

# **CENTRO NACIONAL DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA - CNPMLTA**

## **ECOBALANCES BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA**

Preparado por: I.Q Olga Lucía Tobón M.  
Directora de Proyectos – CNPMLTA  
I.Q Paula Hoyos  
Profesional de Apoyo - CNPMLTA

# Tabla de Contenido

1	INTRODUCCIÓN.....	3
2	QUÉ ES UNA HERRAMIENTA?.....	3
3	ECOBALANCES.....	4
4	BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA.....	6
4.1	BALANCE DE MATERIALES.....	8
4.1.1	Estimación de emisiones mediante balance de materiales .....	15
4.1.2	Procedimiento de balance de materiales en la industria .....	18
4.1.3	Cuantificación de las salidas.....	22
4.1.4	Presentación del balance de masa .....	25
4.2	BALANCES DE ENERGÍA.....	27
4.2.1	Energía térmica .....	27
4.2.2	Energía eléctrica.....	34
	BIBLIOGRAFIA.....	35

# ECOBALANCES, BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA

## HERRAMIENTAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA

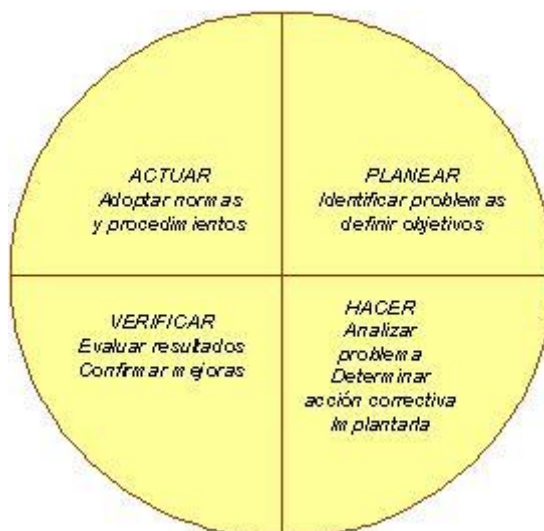
### 1 INTRODUCCIÓN

Las herramientas ambientales están involucradas dentro de las diferentes fases de la matriz PHVA, lo que hace que la recopilación de información sea usada lo más óptimamente posible al momento de implantar un sistema de producción más limpia.

Las fases que conforman la matriz PHVA son:

- En la fase "Planear", se identifican los problemas y se definen los objetivos y políticas de la empresa.
- En la fase de "Hacer" se implementa el SMA, incluyendo el desarrollo de procedimientos ambientales.
- En la fase "Revisar", se determina el desempeño de la empresa con relación a la política y los objetivos trazados.

En la fase "Mejorar", se busca que el SMA responda de manera adecuada a las circunstancias cambiantes, mejorando continuamente el desempeño ambiental.



Ciclo de Mejoramiento continuo

### 2 QUÉ ES UNA HERRAMIENTA?

Una herramienta es una técnica concreta para acceder y combinar información que nos permita tomar decisiones sobre cambios en la operación de una institución.

Para el caso de las herramientas de producción más limpia que apoyan las estrategias y sistemas ambientales de las empresas, una herramienta es un instrumento que permite definir el estado ambiental de un proceso o producto, bien sea administrativo

o productivo y con base en el análisis de estos resultados, establecer los objetivos ambientales del SMA, apoyar la implementación del mismo y verificar los resultados.

Las herramientas contribuyen y facilitan la toma de decisiones. En algunos países como Colombia, la legislación ambiental incluye la realización de estudios de impacto ambiental (EIA) para ciertas actividades que pueden afectar el medio ambiente (grandes obras de infraestructura, comercialización e importación de productos agroquímicos, el inicio de una industria, la construcción de vivienda, entre otras). Con base en el EIA, las autoridades ambientales deciden si se otorga la licencia o permiso ambiental que autorice el desarrollo de la actividad.

En el ámbito empresarial, las herramientas ambientales ayudan a planear y organizar la ejecución de las actividades encaminadas a una estrategia ambiental, a identificar, evaluar e implementar mejoras ambientales, además de evaluar los avances en la reducción de los impactos ambientales de los productos y/o procesos.

Existen diversas herramientas ambientales, las cuales pueden ser clasificadas en 3 grupos principales dependiendo de: su función, de la parte del proceso productivo que analiza, o del tipo de resultados que se establece. En algunos casos una misma herramienta puede ser clasificada en distintas categorías, debido a su versatilidad. Las herramientas más utilizadas según la función que cumplen son las siguientes:

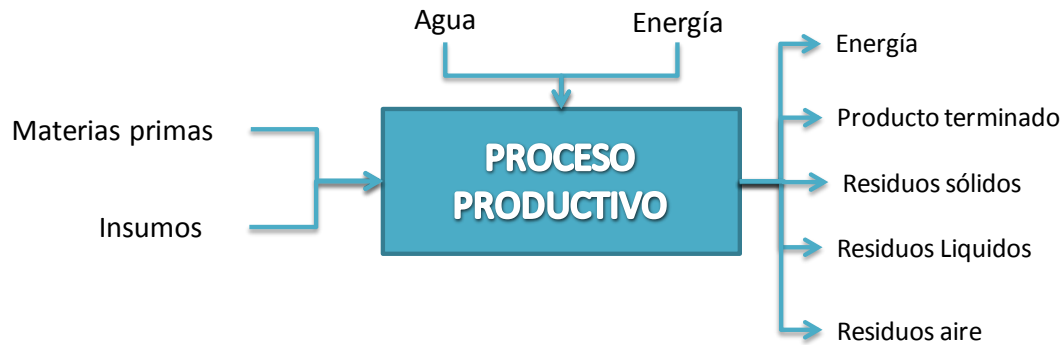
- Ecoindicadores
- Revisión ambiental ambiental
- Ecomapas
- **Ecobalances**

### 3 ECOBALANCES

La función principal de un ecobalance, es acopiar y organizar datos para evaluar estrategias de prevención de la contaminación, reducción de costos y administración ambiental y financiera y por otro lado, permite identificar las áreas del proceso productivo que requieren de intervención para mejorar el desempeño ambiental; dicha herramienta esta albergada dentro del proceso de **PLANEAR** en la matriz PHVA que busca obtener como resultado fundamental la optimización de los recursos económicos analizados no solo con bases meramente financieras, sino también teniendo en cuenta las implicaciones de tipo ambiental.

EL ecobalance es un método estructurado para reportar los flujos hacia el interior y el exterior, de recursos, materia prima, energía, productos, subproductos y residuos que ocurren en una organización en particular y durante un cierto período de tiempo.

Los tres análisis integrados constituyen el Ecobalance de una empresa u organización:



Estructura general del Eco-balance (Bart Van Hoof)

Dicho de una manera mas práctica, para el desarrollo del eco-balance, se puede tomar a la compañía como una caja negra, determinando qué es lo que entra y qué es lo que sale de la caja.

También se evalúan los efectos de disposición y consumo de productos y subproductos. Luego, se identifican y evalúan los aspectos ambientales de los materiales y la energía utilizados en el proceso productivo. Posteriormente se asignan las entradas y salidas (insumos, desechos, productos) a las distintas unidades del proceso de producción y finalmente se identifican los impactos ambientales de las actividades que no están directamente relacionadas con el proceso de producción.

Para desarrollar el eco-balance, se deben tener en cuenta los elementos mostrados en la Tabla 1.

Es importante que los datos estén justificados por sus fuentes, ya sean datos suministrados por la empresa, a través de la experiencia de los trabajadores/operadores, etiquetas de productos, informes históricos (control de calidad, administración), cuentas de energía, agua, especificaciones de máquinas, órdenes, licencias, listados de especificaciones, diseños, entre otros, o información suministrada por los proveedores, por los clientes, por los competidores, por manuales o artículos de internet o empresas consultoras en general, también es importante mirar los estudios anteriores y las estimaciones dadas por expertos.

El eco-balance nos permite entender la importancia relativa del proceso de producción de la compañía cómo parte del impacto global de la cadena de producción, mediante el estudio y análisis de todas las variables que forman parte del proceso integral de una empresa determinada y los efectos ambientales que originan.

**Tabla 1. Elementos a tener en cuenta en la elaboración de un ecobalance**

ELEMENTOS	INFORMACION NECESARIA
<b>MATERIAS PRIMAS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuales se transforman en el producto final del proceso.</li> <li>• Calcular las cantidades de materia prima.</li> <li>• Distinguir cuales materias primas tienen su destino en el producto final, y cuales se utilizan para procesos de transformación.</li> </ul>
<b>ENERGIA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Información detallada de las cantidades de los diferentes tipos de energía y sus fuentes.</li> <li>• Distinguir entre fuentes renovables (energía hidroeléctrica) y no-renovables (combustibles fósiles).</li> </ul>
<b>ADITIVOS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinar los materiales necesarios para el proceso de transformación pero no forman parte del producto final.</li> </ul>
<b>RESIDUOS SOLIDOS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Información detallada sobre cantidades y diferentes tipos de residuos sólidos. Los cuales pueden ser: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Residuos del proceso (materia prima sobrante, productos fuera de especificación, materiales que son necesarios para que el proceso funcione, como filtros, aceite)</li> <li>- Residuos de productos (productos en el fin de su vida útil), residuos de empaques (de materias primas o de componentes, y para empacar el producto),</li> <li>- Residuos diversos como el polvo que se encuentra en los filtros</li> </ul> </li> </ul>
<b>RESIDUOS LIQUIDOS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Información sobre cantidades, concentraciones y diferentes tipos de vertimientos.</li> <li>• Distinguir entre soluciones y suspensiones</li> </ul>
<b>RESIDUOS DE GASES</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Información detallada de las cantidades y tipos de emisiones</li> </ul>
<b>PRODUCTO TERMINADO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinar el producto principal del proceso de transformación, el cual puede ser producto terminado, un subproducto, un compuesto o un material refinado.</li> </ul>

#### **4 BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA**

Otra herramienta muy importante en la implementación de un sistema de PML y que ayuda a la elaboración de los balances de materia y energía es el análisis de flujos, el

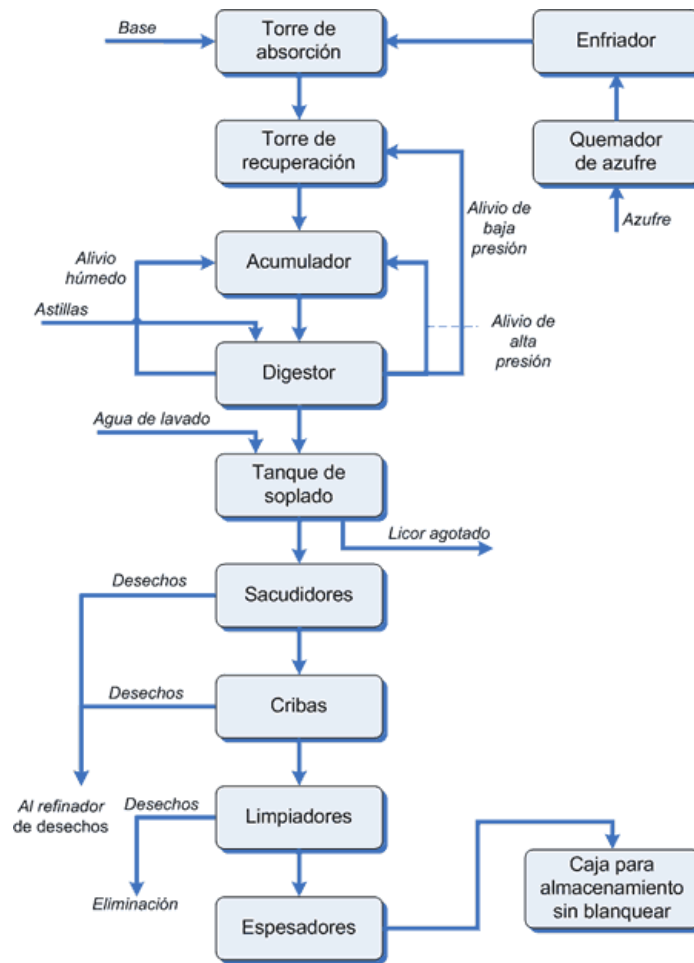
cual permite tener claridad de cada uno de los pasos que se involucran en el proceso productivo para determinar con más facilidad, bien sea, la descripción del proceso en sí o los beneficios y problemas que en este se generen.

El análisis de flujo es una herramienta de inventario usada para identificar todas las posibles fuentes de generación de desechos o consumos excesivos de materiales y energía. En algunas ocasiones se utiliza como una herramienta para identificar oportunidades de mejoramiento del proceso.

El desarrollo de los diagramas de flujo comienza a partir de la división del proceso en unidades operativas. Cada unidad operativa es un área del proceso o parte del equipo donde entra material, se da un proceso y posteriormente, sale material, posiblemente con una forma, naturaleza o composición diferente. Para cada unidad operativa se identifican las entradas, salidas y transformaciones. Cada unidad operativa se muestra como un bloque, y conectando las distintas unidades operativas se elabora el diagrama de flujo del proceso.

El diagrama de flujo completo puede ser utilizado para determinar la generación de desechos en cada unidad de producción, resultando en una lista completa de todas las fuentes de desechos.

En la siguiente figura se muestra un diagrama de flujo para la producción química de pulpa.



**Figura 1. Diagrama de flujo de producción química de pulpa**

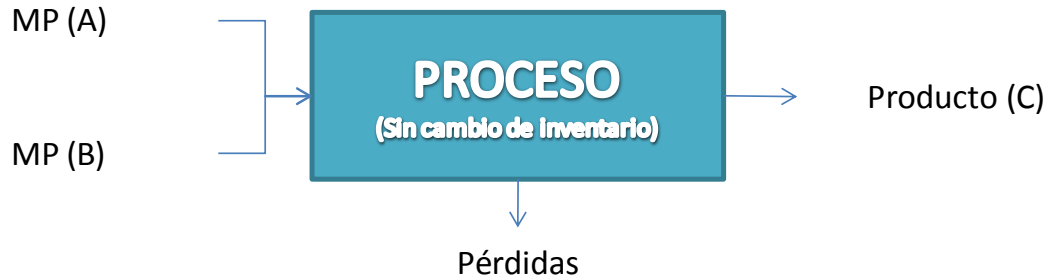
#### 4.1 BALANCE DE MATERIALES

Un balance de un proceso industrial es una contabilidad exacta de todos los materiales que entran, salen se acumulan o se agotan en el curso de un intervalo de tiempo de operación dado. Un balance de materiales de este modo es una expresión de la *ley de la conservación de la masa*. Si se hicieran medidas directas del peso y composición de cada corriente que entra y sale de un proceso en un periodo de tiempo determinado y de la variación en el inventario del material dentro del sistema en el mismo periodo de tiempo, no sería necesario realizar ningún cálculo, pero esto es poco factible en la realidad, de ahí que sea indispensable plantear algunas incógnitas.

El principio general de un balance de materiales es establecer un número de ecuaciones independientes igual al número de incógnitas de composición y masa.

Por ejemplo, a un proceso entran dos corrientes y sale otra y no se presenta ningún cambio en el inventario del sistema durante el intervalo de tiempo, la masa y la composición de cada corriente establece el balance de materia completo:





$$\text{MP (A)} + \text{MP (B)} = \text{Producto (C)} + \text{Pérdidas}$$

Para calcular un balance de materiales completo el mayor número de incógnitas permitidas es 3, elegidas entre los seis posibles términos. Las variaciones en la solución del problema dependerán de los términos desconocidos, sean de composición o de masa, bien sea de corrientes que entran o salen.

Para hacer un balance de masa se recomienda seguir las siguientes normas:

1. Si no existe reacción química, de nada sirve establecer balances de materia para los elementos químicos presentes. En tales procesos los balances deberán basarse en los compuestos químicos, mejor que en los elementos, o en los componentes de composición fija aunque no sean compuestos químicos puros.
2. Si tienen lugar reacciones químicas, los balances de materiales se deben desarrollar basados sobre elementos químicos o sobre radicales compuestos o sustancias que no se alteren descompongan o formen en el proceso.
3. Para procesos donde no tengan lugar reacciones químicas, es preferible el empleo de unidades de peso tales como gramos, kilos, toneladas. Para los procesos en que tienen lugar reacciones químicas es conveniente utilizar mol – gramo o mol – kilo o átomo-gramo o átomo – kilo.
4. El número de magnitudes desconocidas que ha de ser calculado no puede exceder el número de balances de materia independientes que se pueden plantear, de otra forma el problema es indeterminado.
5. Si el número de ecuaciones de balance de materia independientes es mayor al número de corrientes desconocidas, ha de aplicarse un criterio para determinar que ecuaciones deberán elegirse para resolver el problema, si todos los datos analíticos utilizados en el establecimiento de las ecuaciones fuesen perfectos, no importa que ecuaciones se usen, sin embargo los datos analíticos nunca están libres de error, por lo cual debe tenerse mucho cuidado al seleccionar las ecuaciones más exactas para la solución del problema. En general, las ecuaciones basadas en los componentes que forman el porcentaje mayor de la masa total, son las más seguras.
6. Es importante que se use el mayor número de ecuaciones verdaderamente independientes. Cualquier ecuación de balance de materia que pueda derivarse de otras ecuaciones escritas para el proceso no puede considerarse como una ecuación independiente más. Ver ejemplo (1)
7. Si dos o más sustancias se encuentran en proporciones fijas una respecto de otra en las corrientes que intervienen, solo puede escribirse una ecuación de

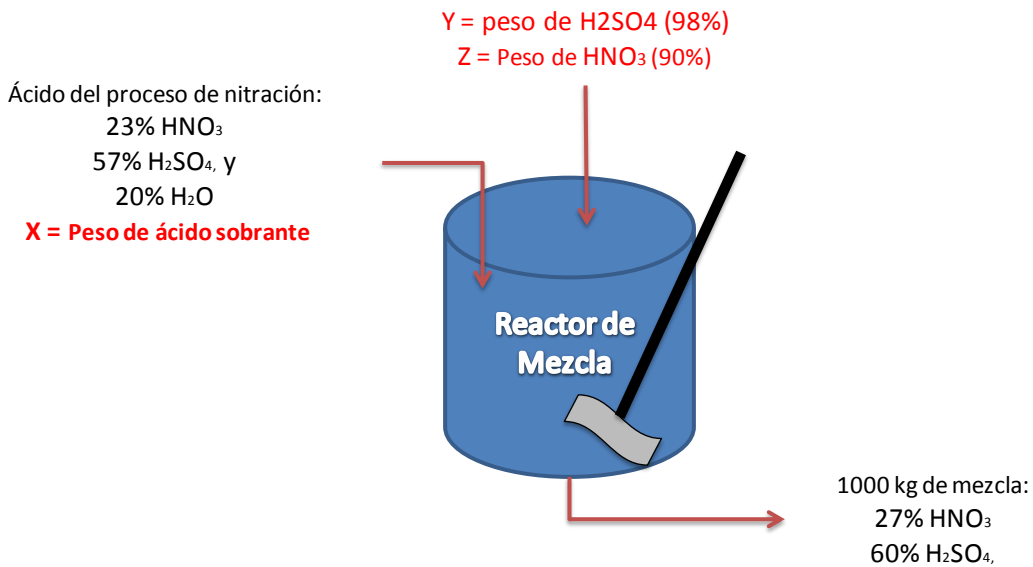
balance de materia independiente con respecto a aquellas sustancias. Aunque un balance puede escribirse para cualquier sustancia en cuestión, es mejor en general, combinar las sustancias que aparecen en proporción constante dentro de un solo grupo y establecer una sola ecuación para este grupo combinado.

- Una sustancia que aparece en una corriente que entra y otra que sale sirve como referencia para los cálculos y se denomina *sustancia de unión*, el conocimiento de los porcentajes de una sustancia de unión en dos corrientes establece la relación entre los pesos de corrientes, de forma que si uno se conoce, el otro puede calcularse.

**Ejemplo 1:**

El ácido sobrante de un proceso de nitración contiene el 23% de  $\text{HNO}_3$ , 57% de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y 20% de  $\text{H}_2\text{O}$  en peso. Este ácido se va a concentrar para que contenga 27% de  $\text{HNO}_3$  y 60% de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  mediante la adición de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado que contiene 93% de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y  $\text{HNO}_3$  concentrado que tiene 90% de  $\text{HNO}_3$ , calcular los pesos de ácido sobrante y concentrado que deben combinarse para obtener 1000 kg de la mezcla deseada.

**Solución:**



Datos del Balance				
	Entrada	Concentración (%)		
	Peso Kg	%H2SO4	%HNO3	
<b>Entrada</b>				
Peso ácido sobrante	X	57%	23%	
Peso H2SO4 conc.	Y	93%		
Peso HNO3 conc.	Z	90%		
<b>Salida</b>				
	Peso Kg	%H2SO4	%HNO3	
Peso de mezcla (1000 kg)	1000	60%	27%	
Peso H2SO4 en la mezcla	600			
Peso de HNO3 en la mezcla	270	% H2O		
<b>Peso de agua en la mezcla</b>	<b>130</b>	<b>13%</b>		
<b>Balance Total:</b>				
$X + Y + Z = 1000$ (1)		<b>Valor de Y, Kg</b>	<b>Valor de Z</b>	
<b>Balance H2SO4:</b>		389.65	193.46	
$0.57*X + 0.98*Y = 0.60*1000$ (2)				
<b>Balance HNO3:</b>				
$0.23*X + 0.90*Z = 0.27 *1000$ (3)				
De ecuación (2):		<b>Valor de X, Kg</b>		
$Y = (0.60*1000 - 0.57X)/0.98$		416.89		
De ecuación (3):				
$Z = (0.27*1000 - 0.23 X)/0.90$				
Y y Z en ecuación (1)				
$X + (600 - 0.57X)/0.93 + (270 - 0.23X)/0.90 = 1000$				
	A (600/0.93)	B (0.57/0.93)*X	C(270/0.9)	D(0.23/0.9)
$X =$	645.16	0.61	300	0.26
$X = (1000 - A - C)/(1-B-D)$				

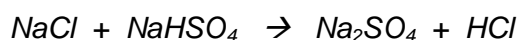
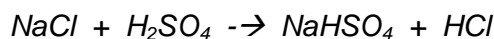
**PROCESOS QUE LLEVAN REACCIONES QUÍMICAS:** estos balances caen dentro de dos clases generales:

1. Se conocen las composiciones y pesos de las diferentes corrientes que entran al proceso. Esto es necesario para calcular las composiciones y pesos de corrientes que salen del proceso para una eficiencia de conversión de la reacción.
2. Se conocen parcialmente las composiciones y pesos de las corrientes que entran. Es necesario calcular las composiciones y pesos de todas las corrientes que entran y salen y determinar la eficiencia de la reacción.

En estos casos se recomienda trabajar con unidades molares para los componentes que se transforman químicamente, en es caso hay que definir el reactivo límite. La cantidad de cada material que reacciona puede calcularse en función del porcentaje en exceso que se obtiene del teóricamente necesario. El cálculo se completa con base en el reactivo límite que hay presente por unidad de cantidad de reactivos, la cantidad de los productos se obtiene de la reacción.

### **Ejemplo 2:**

*Las reacciones que se dan en la fabricación de HCl (ácido clorhídrico) a partir de sal y ácido sulfúrico son las siguientes:*



En la práctica la sal se trata con ácido sulfúrico acuoso que contiene 75% de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , en ligero exceso de la cantidad necesaria para combinar toda la sal y formar  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Aunque la primera reacción tiene lugar fácilmente, para la siguiente es necesario un calentamiento fuerte. En ambas fases del proceso se desprenden ácido clorhídrico y vapor de agua de la masa de reacción.

La "torta de sal obtenida en este proceso tiene la siguiente composición":

COMPUESTO	PORCENTAJE (%)
$\text{Na}_2\text{SO}_4$	91.48
$\text{NaHSO}_4$	4.79
$\text{NaCl}$	1.98
$\text{H}_2\text{O}$	1.35
$\text{HCl}$	0.40

La sal común en el proceso esta seca y puede suponerse que el 100% es  $\text{NaCl}$ .

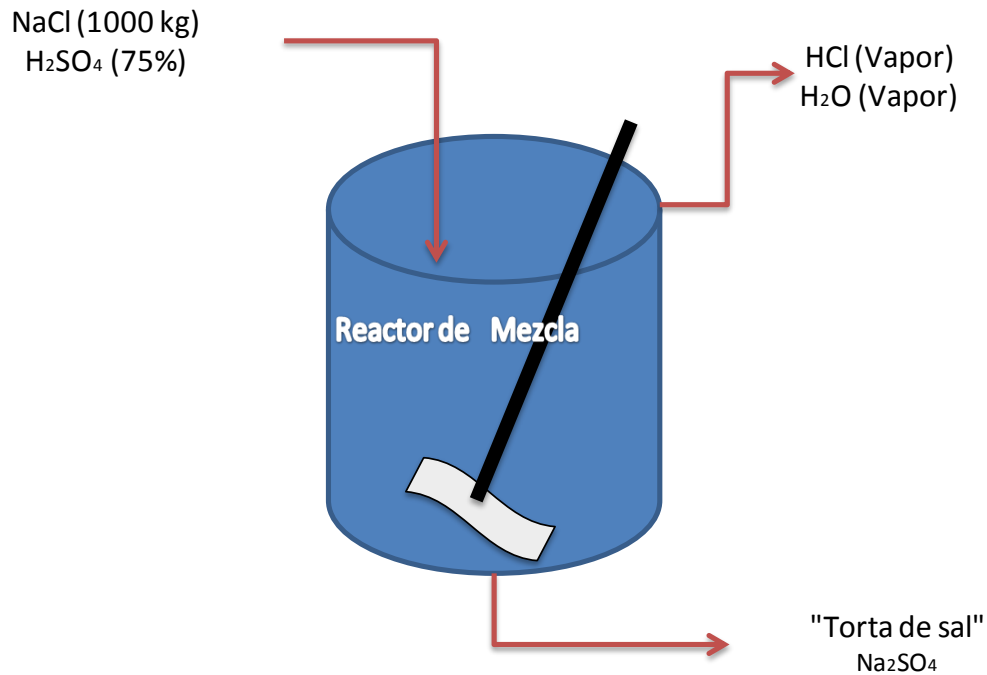
- Calcular el grado de conversión de la primera reacción y el grado de conversión en la transformación de la sal a  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .
- Sobre la base de 1000 kg de sal que entra al proceso, calcular el peso de ácido añadido, el peso de "torta de sal" formada y el peso y la composición de los gases extraídos.

**Solución:**

La base de cálculo es 1000 kg, así lo pide el problema.

La solución del numeral b) se resuelve con una serie de balances de materia. Para este caso el sodio (Na) sirve como sustancia de enlace entre la torta de sal y la sal cargada y el azufre (S) como sustancia de enlace entre la torta de sal y la solución ácida. El problema se resuelve por las siguientes etapas sucesivas:

- El balance de sodio permite obtener el peso de la "torta de sal".
- El balance de azufre sirve para obtener el peso de la disolución ácida utilizada
- El balance de cloro sirve para obtener el peso de ácido clorhídrico (HCl) extraído en los gases
- Un balance de agua determina el peso en los gases extraídos.



**Cálculos preliminares:**

Base de cálculo kg de NaCl 1000 kg  
Base de cálculo kg de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (75%) 0.75 kg

Elemento	Peso atomico, kg	Compuesto	Peso Molecular kg/mol	Mol - kg
Sodio (Na)	22.78	NaCl	58.23	17.17
Azufre (S)	32.06	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	141.62	
Cloro	35.45	NaHSO <sub>4</sub>	119.84	
Oxígeno	16	H <sub>2</sub> O	18	
Hidrógeno	1	HCl	36.45	
		H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	98.06	0.0076

Base de cálculo de "Torta de Sal" 1 kg

COMPUESTO	PORCENTAJE	kg	Mol - kg	At-kg Na	At-kg S	At-kg Cl
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	91.48%	0.9148	0.00646	0.012919	0.00646	
NaHSO <sub>4</sub>	4.79%	0.0479	0.00040	0.000400	0.00040	
NaCl	1.98%	0.0198	0.00034	0.000340		0.00034
H <sub>2</sub> O	1.35%	0.0135	0.00075			
HCl	0.40%	0.004	0.00011			0.00011
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>1</b>		<b>0.01366</b>	<b>0.00686</b>	<b>0.00045</b>

El porcentaje de conversión de la primera reacción se calcula con base en la "torta de sal", como en el producto no hay nada de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, la primera reacción tiende a completarse:

Na total presente	0.013659
Na en Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.012919
Conv. NaCl a Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	94.58%

**Balance de sodio:** permite obtener el peso de la torta de sal,

Na en 1000 kg de sal	17.17
Na en 1 kg de Torta	0.01366
Peso de la torta de sal, Kg	1257.3

**Balance de azufre:** determinar el peso de la solución ácida

S en la torta de sal	8.12
S en 1 kg de solución ácida	0.00765
Peso de la torta de sal, Kg	1061.9

**Balance de agua:** determinar el peso de agua en el gas producido

Agua en solución ácida (25%)	314.33
Agua en la torta de sal	16.97
Peso de agua extraída (V)	297.4

**Balance de cloro:** determinar peso de ácido clorhídrico en el gas

Cloro en la sal de entrada	17.17
Cloro en la torta de sal	0.57
Cloro extraído	16.61
HCl en los gases (kg)	605.4

**Composición de los gases que salen:**

	Kg	%
HCl	605.35	67%
Agua	297.35	33%
Total	902.7	

**Balance total:** Verificar exactitud de los cálculos

<b>Balance Total</b>	
<b>Peso total de entrada</b>	2131.21
<b>Peso de productos</b>	2164.77
<b>%Error</b>	2%

#### **4.1.1 Estimación de emisiones mediante balance de materiales**

El balance de materiales es un método utilizado para estimar las emisiones de algunas fuentes, en donde se conoce el volumen y la composición química de los insumos o materias primas utilizadas.

El método de balance de materiales puede usarse en los casos en que no hay datos disponibles de muestreos en la fuente o factores de emisión aplicables.

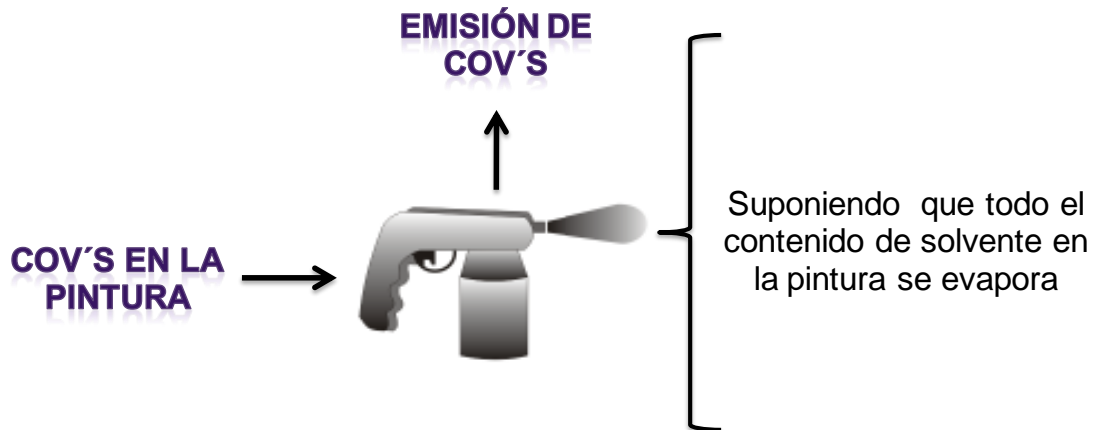
De hecho, para algunas fuentes, un balance de materiales es el único método práctico para estimar las emisiones con exactitud. Por ejemplo, en muchos casos, el muestreo en la fuente de emisiones de COVs, intermitentes o fugitivas puede ser muy difícil y costoso, por lo que es recomendable aplicar técnicas de estimación de emisiones a partir del balance de materiales.

El uso de un balance de materiales implica el análisis de un proceso para determinar si las emisiones pueden ser estimadas conociendo únicamente los parámetros específicos de operación y la composición de los materiales. Si bien el balance de materiales es una herramienta valiosa para estimar las emisiones de muchas fuentes, su aplicación requiere que se conozca cierta información sobre el material estudiado en cada punto a lo largo del proceso.

El uso del balance de materiales es muy adecuado en los casos en que pueden conocerse los componentes del proceso, excepto de las emisiones al aire. Si no se cuenta con esta información, deben hacerse suposiciones, lo que puede generar serios errores.

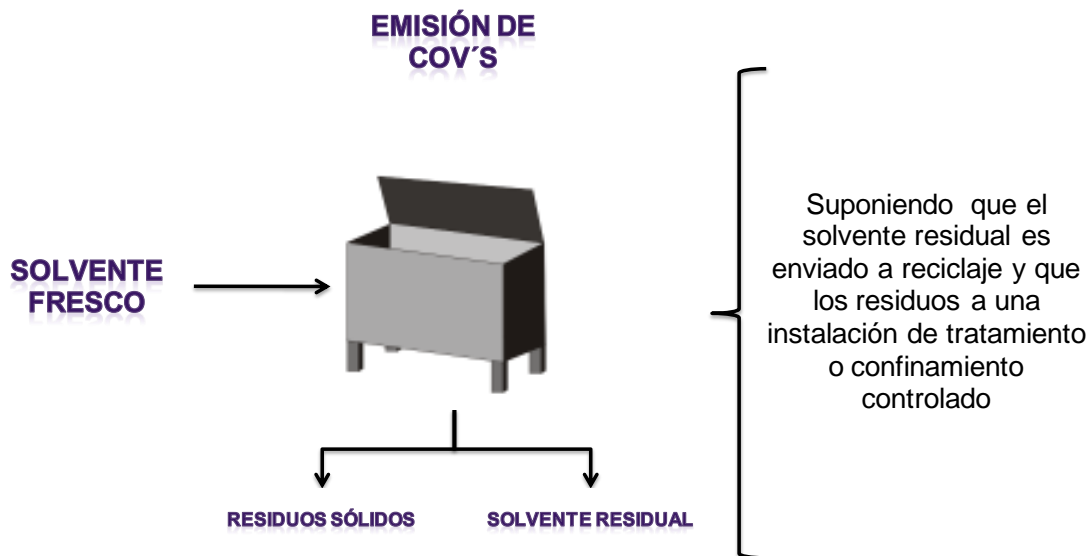
#### **Ejemplo: Cálculo de emisiones de COV's, (Compuestos orgánicos volátiles)**

Es razonable suponer que durante muchas operaciones de pintura de superficies todo el solvente en la pintura se evapora a la atmósfera durante el proceso de secado. En este caso, las emisiones simplemente son iguales a la cantidad de solvente aplicado en la pintura (y en los adelgazadores añadidos) como una función del tiempo:



**Cálculo de la emisión de solventes en proceso de pintura con pistola**

Otro caso de estimación de COV's es el uso de solventes para lavado de ropa en seco, tal como se realiza en las tintorerías. Para estimar las emisiones de este tipo de procesos, sólo se requiere conocer la cantidad de solvente adquirido en cada tintorería durante el intervalo de tiempo de interés, porque se supone que las emisiones son iguales a la cantidad de solvente comprado:



**Cálculo de la emisión de solventes en proceso de lavado con solventes**

En procesos donde se maneja una cantidad semifija de solvente, donde el solvente que se gasta es reemplazado cada determinado periodo o cada vez que es necesario, puede suponerse que el solvente gastado es equivalente a las emisiones. La suposición de que el solvente de reemplazo es igual a las emisiones por evaporación también es útil en los casos que el cálculo sea complicado. Por ejemplo cuando se emplea un equipo de control de emisiones no destructivo como un condensador o un absorbedor, esta suposición es válida en la medida que el solvente capturado sea regresado al proceso. De manera similar, esta suposición será aplicable si en La planta se practica la recuperación de solvente residual ya sea por destilación o por reducción o secado. Ambas prácticas reducen los requerimientos de solvente de

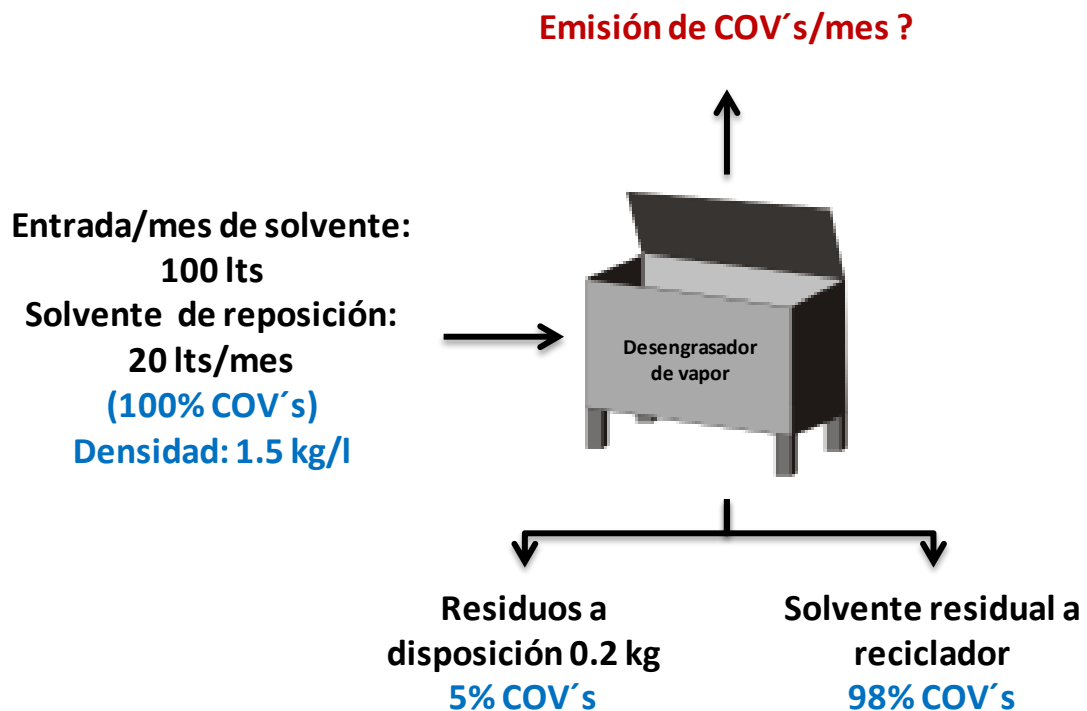


reemplazo en el proceso y, por lo tanto, la cantidad de solvente que se convierte en emisiones fugitivas y que se pierde hacia la atmósfera.

**Ejemplo:**

Calcular las emisiones mensuales de COVs de un desengrasador de vapor. Cada mes, se añaden 100 litros de solvente al inicio del mes. A principios de mes, se añaden otros 20 litros para rellenar las pérdidas. A fin de mes, se envían 100 litros de solvente residual a un reciclador y 0.2 kg de residuos sólidos son recolectados para disposición. El solvente es 100% COVs. El solvente residual es 98% COVs. El residuo sólido es 5% COVs. La densidad del solvente es de 1.5 kg/litro.

**Solución:** Período del balance 1 mes.



$$Q_{\text{solvente de entrada}} = (100 \text{ lts/mes} + 20 \text{ lts/mes}) * 1.5 \text{ kg/l}$$

$$= 180 \text{ kg/mes}$$

$$Q_{\text{residual - salida}} = (100 \text{ lts/mes} * 1.5 \text{ kg/l} * 98\% \text{ VOC}) + (0.2 \text{ kg/mes} * 5\% \text{ VOC})$$

$$= 147 \text{ kg} + 0.01 \text{ kg/mes}$$

$$= 147 \text{ kg}$$

$$\text{Emisiones COV's} = Q_{\text{solvente de entrada}} - Q_{\text{residual - salida}}$$

**Emisiones COV's = 33 kg/mes**

**Ejemplo: Cálculo de emisiones de por combustión de hidrocarburos**

Al igual que con los COV's, el análisis de un combustible puede usarse para predecir las emisiones de procesos de combustión, con base en la aplicación de las leyes de conservación de la materia. La presencia de ciertos elementos en los combustibles

puede usarse para predecir su presencia en las corrientes de emisión. Esto incluye elementos tóxicos tales como los metales que se encuentran en el carbón, así como el azufre que puede ser convertido en otros compuestos durante el proceso de combustión. La ecuación básica que se usa en los cálculos de emisiones a partir del análisis del combustible es:

$$E = Q_{\text{COMBUSTIÓN}} \times CCC \times M W_{\text{CE}} / M W_{\text{CC}}$$

Donde:

$Q_{\text{COMBUSTIÓN}}$  = Consumo de combustible, flujo másico (p.ej., kg/hr)

$CCC$  = Concentración del contaminante en el combustible

$M W_{\text{CE}}$  = Peso molecular del contaminante emitido (lb/lb-mole)

$M W_{\text{CC}}$  = Peso molecular del contaminante en el combustible (lb/lb-mole)

Por ejemplo, las emisiones de  $\text{SO}_2$  como producto de la quema de combustóleo pueden calcularse basándose en su contenido de azufre. De esta manera, se supone una conversión completa del azufre a  $\text{SO}_2$ . Por lo tanto, por cada libra de azufre ( $PM=32$  g) quemado se emiten dos libras de  $\text{SO}_2$  ( $PM= 64$ g).

**Ejemplo:**

Calcular las emisiones de  $\text{SO}_x$  por hora (reportado como  $\text{SO}_2$ ) de una máquina de combustión interna que quema diesel, con base en los datos del análisis del combustible (el contenido de azufre). El consumo estimado de combustible es de 150 litros/hr. La densidad del diesel es de 0.85kg/litro (7.1 lb/gal). El contenido de azufre en el diesel es 0.05% en masa.

$$\begin{aligned} Q_{\text{COMBUSTIÓN}} &= 150 \text{ litros/hr} \times 0.85 \text{ kg/litro} \\ &= 127.5 \text{ kg/hr} \end{aligned}$$

$$CCC_{\text{AZUFRE}} = 0.05/100 = 0.0005$$

$$\begin{aligned} E_{\text{SO}_2} &= Q_{\text{COMBUSTIÓN}} \times CCC_{\text{AZUFRE}} \times (M W_{\text{SO}_2} / M W_{\text{S}}) \\ &= 127.5 \times 0.0005 \times (64/32) \\ &= 0.13 \text{ kg/hr} \end{aligned}$$

**4.1.2 Procedimiento de balance de materiales en la industria**

Todos los insumos que entran a un proceso u operación, salen como productos y como residuos. 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. A menudo no es posible identificar todas las salidas, por lo que se incluye una diferencia de masas “no identificada”.

En el balance de masa la suma de todo lo que entra a un proceso u operación debe ser igual a la suma de todas las masas:

$$M_E = M_{i1} + M_{i2} + \dots + M_{in}$$

$$M_S = M_P + M_R + M_N$$

Balance de masa:  $M_E = M_S$

*Donde:*

*M: Masa, i1...in: insumos, E: entrada, S: salida, R: residuo, P: producto, N: no identificado*

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

Si bien el balance de masa incluye agua, a menudo es conveniente realizar un balance sólo para agua, a fin de mostrar detalles que normalmente no se incluyen en un balance global. El balance de energía normalmente no se incluye en el balance de masa, y se lo realiza por separado.

Para hacer el balance de masa, se requiere de toda la información asociada al manejo de los datos de entradas y salidas, incluyendo parámetros de operación, así como de información existente a nivel de la administración.

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:

$$\text{Entradas} + \text{Masa residente inicial} = \text{Salidas} + \text{Masa residente final} + \text{Pérdidas no identificadas}$$



**Principio de entradas y salidas de una operación unitaria**

#### 4.1.2.1 Cuantificación de las entradas

Los insumos de entrada a un proceso u operación unitaria pueden incluir, además de materias primas, materiales reciclados, productos químicos, agua, aire y otros posibles insumos, los cuales deben ser cuantificados.

### **Fuentes de información:**

**Consumo de insumos (principalmente de materias primas):** registros (inventarios) de adquisiciones y compras, Un registro de almacén es muy útil, allí se registran las compras de material y sus usos. La determinación cuantitativa de las entradas netas de insumos al proceso u operación unitaria, requiere que se haga un control de las pérdidas previas en almacenamiento y por transferencia y manipuleo (incluye pérdidas por evaporación, fugas, goteos de tanques, etc.), y puede tener como base un registro global de compras de insumos y pérdidas, y que pueden ser cuantificados, por ejemplo, en un registro como el que se ilustra a continuación:

Operación unitaria	Materia prima 1 (Kg ó t/periodo)	Materia prima 1 (Kg ó t/periodo)	---	Material reciclado	Agua (m3/periodo)	Energía eléctrica (KWh/periodo)	Combustibles (m3 de gas ó litros de diesel etc. /periodo)
Operación unitaria 1							
Operación unitaria 2							
Pérdidas en almacén y otras no identificadas							
<b>Total</b>							

Una vez que se tenga un control de las entradas netas de insumos al proceso y a cada operación unitaria, se debe determinar el consumo específico de cada insumo; es decir, la cantidad de insumo utilizado por unidad producida o por unidad de alguna materia prima utilizada como referencia. Es importante que se utilice una misma unidad de referencia para todos los insumos. Si no se dispone de información precisa sobre los consumos específicos, se debe adoptar medidas para poder determinarlas. Las mediciones deben hacerse durante un intervalo de tiempo apropiado, para que las cifras sean confiables y puedan extrapolarse en el tiempo, esto con el fin de computar valores mensuales o anuales.

**Nota:** En el balance se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- 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. Los consumos específicos de todos estos usos deben también cuantificarse como parte de las entradas.
- Algunas operaciones unitarias pueden 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, éste amerita un balance de energía específico para todo el proceso y para cada operación unitaria. Los datos sobre consumos específicos de entrada deben mostrarse en el diagrama de flujo del proceso y de cada operación unitaria, a partir de datos registrados en forma tabular.

### **Registro de los consumos de agua:**

El agua es un insumo que se usa como materia prima y como un medio para diversos tipos de uso. El uso general del agua (lavado, enjuague, limpieza y otros), normalmente representa una buena oportunidad para optimizar y reducir su consumo específico, frecuentemente mediante prácticas y medidas sencillas que, en la mayoría de los casos, conllevan ahorros económicos significativos.

### **Registro consumos de agua**

Fecha	No. De medidor	Consumo desde la última factura	Observaciones	Responsable
1. Enero				
2. Enero				
Mes: Enero			Producción mensual	

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 su consumo específico en cada operación unitaria. Dicho método puede basarse en la evaluación o en un estimado de las cantidades 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 con qué frecuencia 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 de volumen conocido y un cronómetro;
- Superficie para coleccionar agua de lluvia y nivel pluvial por año.

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

En la práctica, se pueden 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, incluyendo la intermitencia de dicho uso cuando corresponda, a fin de estimar el consumo. Para esto, se puede utilizar el siguiente registro:

#### **Medición del caudal y consumo de agua en cada proceso u operación unitaria**

Proceso u Operación unitaria	Tiempo de llenado del balde ( T ) [min, s]	Volumen del balde ( V ) [litros]	Caudal ( C ) =V/T [litros por minuto]	Duración del uso por día o por lote de producción (D) [minutos]	Consumo total por día o por lote = C x D [litros]	Observaciones
Operación unitaria 1						
Manguera 1						
Reservorio 1						
Maquinaria 1						
Total Op unitaria 1						
Total						

En base a esta información, se debe preparar un resumen del consumo de agua en cada operación unitaria, por día o por año, y desglosado por tipo de uso. Esta información puede registrarse en un registro similar al siguiente:

## Resumen del consumo de agua en cada operación unitaria, desglosado por tipo de uso

Operación unitaria (OU)	Insumo usado en el proceso u operación [m3/día] o [m3/año]	Vapor [m3/día] o [m3/año]	Uso doméstico (baños etc.) [m3/día] o [m3/año]	Otros [m3/día] o [m3/año]	Consumo total por operación o por sección de la planta [m3]
Operación unitaria 1					
Manguera 1					
Reservorio 1					
Maquinaria 1					
Total Op unitaria 1					
Total					

### 4.1.3 Cuantificación de las salidas

#### 4.1.3.1 Cuantificación de productos y residuos:

La cuantificación de masas correspondientes 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 del local 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. Se propone diligenciar el siguiente registro:

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
Operación unitaria 1								
Manguera 1								
Reservorio 1								
Maquinaria 1								
Total Op unitaria 1								
Total								

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

#### 4.1.3.2 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, muestreados y analizados. Para hacer un estudio de aguas residuales se sugiere el siguiente procedimiento:

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

- Conociendo el sistema de drenaje, se puede diseñar un programa apropiado de muestreo y 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 la mezcla con aguas de lluvia.
- Medir el caudal de los flujos intermitentes o pequeños de aguas residuales. Para ello, puede emplearse un cronómetro y una cubeta o balde, que permita recolectar la integridad del flujo en un tiempo determinado. Los caudales grandes ó continuos pueden evaluarse empleando técnicas tales como la de la placa de orificios o la del vertedero rectangular.

Las aguas residuales deben ser analizadas para determinar la concentración de materia en suspensión y disuelta. Se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- Incluir en el análisis parámetros tales como pH, DQO, DBO5, sólidos suspendidos (SS), aceites y grasas.
- Especificar otros parámetros químicos a analizar, dependiendo de las entradas de insumos. Por ejemplo, para empresas que trabajan con metales pesados, éstos son parámetros importantes.
- Seguir los procedimientos recomendados para la caracterización de efluentes industriales, los cuales son diferentes, dependiendo de si el proceso es en tandas o es proceso continuo.

Para optimizar el número de muestras y análisis, se deben identificar los procesos relevantes en cuanto a consumo de agua y uso de materias primas, por ejemplo si el agua es de enfriamiento y no ha entrado en contacto con material soluble es de esperar que la calidad sea similar a la de salida.

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 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, el peso de salida tenga que 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 de la siguiente manera:

### Aguas residuales – Caudales y concentraciones para cada operación unitaria (OU)

Origen de las aguas residuales	Descarga [m3/día] o [l/h]	Concentración parámetro 1 [mg/l]	Concentración parámetro 2 [mg/l]	Concentración parámetro 3 [mg/l]	Destino: Alcantarillado, reciclaje u otro
OU1					
OU1					
.....					
<b>Total</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 parámetro 1 por unidad de producción [mg/ unidad de producción]	Cantidad parámetro 2 por unidad de producción [mg/ unidad de producción]	Cantidad parámetro 3 por unidad de producción [mg/ unidad de producción]	Destino: Alcantarillado, reciclaje u otro
OU1					
OU1					
.....					
<b>Total</b>					

#### 4.1.3.3 Cuantificación de emisiones gaseosas

Para elaborar un balance de masa lo más exacto posible, se requiere cuantificar los efluentes gaseosos asociados al proceso o a cada operación unitaria, ver modelo de cálculo en los numerales 4.2.1 y 4.2.2.

#### 4.1.3.4 Cuantificación de residuos sólidos o semisólidos

Muchos procesos producen residuos que no pueden ser tratados en la planta, por lo que necesitan transportarse fuera de la planta 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 las plantas, son muy costosos, por lo tanto, la minimización de residuos significará ahorros económicos. Para el registro corriente de disposición de residuos sólidos, se puede aplicar el siguiente formato:

#### Registro de datos para residuos sólidos

Fecha	Cantidad [en barriles, m3 o toneladas]	Tipo u origen del residuo	Destino	Observaciones	Responsable
1 de Enero					
2 de Enero					
<b>Mes: Enero</b>			Producción mes de enero		

El control puede facilitarse midiendo el volumen y peso de la basura recolectada en barriles, durante un día o semana normal de trabajo. Al final, se debe llenar un registro como el siguiente:



## Resumen de la generación de residuos de diferentes operaciones y su disposición

Origen	Descripción	Cantidad [t/año; m3/año o t/producto]	Servicio / Destino	Costos / Ingresos [US\$/año o US\$/producto]
<b>Total</b>				

### 4.1.4 Presentación del balance de masa

Dependiendo del tamaño de la planta se puede presentar un balance de todo el proceso o hacer uno para cada operación unitaria, en cualquiera de los dos casos se debe contar con información elaborada para cada operación unitaria y para el proceso global, la presentación del balance de masa dependerá de la exactitud con la que se hicieron los cálculos de las entradas y de las salidas.

Para el seguimiento y evaluación de la planta, se deben estandarizar las unidades de medición (litros, kilogramos o toneladas); 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 deben 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 la siguiente manera:

**Forma de presentar el balance de masa de cada operación unitaria o del proceso global**

<b>OPERACIÓN UNITARIA 1 ó PROCESO GLOBAL</b>	
<b>Entradas</b>	<b>Kg ó L ó Ton.</b>
Materia Prima 1	
Materia Prima 2	
Materia Prima 3	
Reuso/Reciclaje de Residuos	
Agua	
<b>Total Entradas:</b>	
<b>Salidas</b>	<b>Kg ó L ó Ton.</b>
Productos	
Subproductos	
Pérdidas de materia prima medidas durante almacenamiento y manejo	
Residuos reusados/reciclados o transportados fuera de la planta para recuperación	
Aguas residuales	
Emisiones gaseosas	
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	
<b>Total Salidas</b>	
<b>Masas no identificadas: Entradas - Salidas</b>	

El balance de masa se elabora normalmente usando unidades de peso, ya que la magnitud de los volúmenes cambia con la temperatura. La conversión de unidades de

volumen a unidades de peso, se hace con una tabla de densidades, para líquidos y gases, en función de la temperatura.

Una vez concluido el balance de masa global y/o de cada operación unitaria, vale la pena repetir el procedimiento con respecto a cada residuo de interés. Es también importante efectuar un balance de agua para todas las entradas y salidas de agua hacia y desde las operaciones unitarias, porque las diferencias entre las entradas y salidas, son un indicio importante de que ocurren pérdidas, tales como fugas e incluso goteras.

## 4.2 BALANCES DE ENERGÍA

La energía representa un insumo importante en la industria en general y el gasto que representa puede influir, dependiendo del tipo de industria, de manera significativa en la estructura de costos de la empresa. Asimismo, existen interesantes oportunidades para ahorrar energía con beneficios económicos y ambientales.

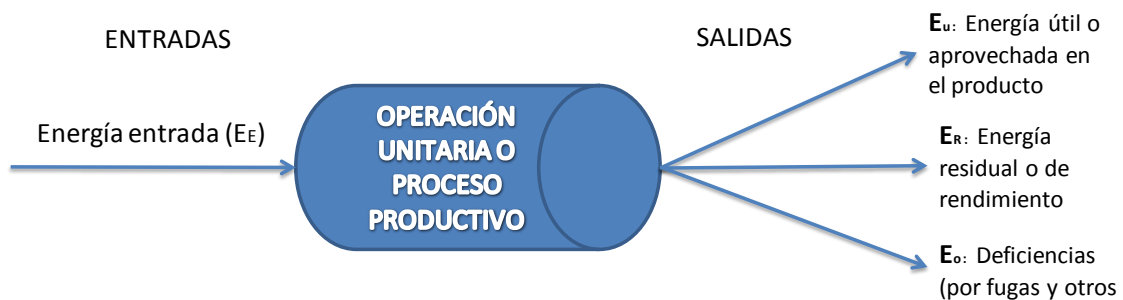
Siguiendo el método que se explicó en detalle para obtener el balance de masa, se puede elaborar un balance de energía en cada operación unitaria o proceso donde interviene la energía, en una de sus dos formas; eléctrica o térmica.

La energía térmica utilizada proviene del proceso de combustión de uno o más combustibles. Por lo general, se la utiliza para la producción de vapor, el cual es usado a través de intercambiadores de calor o de manera directa.

La energía eléctrica es utilizada, por lo general, en las diferentes operaciones unitarias, para impulsar motores eléctricos de los equipos y producir movimiento mecánico, en la iluminación.

### 4.2.1 Energía térmica

En la Figura 2 se muestra el diagrama que representa las entradas y salidas de energía que se dan en un proceso o en una operación unitaria.



**Figura 2. Entradas y salidas de energía en un proceso o en una operación unitaria**

De manera general el balance de energía se puede expresar mediante las siguientes relaciones:

Energía de entrada EE:	Energía de salida ES:	Balance de Energía:
$E_E =$ Suma de todas las energías de entrada	$E_S = E_U + E_P$ $E_P = E_D + E_R$ $E_S = E_U + E_P + E_R$	$E_E = E_S$
Significado de los subíndices:		
E: Entrada o energía Total suministrada	S = salida	U: energía útil o aprovechada en proceso
P: Energía perdida o no aprovechada	D: Deficiencias o fugas	R: Residual o de rendimiento termodinámico

Además, se define la energía neta ( $E_{NETA}$ ) como la energía efectivamente disponible; es decir, la energía de entrada ( $E_E$ ) menos la energía residual de salida ( $E_R$ ), la cual 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 la chimenea; la energía residual no incluye la energía que se pierde por fugas u otras ineficiencias operativas, ni el exceso de energía que se pierde con dichos gases residuales, por ejemplo, por mala combustión):

$$E_{NETA} = E_E - E_R$$

Igualmente, la  $E_{NETA}$  es igual a la Energía Útil o aprovechada por el producto ( $E_U$ ) + las deficiencias de energía (fugas y otros) ( $E_D$ ):

$$E_{NETA} = E_U + E_D.$$

Por otra parte el rendimiento termodinámico de una máquina ( $R_\eta$ ) se define como la razón entre la energía neta ( $E_{Neta}$ ) y la energía total de entrada ( $E_E$ ):

$$R_\eta = E_{NETA} / E_E = (E_E - E_R) / E_E = 1 - E_R / E_E$$

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.

Otro concepto, distinto al del rendimiento termodinámico, es la eficiencia térmica de un proceso o de una operación unitaria,  $E_\xi$ , la cual se define como la razón entre la energía útil ( $E_U$ ) y la energía neta o disponible ( $E_{NETA}$ ):

$$E_\xi = E_U / E_{NETA} = E_U / (E_U + E_D)$$

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

Finalmente, el rendimiento energético total ( $R_T$ ) se define como el producto del rendimiento termodinámico de la máquina ( $R_\eta$ ) y la eficiencia térmica del proceso o de la operación unitaria ( $E_\xi$ ):

$$R_T = R_\eta \times E_\xi = (E_{NETA} / E_E) \times (E_U / E_{NETA}) = E_U / E_E$$

La ecuación anterior indica que el rendimiento energético total es la relación entre la energía útil y la energía de entrada.

#### 4.2.1.1 Cuantificación de la energía térmica de entrada

Para cuantificar la energía térmica de entrada, se debe primero registrar el consumo específico (es decir, la cantidad de energía por unidad de producción) o, en su defecto, la cantidad de todos los combustibles utilizados en el proceso o en la operación

unitaria. A continuación, se ilustra un protocolo que puede ser utilizado para el registro de datos. Registro de datos de las entradas de energía por unidad de producción (UP).

Operación Unitaria	Combustible 1 [m <sup>3</sup> ó mpc, kg ó t / UP]	Combustible 2 [m <sup>3</sup> ó mpc, kg ó t / UP]	Combustible 2 [m <sup>3</sup> ó mpc, kg ó t / UP]
Operación unitaria 1			
Operación unitaria 2			
Pérdidas en almacén no identificadas			
<b>TOTAL</b>			
Equivalente energético (kcal, MJ o Btu)			

Para la determinación cuantitativa de las entradas de combustibles al proceso, se puede tener como base un registro global de compras de combustibles, tomando en cuenta las pérdidas en almacenamiento, especialmente por evaporación y/o fugas en las tuberías.

Una vez determinadas las entradas netas de combustibles al proceso u operación unitaria, se debe convertir la cantidad total de combustible (kg, L, m<sup>3</sup>, mpc) en su equivalente energético (kcal, MJ o Btu). Para ello es necesario conocer el poder calorífico del combustible empleado.

En la práctica, el cómputo de  $E_E$  puede realizarse identificando sólo las operaciones donde se usa energía en cantidades significativas (generalmente en el calentamiento de agua, procesos de planchado y secado, etc.). Si no se dispone de información precisa sobre el consumo específico para las operaciones individuales, se debe aplicar algún método para determinar 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.

#### Poder calorífico de combustibles en Kcal

Combustible	Poder Calorífico
Gas Natural (GN)	263,352 kcal/mpc
Gas Licuado de Petróleo (GLP)	11,813 kcal/kg.
Diesel	10,920 kcal/kg.

#### 4.2.1.2 Cuantificación de la energía térmica de salida.

Para el cálculo de la energía térmica de salida se toma en cuenta:

- 1) **Energía Útil ( $E_U$ ):** corresponde estrictamente a la energía que consume el proceso u operación para transformar la materia prima en producto.
- 2) **Pérdidas de energía ( $E_p$ ):** corresponde al total de la energía no aprovechada

La energía no aprovechada tiene dos componentes:

- 1) Energía que se pierde debido al rendimiento propio de la máquina ( $E_R$ )
- 2) Energía que se pierde por radiación, transmisión y convección ( $E_D$ ), atribuible a fugas de materia conteniendo energía, deficiencias en el aislamiento, mala combustión

Para el cómputo de  $E_S$  en una operación unitaria o proceso, normalmente se requiere efectuar mediciones experimentales. Por ejemplo, para calcular  $E_S$  en el caso del calentamiento de agua con vapor, se debe medir el volumen y la temperatura del agua iniciales y finales, así como la cantidad de vapor utilizado en la operación. En otros casos, como en secadoras, planchadoras, etc., se pueden utilizar datos nominales del equipo correspondiente, como el rendimiento y consumo nominal de energía del equipo.

#### Registro de las energías de salida por unidad de producción (UP)\*

Operación Unitaria	Energía útil (EU) [cantidad / UP]	Energía residual (ER) [cantidad / UP]	Pérdidas de energía por deficiencias (ED) [cantidad / UP]
Operación unitaria 1			
Operación unitaria 2			
<b>Total</b>			

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

En algunas situaciones, es complicado estimar las pérdidas por deficiencias ( $E_D$ ). En estos casos, se suele computar  $E_D$  por diferencia entre la energía total de entrada,  $E_E$ , y la suma de las energías útil,  $E_U$ , y residual,  $E_R$ :

$$E_D = E_E - (E_U + E_R)$$

El riesgo de estimar las pérdidas de energía mediante este cálculo, es que cualquier valor de  $E_U$  o de  $E_R$  no calculado correctamente, queda registrado, por defecto o por exceso, como parte del valor de  $E_D$ . 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 al uso innecesario de un exceso de combustible, o a una mala transferencia de calor por falta de limpieza y mantenimiento del intercambiador de calor.

#### 4.2.1.3 Procedimientos para realizar el balance de energía térmica

Los principales usos en la industria de la energía térmica son el calentamiento y el enfriamiento de agua y la producción de vapor, así como el uso del vapor bien sea

directo o en intercambiador para calentamiento en procesos que requieren temperatura.

A continuación se describe detalladamente el balance de energía térmica en la operación unitaria de calentamiento de agua.

### **Operación unitaria: Calentamiento de agua**

Calentamiento de agua en un depósito mediante el uso de vapor directo.

#### **Procedimiento:**

1. Determinar el caudal de suministro de vapor (QS) que ingresa a la operación unitaria de calentamiento de agua, de la siguiente manera: en un recipiente abierto (que puede ser un balde de plástico de 100 L), depositar un volumen medido de agua  $V_o$  (en L). A continuación, mediante una manguera conectada a la toma de suministro de vapor, y luego de haber dejado que éste se descargue al aire libre por unos 20 a 30 segundos, es introducido directamente en el seno del agua contenida en el recipiente.

El vapor que se condensa incrementa el volumen del agua desde su volumen inicial  $V_o$  hasta un volumen final  $V_f$ , que se alcanza después de un tiempo final  $t_f$ , medido desde el tiempo inicial  $t_o = 0$ , el cual corresponde al instante en el que se introdujo el vapor en el recipiente del agua. Asimismo, debe registrarse la temperatura final del agua ( $T_f$ ). Con estos datos, y conociendo la densidad del agua ( $\rho_{H_2O}$ ) a la temperatura final  $T_f$ , el caudal de suministro de vapor (QS) se calcula mediante la siguiente ecuación (se deben utilizar las unidades adecuadas para expresar el caudal en kg de vapor por hora):

$$QS = (V_f - V_o) \times \rho_{H_2O} / t_f \text{ [kg vapor / h]}$$

2. Medir la temperatura del vapor,  $T_v$  ( $^{\circ}C$ ) a la salida de la toma de suministro de vapor ubicada cerca del depósito de agua fría a ser calentada. A esta temperatura del vapor le corresponde una presión  $P$  (en  $kg/cm^2$ ) y una entalpía del vapor  $H_v$  (en  $kcal/kg$ ). El valor de este último puede obtenerse de tablas de vapor saturado.
3. Medir y registrar los siguientes parámetros durante el calentamiento del agua contenida en el depósito de agua fría:
  - $oD$  [L] = Volumen inicial del agua (litros) contenida en el depósito de agua fría
  - $ToD$  [ $^{\circ}C$ ] = Temperatura inicial del agua en el depósito de agua fría
  - $TfD$  [ $^{\circ}C$ ] = Temperatura final del agua contenida en el depósito
  - $tCD$  [h] = Tiempo (horas) de calentamiento del agua para llegar a la temperatura final deseada ( $T_{Df}$ )

Durante todo el tiempo del calentamiento, es necesario asegurar que el caudal QS se mantenga constante e igual en magnitud a la del caudal QS determinado en el paso 1.

#### **Energía de entrada (EE):**

Con el dato del tiempo total de calentamiento,  $t_{CD}$  (ver paso 3) y bajo las condiciones señaladas para controlar el caudal del vapor QS durante el calentamiento, la masa total de vapor (mv), utilizada para calentar el agua del depósito de agua fría, se calcula

mediante la siguiente ecuación: (Para convertir unidades de volumen en unidades de masa, se utiliza la densidad del agua que, para propósitos prácticos, puede tomarse el valor de 1 kg/L. Las entalpías se obtienen de la “Tabla de propiedades de vapor de agua saturado y recalentado”)

$$mv \text{ [kg vapor]} = QS \text{ [kg vapor / h]} \times tC \text{ [h]}$$

Conocida la masa de vapor  $mv$ , y la entalpia del vapor  $H$  (kcal/kg), se calcula energía de entrada ( $E_E$ ):

$$E_E \text{ [kcal]} = mv \text{ [kg]} \times H_v \text{ [kcal / kg]}$$

### **Energía de salida (ES):**

Para cuantificar la energía de salida ( $E_S = E_U + E_D + E_R$ ) se debe considerar que, en la operación de calentamiento, la energía de entrada no incluye la energía residual de la caldera ( $E_R$ ), ya que el vapor se obtiene de una toma de suministro de vapor. Por lo tanto,  $E_R$  no interviene en el balance de energía, y la ecuación de  $E_S$  queda reducida a:

$$E_S = E_U + E_D$$

Es decir, la energía de salida es la suma de la energía útil ( $E_U$ ) y la energía perdida ( $E_P$ ), siendo esta última igual solamente a la pérdida de energía por deficiencias ( $E_D$ ).

#### **a) Cálculo de la energía útil (EU):**

Calcular primero la masa inicial de agua fría,  $moD$  [kg], a partir de su volumen inicial medido en el depósito de agua fría, mediante la siguiente ecuación:

$$moD \text{ [kg]} = VoD \text{ [L]} \times \rho \text{ H}_2\text{O} \text{ [kg/L]} \quad (\text{En la práctica se asume densidad del agua } 1 \text{ kg/L})$$

La energía útil  $E_U$  se calcula a partir  $moD$ ,  $ToD$ ,  $TfD$  y del calor específico del agua a presión constante ( $C_p$ ), cuyo valor, para todo propósito práctico, se asumirá igual a 1 kcal/(kg x °C):

$$E_U \text{ [kcal]} = moD \text{ [kg]} \times C_p \text{ [kcal/(kg x °C)]} \times (TfD - ToD) \text{ [°C]}$$

#### **b) Cálculo de la pérdida de energía por deficiencias (ED)**

Esta energía no es fácil de cuantificar en forma directa, por lo que, en la práctica, se sugiere su cálculo simplemente por diferencia, como parte del balance de energía. Es decir (ver ecuación de ES en el subtítulo Energía de salida):

$$E_S = E_U + E_D$$

### **Operación unitaria: Planchado o secado** (en la industria de la curtición)

El balance de energía en estas operaciones unitarias, es similar al del calentamiento de agua. Por tratarse de equipos más sofisticados, y para simplificar el procedimiento, es práctico mostrar cómo se puede efectuar el balance de energía utilizando datos directamente leídos en los instrumentos de control de dichos equipos, así como datos nominales sobre sus respectivos rendimientos y consumos específicos de vapor. El procedimiento es como sigue:

1. Procesar, en el planchador o secador, una cantidad determinada de cuero, cuyo peso debe ser registrado y expresado en toneladas. Asimismo, registrar el consumo específico nominal del planchador o del secador:

$$m_c \text{ [t cuero procesado]} = \text{Masa de cuero procesada en el planchador o secador}$$



$CEN_v$  [kg vapor / t cuero] = Consumo específico nominal de vapor (del planchador o secador)

2. Durante la operación de planchado o de secado, a partir de lecturas realizadas en los instrumentos de control del planchador o secador, registrar los siguientes datos:

$T_v$  [°C] = Temperatura del vapor que ingresa al planchador o secador

$H_v$  [kcal/kg] = Entalpía del vapor correspondiente a la temperatura  $T_v$ .

$m_v$  [kg] = Masa de vapor utilizada por el planchador o secador para procesar  $m_c$

Si es que el planchador o secador no tuviese un instrumento de control que mida la cantidad de vapor consumida, la masa de vapor que corresponde a dicho consumo puede ser estimada colectando en un recipiente todo el condensado de vapor, pesándolo luego al final de la operación.

### **Energía de entrada ( $E_E$ ):**

Primero se calcula el consumo específico medido de vapor ( $CEM_v$ ), a partir de la masa de vapor ( $m_v$ ) utilizada por el planchador o secador y de la masa de cuero procesada ( $m_c$ ):

$$CEM_v [\text{kg vapor} / \text{t cuero}] = m_v [\text{kg vapor}] / m_c [\text{t cuero}]$$

La energía de entrada ( $E_E$ ) se calcula en términos específicos por tonelada de piel, a partir del valor calculado de  $CEM_v$  y de la entalpía del vapor ( $H_v$ ) correspondiente a su temperatura de ingreso ( $T_v$ ), mediante la siguiente ecuación:

$$E_E [\text{kcal} / \text{t cuero}] = CEM_v [\text{kg vapor} / \text{t cuero}] \times H_v [\text{kcal} / \text{kg vapor}]$$

### **Energía de salida ( $E_S$ ):**

La energía de salida  $E_S$  está dada por la siguiente expresión:

$$E_S = E_U + E_R + E_D$$

El consumo específico nominal de vapor ( $CEN_v$ ), especificado en los equipos por los fabricantes, es igual a la suma de la energía útil ( $E_U$ ) y de la energía residual o de rendimiento termodinámico ( $E_R$ ) del planchador o del secador. Es decir:

$$E_U + E_R = CEN_v [\text{kg vapor} / \text{t cuero}] \times H_v [\text{kcal} / \text{kg vapor}]$$

Por lo tanto, la energía de salida será igual a:

$$E_S = CEN_v [\text{kg vapor} / \text{t cuero}] \times H_v [\text{kcal} / \text{kg vapor}] + E_D$$

Para calcular las pérdidas de energía por deficiencias ( $E_D$ ), despejamos este término de la ecuación anterior, reemplazando además  $E_S$  por  $E_E$  (de acuerdo con el balance de energía):

$$E_D = E_E - CEN_v [\text{kg vapor} / \text{t cuero}] \times H_v [\text{kcal} / \text{kg vapor}]$$

Reemplazando  $E_E$  por su ecuación (ver energía de entrada), se tiene finalmente que:

$$E_D = (CEM_v [\text{kg vapor} / \text{t cuero}] - CEN_v [\text{kg vapor} / \text{t cuero}]) \times H_v [\text{kcal} / \text{kg vapor}]$$

Esta ecuación permite calcular las pérdidas de energía por deficiencias ( $E_D$ ), en base al valor medido del consumo específico de vapor ( $CEM_v$ ) con relación al valor nominal de dicho consumo ( $CEN_v$ ). Este valor nominal, además de incorporar las pérdidas de

energía asociadas al rendimiento termodinámico de la máquina, es posible que incluya pérdidas por deficiencias que pudieron tener los propios fabricantes al establecer dicho valor nominal ( $CEN_v$ ) para asignarlo a la máquina.

#### 4.2.2 Energía eléctrica

Para hacer un uso óptimo de la energía eléctrica, es necesario que la empresa tenga control sobre el consumo de esta energía, 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, resulta complicado. La forma adecuada de controlar el consumo de energía es a partir de un balance de energía en términos de consumos específicos; es decir, en términos de las cantidades de energía eléctrica que se consumen (kWh) por unidad de producto elaborado (kg, t). El consumo específico puede ser medido de manera global, calculando la relación entre el consumo total de energía y la producción total, o puede efectuarse de manera específica para cada una de las operaciones que se desarrollan en la planta.

Para controlar el consumo de energía, es necesario contar con información, tanto de la producción como del consumo de energía eléctrica. 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 es el caso de las bombas de agua. Por su parte, la empresa deberá llevar un control de los volúmenes de producción total y de los volúmenes de insumos y productos intermedios tratados en cada una de las operaciones, registrándolos con la misma frecuencia con la que se registra el consumo de energía eléctrica.

#### Registro del consumo de EE por tipo de operación

FECHA	Medidor 1			Medidor principal		
	Bombeo de agua			Consumos en planta		
	Consumo Kw/h	Volumen consumido m3	Consumo específico Kwh/m3	Consumo Kw/h	Producción total (kg)	Consumo específico Kwh/t
01-Jun						
02-Jun						
03-Jun						
04-Jun						
05-Jun						
06-Jun						
07-Jun						

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.

## BIBLIOGRAFIA

- **Balances de materia y energía** Escrito por Olaf A. Hougen, Kenneth M. Watson, Roland A. Ragatz, Miguel Ángel Herráez, Aguilar Peris J,-  
*books.google.com.co/books?isbn=8429140514...*
- [www.ine.gob.mx/publicaciones/libros/457/estimacion4.pdf](http://www.ine.gob.mx/publicaciones/libros/457/estimacion4.pdf)
- C:\OT\CNPML\Capacitaciones CEO\Producción Limpia - Guía de Producción Más Limpia - Perú - Parte 06.htm