWh/t de materia prima o producto).

Los consumos menores de la planta, tales como iluminación, administración, cocina, etc., pueden ser calculados por diferencia respecto a la lectura del medidor principal de la empresa de servicios de energía eléctrica que registra el consumo total.

Para efectuar el balance de energía eléctrica se utilizan básicamente los mismos conceptos definidos en la Figura 5.5. Sin embargo, se deberá tomar en cuenta las definiciones y las particularidades de los equipos en los que se usa la energía eléctrica.

Para el balance de energía eléctrica de un motor eléctrico, por ejemplo, deberá tomarse en consideración los siguientes parámetros:

- La potencia activa (P_A), que es aquella que produce trabajo mecánico efectivo (incluye el trabajo mecánico demandado por el mismo motor para funcionar en vacío (P_{Am})). La P_A se mide en kilovatios [kW].
- La potencia reactiva (P_R), que es la potencia que genera el motor como resultado del desfase que existe entre el voltaje y la corriente inducida por las bobinas del propio motor. Esta potencia se opone a la corriente que circula de la red hacia el motor y no produce trabajo mecánico útil para el usuario. La potencia reactiva tiene dos componentes, el primero debido al diseño del motor (P_{Rd}) y el segundo debido a la falta de carga mecánica⁶ con relación a la carga mecánica nominal del motor (P_{Rf}). La P_R , se mide en kilovoltios-amperio reactivos, [kVAr].
- La potencia aparente (P_{AP}), que es el producto del voltaje [V] aplicado a un motor por el total de la corriente [A] que circula por el mismo. También se la define como la suma vectorial de la potencia activa y la potencia reactiva. Es decir, es la potencia total demandada por el motor a la red eléctrica. La P_{AP} , se mide en kilovoltios-amperio, [kVA].
- El factor de potencia (F_P), que es la relación entre la potencia activa y la potencia aparente. Esta relación, que varía entre 0 y 1, permite conocer el grado de aprovechamiento o correcto uso de la energía asociada a la potencia. Cuanto más próximo a 1 sea el F_P mayor será el grado de aprovechamiento. El F_P , se conoce también como el coseno del ángulo ϕ ($\cos \phi$).



Para un motor bien dimensionado con relación a la operación o trabajo mecánico que debe desarrollar (es decir, que está funcionando con una carga mecánica igual a la carga mecánica nominal de diseño), se tiene que:

- La energía total (E_T), que es igual a la energía aparente, se calcula multiplicando el valor de la potencia aparente [kVA] por el tiempo [horas] de funcionamiento. Su unidad de medida es el kilovoltio-amperio hora [kVAh].

⁶ En un motor, la carga mecánica es la fuerza que se opone al movimiento de rotación del eje del motor.

- La energía activa (E_A) se calcula multiplicando el valor de la potencia activa [kW] por el tiempo [horas] de funcionamiento. Su unidad de medida es el kilovatio hora [kWh], que es la magnitud que se lee normalmente en los medidores eléctricos para el cobro de la energía eléctrica consumida.
- La energía reactiva (E_R) se calcula multiplicando el valor de la potencia reactiva [kVAr] por el tiempo [horas] de funcionamiento. Su unidad es el kilovoltio-amperio reactivo hora [kVArh].

Para efectuar el balance de energía eléctrica es necesario tomar en cuenta que:

- La energía activa (E_A) tiene dos componentes:

$$E_A = E_{Am} + E_{Au}$$

donde:

E_{Am} : energía activa consumida mecánicamente por el motor para su funcionamiento, que puede disiparse como calor, o que interviene para vencer el rozamiento y la propia inercia del motor, por lo que no es aprovechable. Esta pérdida puede incrementarse dependiendo de las condiciones de trabajo del motor; por ejemplo, mala ventilación, falta de lubricación, mala alineación del eje, poleas mal ajustadas, etc.

E_{Au} : energía activa útil que produce trabajo efectivo, por ejemplo la molienda de un material, el movimiento de una zaranda, etc.

- La energía reactiva (E_R) también tiene dos componentes:

$$E_R = E_{Rd} + E_{Rf}$$

donde:

E_{Rd} : Energía reactiva consumida por el motor para su funcionamiento. No es aprovechable. Cuando la carga mecánica es igual a la carga mecánica de diseño, entonces el factor de potencia es igual al factor de diseño que, en la mayoría de los motores, es igual a 0.85.

E_{Rf} : Energía reactiva debida al desfase que se produce entre el voltaje y la corriente que circula por las bobinas del motor, cuando éste trabaja con una carga mecánica inferior a la carga mecánica de diseño. Cuando la carga mecánica es igual a la carga de diseño, E_{Rf} es cero y, por tanto solo en este caso la energía reactiva (E_R) es igual a la energía reactiva de diseño E_{Rd} (que equivale a la diferencia del factor de potencia (F_P) de 0.85, de diseño, al factor de potencia de 1).

- La energía total (E_T) es igual a la suma vectorial de $E_A + E_R$ o a la suma aritmética:

$$E_T = E_r + E_{disp}$$

donde:

E_r : energía residual, que a su vez es la suma vectorial de $E_{Am} + E_{rd}$, previamente definidas y, por tanto, es una energía no aprovechable, cuya magnitud depende de las características de diseño del motor y del estado físico del motor (mantenimiento).

E_{disp} : energía disponible, que a su vez es la suma vectorial de $E_{Au} + E_{Rf}$, también previamente definidas y, por tanto, es la energía potencialmente aprovechable del motor, para producir trabajo mecánico útil.

En el Cuadro 5.16, se presenta un resumen de las relaciones que existen entre los diferentes términos de energía.

Cuadro 5.16 Relaciones entre términos de energía

	← Suma aritmética →
↑ Suma vectorial ↓	$E_A = E_{Am} + E_{Au}$ $+ \quad + \quad +$ $E_R = E_{Rd} + E_{Rf}$ $\parallel \quad \parallel \quad \parallel$ $E_T = E_r + E_{disp}$

A partir de la información que se presenta en el Cuadro 5.16, se puede concluir lo siguiente:

- La energía residual (E_r) solo puede ser disminuida reduciendo la magnitud de la energía activa del propio motor (E_{Am}), ya que la energía reactiva de diseño (E_{Rd}) es constante para un motor dado. E_{Am} puede reducirse con un buen mantenimiento del motor, para que tienda a cero y, de esta forma, E_r tienda a E_{Rd} , con el propósito de mejorar la eficiencia energética y, por ende, lograr ahorros económicos.
- La energía disponible (E_{disp}) puede transformarse íntegramente en energía activa útil (E_{Au}) en la medida en que la magnitud de la energía reactiva E_{Rf} tienda a cero. E_{Rf} tiende a cero, cuando la carga mecánica impuesta al motor tiende a ser igual a la carga mecánica de diseño. En este punto, la energía disponible (E_{disp}) se transforma íntegramente en energía útil (E_{Au}), generando ahorros económicos.
- Por otra parte, las energías E_{Am} , E_{Rd} y E_{Rf} son los tres componentes de la energía perdida (E_p). Se debe recordar que la suma vectorial de E_{Am} más E_{Rd} es igual a la energía residual (E_r), que es una energía que se pierde, al igual que la energía E_{Rf} . Sin embargo, esta última es una pérdida por un deficiente uso del motor.

Por otro lado, en el caso de un sistema de iluminación con focos incandescentes, por ser un sistema que funciona con resistencias, la potencia reactiva P_R [kVAr] será igual a cero, por lo tanto, la potencia aparente P_{AP} [kVA], será igual a la potencia activa P_A [kW]. De aquí, se puede concluir que la energía total, E_T , demandada por el sistema de iluminación en un determinado tiempo, t , será igual a la energía activa E_A [kWh] que consumen los focos. Por su parte, la energía útil, E_{Au} , será igual a aquella parte de la energía activa (E_A) que se convierte efectivamente en iluminación, es decir lúmenes; mientras que la energía disipada por los focos como calor, será igual a la energía residual, E_r , necesaria para el funcionamiento de los focos incandescentes.

5.6 CÁLCULO DE CONSUMOS Y DESCARGAS ESPECÍFICOS

Un beneficio adicional, que se obtiene a partir de los registros, tanto del balance de masa, como del balance de energía, es disponer de una base de datos para calcular consumos y descargas específicos, que pueden utilizarse como indicadores para evaluar el rendimiento operativo y el desempeño ambiental de la empresa.

Como se ha mencionado anteriormente, un consumo específico expresa la cantidad de materia o de energía consumida por unidad de insumo utilizado, o de producto manufacturado. Para todo insumo de entrada al proceso u operación, se puede calcular su respectivo consumo específico.

De manera análoga, una descarga específica expresa la cantidad de residuos generados, ya sea por unidad de insumo utilizado o de producto manufacturado. Para cada residuo, sea éste tratado como desecho o no, se puede calcular su respectivo valor de descarga específica.

En las empresas, los consumos y descargas específicos, que normalmente se expresan en unidades de consumo o de descarga por “tonelada de materia prima” o por “m³ de producto”, u otra unidad, son muy útiles para evaluar internamente, y en forma periódica, la eficiencia de cada operación unitaria así como la del proceso global de la empresa. Más aún, permiten realizar comparaciones con consumos y descargas específicos de otras empresas (en inglés

“benchmarking”). Estas comparaciones pueden ayudar a identificar operaciones que podrían ser mejoradas a través de prácticas de PML.

En particular, a partir de los resultados del cálculo periódico del consumo específico de agua y de energías eléctrica y térmica, expresados en función del consumo de materia prima o de la producción de la planta (m^3 agua/kg de materia prima, kWh/t producto y kcal/ m^3 de producto), se puede construir gráficos que permiten analizar el comportamiento de dichos consumos en función de la producción. Un comportamiento típico observado en las industrias en general, es que a mayores volúmenes de producción se tiene menores consumos específicos de agua, energía eléctrica y térmica. Resulta evidente que, si la empresa está produciendo al máximo de su capacidad instalada, el consumo específico de los insumos será menor, y viceversa. A muy bajos volúmenes de producción, el consumo específico crece de manera rápida.

El hecho de tener información sobre el consumo de insumos (materia prima, agua, energía y otros) y su respectivo análisis, permite a la administración o gerencia general de la empresa:

- Planificar los niveles de producción en los cuales el consumo específico es menor, de acuerdo a la capacidad instalada y la demanda de sus productos.
- Fijar metas de consumo de insumos de manera global y por proceso. Esto permite un control, bastante preciso, de los niveles de consumo y del rendimiento de la planta en cada una de sus secciones.
- Asignar los costos por consumo de cada insumo, a cada una de las operaciones que interviene en el proceso productivo.
- Efectuar una correcta gestión de los recursos, superando oportunamente los problemas que pueda enfrentar en la planta.

El análisis de los consumos específicos y de las descargas específicas, constituye una manera de examinar la eficiencia de cualquier operación unitaria o del proceso entero.

Los consumos y descargas específicos sirven para evaluar, cada uno por su lado, las entradas o salidas de materiales y energía. Ambos indicadores pueden ser usados para comparar la eficiencia de la planta con la de otras o para contrastarlos con estándares internacionales. Igualmente, se pueden comparar con otros indicadores como los de “mejor práctica industrial” (best industrial practice – BIP) o los de “mejores técnicas disponibles” (best available techniques - BAT) para un proceso u operación en particular o para toda la planta. Esta comparación puede ayudar a conocer aquellos procesos u operaciones que tienen un buen potencial para ser mejorados a través de medidas de producción más limpia.

En general, para comparar consumos específicos se debe tener en cuenta aspectos como: capacidad de producción de la planta, tecnología empleada, tipos de procesos u operaciones, tipos de insumos utilizados y otros. Por ejemplo, no es posible comparar el consumo específico de energía en una curtiembre que solo hace wet blue, con una que llega a cuero acabado, salvo que en ésta, se descuenta el consumo de energía asociado a las operaciones adicionales requeridas para producir el cuero acabado.

Además, estos indicadores constituyen un apoyo práctico, por ejemplo, para la elaboración del Informe Ambiental Anual (requerido por el RASIM, en su artículo 59 y en el Anexo 9, que contiene “indicadores de rendimiento”). Asimismo, los indicadores de rendimiento permiten evaluar las pérdidas de materia prima y, con ello, verificar si el proceso o la operación están llevándose a cabo de forma óptima.

Afortunadamente, existen muchas posibilidades disponibles para reducir las pérdidas de materia prima y de otros insumos en los procesos productivos (ver Capítulo 6). De todas maneras, siempre

será necesario conocer el punto de partida con el que la industria puede comparar y analizar su situación específica y buscar soluciones óptimas para la minimización de residuos.

5.7 CORRELACIONES ENTRE CONSUMOS ESPECÍFICOS Y PRODUCCIÓN

Otro método útil para detectar ineficiencias, es correlacionar el consumo específico de un insumo o grupo de insumos, con el volumen de producción. Hablar de correlación significa, dentro del contexto de esta guía, encontrar una correspondencia o relación recíproca entre las variables “consumo específico” y “producción”. Existen diversas técnicas para encontrar estas relaciones de correspondencia o correlaciones, que van desde el cálculo simple del coeficiente de correlación, pasando por métodos de regresiones simple y múltiple, hasta la determinación de funciones “consumo específico-producción”. A continuación se explica brevemente en qué consiste el método de determinación de funciones “consumo específico-producción” que es una técnica muy utilizada y útil.

A partir de datos históricos de consumos específicos y producción, se puede obtener una función genérica “consumo específico – producción”. Esta función es la siguiente:

$$C_E = C_{ER} + \frac{C_{FR}}{V_P}$$

donde:

C_E : consumo específico;
 C_{ER} : consumo específico en régimen;
 C_{FR} : consumo fuera de régimen;
 V_P : volumen de producción.

El **consumo específico** C_E , es la cantidad total de un insumo utilizado por unidad de producto producido.

El **consumo específico en régimen** C_{ER} , es el consumo específico de un insumo, que se da durante la transformación de una materia prima en producto, cuando el proceso u operación unitaria, donde se produce esta transformación, se encuentra funcionando en forma regular y permanente.

Por su parte, el **consumo fuera de régimen** C_{FR} , es la cantidad de un insumo que se ha consumido, pero que no está asociada directamente a la producción. Por ejemplo, si el insumo en cuestión es la energía, el consumo de energía fuera de régimen lo constituirá la energía que consume una máquina cuando está trabajando sin carga (por ejemplo, el motor de un molino funcionando sin carga para moler); o la energía que se usa en un horno para calentarlo al inicio de su operación o entre cargas. Igualmente la energía empleada para calentar las oficinas de gerencia de una planta, con una estufa, corresponde también a un consumo fuera de régimen.

Como se observa en la ecuación, a medida que la producción se incrementa, el consumo específico C_E se aproximará al consumo específico en régimen; mientras que el cociente C_{FR}/V_P tenderá a cero. Esto ocurre porque a diferencia del consumo en régimen, el consumo fuera de régimen no depende del volumen producido y permanece constante (aunque puede presentar variaciones) a medida que cambia el volumen de producción. Por ello, cuando aumenta la producción el cociente del consumo fuera de régimen entre el volumen de producción tiende a cero.

La función obtenida nos permite analizar que, dentro de los límites de la capacidad de producción de la planta, cuanto mayor sea el volumen de producción, menor será el consumo específico, por lo tanto, será más eficiente y la empresa podrá planificar los niveles de producción más convenientes. (Ver ejemplo en la Sección 6.2.3).

-
- ⁱ **United States Environmental Protection Agency (EPA)**, Standard Methods.
- ⁱⁱ **ONUDI – PNUMA**, Manual de Auditoría y Reducción de Emisiones y Residuos Industriales, Informe Técnico N° 7 (1994).
- ⁱⁱⁱ **Douglas M. Grant & Brian Dawson**, ISCO Open Channel Flow Measurement Handbook, Fifth Edition (1997).