

**APROXIMACIÓN A LA MECÁNICA DE FLUIDOS
MEDIANTE LA ECUACIÓN GENERAL DE
CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA**

**AN APPROACH TO FLUID MECHANICS BY MEANS OF
THE GENERAL ENERGY CONSERVATION EQUATION**

Francisco E. Jarabo Friedrich
fjarabo@ull.es

Francisco J. García Álvarez
frgarcia@ull.es

María del Cristo Marrero Hernández
mcmhdez@ull.es

Universidad de La Laguna

Resumen

Una de las grandes disciplinas clásicas olvidadas en la enseñanza secundaria española en los últimos años es la Mecánica de Fluidos. Algunos conceptos básicos sobre esta materia podrían establecerse apoyándose en conocimientos previos y en ciertas aproximaciones que no sólo simplificarían abordar su estudio, sino también entender ciertos fenómenos cotidianos, muy cercanos a conceptos tales como «densidad», «presión» o «energía».

En Ingeniería Química se trabaja con gran profusión con fluidos y, en la mayoría de los casos, éstos están en movimiento. El concepto de «caudal» es para los alumnos un arcano esotérico que es necesario desvelar, y se intentará hacerlo a través del principio de la conservación de la energía que conocen y han aplicado.

Palabras clave: balance; líquidos; caudal; conocimientos básicos.

SUMMARY

One of the great classic disciplines forgotten in spanish secondary education in recent years is Fluid Mechanics. Some basic concepts on this subject could be established based on previous knowledge and certain approaches that would not only simplify their study, but also understand certain everyday phenomena, very close to concepts such as «density», «pressure» or «energy.»

In Chemical Engineering we work with great profusion with fluids and, in most cases, these are in motion. The concept of «flow» is for students an esoteric arcane that needs to be unveiled, and we will try to do so through the principle of conservation of energy that they know and they also have applied.

KEYWORDS: balance; liquids; flow; basic knowledge.

INTRODUCCIÓN

La práctica académica universitaria nos ha permitido comprobar en el transcurso del tiempo que, a medida que el lenguaje pedagógico se hacía más sofisticado, los conocimientos relativos a ciertas materias iban decayendo progresivamente hasta el punto de hacerse alarmantes los niveles de muchos alumnos que cursan grados universitarios de Ciencias o Ingenierías. Tal es el caso que se ha producido respecto a una disciplina fundamental para varias ramas de la Ingeniería: en la enseñanza preuniversitaria ya no se contempla en absoluto, la **mecánica de fluidos**. Si bien aún está presente en los temarios para optar a las plazas de Profesores de Enseñanza Secundaria (BOE, 1993) en forma de dos temas, estática de fluidos y dinámica de fluidos, en los contenidos curriculares para los alumnos ha desaparecido casi totalmente (Turmero, 2016). Como profesores universitarios desconocemos los motivos de la desaparición de estos conceptos de los temarios de Secundaria, más cuando originalmente se han planteado como simples balances de fuerzas, que no implican ningún artificio matemático complicado.

Según Suay (2005), las vertientes más sencillas, como el teorema de Torricelli, el principio de Pascal, el principio de Arquímedes o la ecuación de Bernouilli, si bien estuvieron presentes en los textos que regularon la enseñanza pública en España, han desaparecido completamente en los textos actuales. Obsérvese que estos conceptos están íntimamente relacionados con los de «densidad», «presión» o «energía». Coincidimos con el citado autor en que debería recuperarse la introducción de conceptos relacionados con la mecánica de fluidos, lo que permitiría entender el funcionamiento de una serie de objetos cotidianos, además de resultar del máximo interés para abordar desarrollos posteriores en las áreas de Ingeniería en las que es primordial el manejo de fluidos.

El desarrollo que aquí se propone está basado en utilizar un concepto troncal común (principio de conservación de la energía), tanto para el análisis mecánico de los fluidos, hasta ahora realizado siempre mediante balances de fuerzas, como para el análisis termodinámico, de forma que no sigan pareciendo como fenómenos independientes. De esta forma se simplifica mucho el aparato matemático y se abunda en el significado físico de las aproximaciones que se llevan a cabo del balance de energía original, para obtener cada uno de los casos que, de otra manera, se estudiarían separadamente.

OBJETIVOS

Considerando conocido el principio de la conservación de la energía, se aplicará a un sistema fluido para obtener todas las relaciones importantes de la mecánica de fluidos. Para simplificar el estudio se tendrán en cuenta las siguientes hipótesis básicas aplicadas a los fluidos:

- Se verifican la conservación de la masa y de la cantidad de movimiento.
- Se consideran los fluidos incompresibles, es decir, su densidad es independiente de la presión.
- Se suponen los fluidos continuos a lo largo del espacio que ocupan, independientemente de las discontinuidades asociadas a su estructura molecular.
- Se contempla que el flujo es estacionario, es decir, que la velocidad en un punto es independiente del tiempo

Una vez definido el sistema fluido y las variables que intervienen en él, se planteará la conservación de la energía en dicho sistema, obteniendo una ecuación general. Analizando distintos casos se simplificará dicha ecuación para obtener las expresiones más comunes de la mecánica de fluidos, demostrando así que todas ellas se pueden derivar de un mismo tronco común: la conservación de la energía.

DEFINICIÓN DEL SISTEMA

La energía total de un sistema sólo tiene tres componentes: energía cinética, energía potencial y energía interna. Por otra parte, la energía puede transferirse entre un sistema y sus alrededores de dos formas: calor y trabajo, este último, bien intercambiado entre el fluido y algún mecanismo o bien asociado a los cambios de volumen debidos a las fuerzas de presión que actúan sobre el fluido.

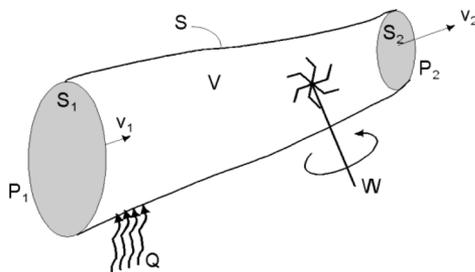


Figura 1. Elemento de fluido

En esta figura, P representa la presión, S las superficies interfacial y normal al elemento de fluido, V el volumen de dicho elemento, v la velocidad del fluido, Q el calor intercambiado y W el trabajo intercambiado por el sistema.

Finalmente, y con objeto de facilitar ciertos cálculos, se define el término «entalpía» como la combinación de la energía interna del sistema y el trabajo desarrollado por las fuerzas de presión.

El sistema genérico de flujo se representará por la figura anterior. Si los términos energéticos mencionados anteriormente se definen como valores «específicos», es decir, por unidad de masa, pueden expresarse mediante las siguientes ecuaciones:

$E_c = \frac{e_c}{m} = \frac{1}{2} v^2 \left[\frac{\text{Julios}}{\text{kg}} \right]$	$E_p = \frac{e_p}{m} = g z \left[\frac{\text{Julios}}{\text{kg}} \right]$
$U = \frac{u}{m} \left[\frac{\text{Julios}}{\text{kg}} \right]$	$\frac{PV}{m} = \frac{P}{\rho} \left[\frac{\text{Julios}}{\text{kg}} \right]$
$W = \frac{w}{m} \left[\frac{\text{Julios}}{\text{kg}} \right]$	$Q = \frac{q}{m} \left[\frac{\text{Julios}}{\text{kg}} \right]$
$H = U + \left(\frac{P}{\rho} \right) \left[\frac{\text{Julios}}{\text{kg}} \right]$	

Si el sistema cumple las hipótesis básicas mencionadas, la suma de todos los términos de variación de energía de dicho sistema será igual a la energía intercambiada con el entorno, es decir, utilizando nomenclatura compacta:

$$\Delta E_c + \Delta E_p + \Delta U + \Delta \left(\frac{P}{\rho} \right) = Q + W \quad \left[\frac{J}{kg} \right]$$

Es ésta la ecuación de conservación de la energía en un sistema fluido. El grado de simplificación de cada uno de los términos en diferentes casos permitirá obtener las expresiones conocidas en la mecánica de fluidos.

APROXIMACIÓN PARA SISTEMAS MECÁNICOS, 1: ECUACIÓN DE BERNOUILLI GENERALIZADA

Cuando los factores más significativos de la ecuación de conservación son las formas mecánicas y el trabajo, generalmente se recogen los términos de variación de energía interna y el flujo de calor en uno solo, denominado «pérdidas por fricción», de la forma:

Lo que permite expresar el balance de energía como:

$$\sum F = \Delta U - Q \quad \left[\frac{J}{kg} \right]$$

Expresión que se conoce como **ecuación de Bernoulli**, en su

$$\Delta E_c + \Delta E_p + \Delta \left(\frac{P}{\rho} \right) + \sum F = W \quad \left[\frac{J}{kg} \right]$$

forma más general.

APROXIMACIÓN PARA SISTEMAS MECÁNICOS, 2: ECUACIÓN DE BERNOUILLI SIMPLIFICADA

Considerando despreciables las pérdidas por fricción y que no existe aportación mecánica de una máquina, se obtiene a partir de la ecuación de Bernoulli generalizada la más conocida ecuación de Bernoulli (simplificada):

$$\Delta E_c + \Delta E_p + \Delta \left(\frac{P}{\rho} \right) = 0 \quad \left[\frac{J}{kg} \right]$$

Que establece la conservación de la energía mecánica en un fluido.

APROXIMACIÓN PARA SISTEMAS MECÁNICOS, 3: EFECTO VENTURI

Si se aplica la ecuación de Bernoulli simplificada a un tubo horizontal, se podrá obviar el término de energía potencial, de manera que:

$$\Delta E_c + \Delta \left(\frac{P}{\rho} \right) = 0 \quad \left[\frac{J}{kg} \right]$$

Esta ecuación representa el denominado «efecto Venturi», que se manifiesta cuando el fluido circula por un estrechamiento, por lo que se produce una disminución de presión en esa zona. En efecto, en el estrechamiento disminuye el área de paso del fluido y, si se ha de conservar la masa, habrá de producirse un aumento de velocidad y, por tanto, de energía cinética. La conservación de la energía ha de provocar necesariamente una disminución de presión o, bajo el punto de vista práctico, el efecto de aspiración descrito por Venturi.

APROXIMACIÓN PARA SISTEMAS MECÁNICOS, 4: TEOREMA DE TORRICELLI

Si se aplica la ecuación de Bernoulli simplificada a un fluido contenido en un depósito abierto en cuyo fondo se ha practicado un orificio, tanto la superficie del recipiente como el orificio estarán a presión atmosférica, por lo que se anulará el término debido a las fuerzas de presión, y quedará la expresión:

$$\Delta E_c + \Delta E_p = 0 \quad \left[\frac{J}{kg} \right]$$

Esta expresión explica el enunciado del **teorema de Torricelli**, que afirma que la velocidad con la que sale el líquido por el orificio es la que tendría un cuerpo cualquiera cayendo libremente en el vacío desde el nivel del líquido en el depósito hasta el centro del orificio. En efecto, puede deducirse fácilmente que la distancia entre la superficie del fluido y el orificio es la altura y que la velocidad del fluido es despreciable respecto a la de salida por el orificio. Por tanto, se obtiene una ecuación idéntica a la de la caída libre de un cuerpo.

APROXIMACIÓN PARA SISTEMAS MECÁNICOS, 5:

ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA HIDROSTÁTICA Y PRINCIPIO DE ARQUÍMEDES

Si se aplica la ecuación de Bernoulli simplificada a un fluido en reposo, se anulará el término de energía cinética, por lo que se tendrá:

$$\Delta E_p + \Delta \left(\frac{P}{\rho} \right) = 0 \quad \left[\frac{J}{kg} \right]$$

Esta ecuación es una forma de la **ecuación fundamental de la hidrostática** que establece que cualquier punto de un fluido soporta una presión que depende de la altura de la columna de líquido que queda por encima.

Teniendo en cuenta que la presión es la fuerza por unidad de superficie (denominada «empuje» cuando es hacia arriba), que el producto de la superficie por la altura es el volumen y que el producto de éste por la densidad es la masa, puede establecerse que el empuje será igual al peso del líquido desplazado, lo que se conoce como «principio de Arquímedes».

APROXIMACIÓN PARA SISTEMAS MECÁNICOS, 6:

PRINCIPIO DE PASCAL

Si la ecuación de Bernoulli simplificada se aplica a un fluido en reposo (energía cinética nula) y se considera que el fluido está sometido a presiones mucho mayores que la diferencia de energía potencial entre las diferentes partes de dicho fluido se podrá suponer que ésta también es despreciable y, por tanto:

$$\frac{P}{\rho} = \text{constante} \quad \left[\frac{J}{kg} \right]$$

Y se puede enunciar esta ecuación como «el incremento de la presión aplicada a la superficie de un fluido se transmite con el mismo valor a cada una de las partes de dicho fluido», comúnmente conocida como «principio de Pascal».

APROXIMACIÓN PARA SISTEMAS TÉRMICOS, 1: PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA

Cuando los factores más significativos de la ecuación de conservación de la energía son los debidos a operaciones térmicas, los términos de energía mecánica (cinética y potencial) y el de trabajo tienden a ser despreciables respecto a los demás (energía interna y flujo de calor), por lo que puede representarse el balance de energía como:

$$\Delta U + \Delta \left(\frac{P}{\rho} \right) = Q \quad \left[\frac{J}{kg} \right]$$

Si se supone que el sistema térmico es cerrado (sin flujo de materia), el trabajo de las fuerzas de presión puede considerarse como trabajo mecánico del sistema sobre los alrededores y la ecuación anterior podría expresarse (utilizando la convención de signos habitual) como:

$$\Delta U = W + Q \quad \left[\frac{J}{kg} \right]$$

Que constituye la expresión de **primer principio de la Termodinámica** en su forma más clásica.

APROXIMACIÓN PARA SISTEMAS TÉRMICOS, 2: BALANCE DE ENTALPÍA

Si en el balance de energía térmica se utiliza la definición de entalpía mencionada anteriormente, dicho balance queda formulado como:

$$\Delta U + \Delta \left(\frac{P}{\rho} \right) = Q \quad \left[\frac{J}{kg} \right]$$

Ecuación representativa del denominado **balance de entalpía**.

Si además el sistema es adiabático, es decir, está térmicamente aislado o, lo que es lo mismo, no existe flujo de calor con los alrededores, la ecuación anterior se simplifica a:

$$\Delta H = Q \left[\frac{J}{kg} \right]$$

APROXIMACIÓN PARA SISTEMAS MIXTOS, 1: LA TURBINA

La turbina es un dispositivo aislado, formado por un rotor a través del cual se expande (disminuye bruscamente la presión) un vapor o un gas para producir trabajo en forma de un movimiento rotatorio, que se transmite a un generador eléctrico. De acuerdo con estos planteamientos, no hay variación de energía potencial, el sistema es adiabático y puede comprobarse que el término de energía cinética es despreciable, es decir:

$$\Delta E_p = 0 \quad Q = 0 \quad \Delta E_c = 0$$

Por lo que el balance de energía se reduce a:

$$\Delta U + \Delta \left(\frac{P}{\rho} \right) = W \left[\frac{J}{kg} \right]$$

O, lo que es lo mismo:

$$\Delta H = W \left[\frac{J}{kg} \right]$$

APROXIMACIÓN PARA SISTEMAS MIXTOS, 2: LA TOBERA

Una tobera es un dispositivo estático de paredes rígidas, cuya función es la de aumentar la energía cinética de un fluido disminuyendo la presión; opera de forma continua y está térmicamente aislada. De acuerdo con estos planteamientos, no hay variación de energía potencial, el sistema es adiabático y no se produce trabajo, es decir:

$$\Delta E_p = 0 \quad Q = 0 \quad W = 0$$

$$\Delta E_c + \Delta U + \Delta \left(\frac{P}{\rho} \right) = 0 \quad \left[\frac{J}{kg} \right]$$

Por lo que el balance de energía se reduce a:

$$\Delta E_c + \Delta H = 0 \quad \left[\frac{J}{kg} \right]$$

O, lo que es lo mismo:

CONCLUSIONES

A partir de la definición de un sistema simple que abarca un fluido en movimiento y partiendo de los conceptos conocidos relacionados con la energía, se ha establecido una ecuación general de conservación o balance de energía que contempla todos los posibles términos relacionados con dicho concepto. El análisis pormenorizado de las diferentes situaciones reales que pueden darse en este sistema ha llevado a distinguir tres tipos de subsistemas predominantes: mecánicos, térmicos y mixtos.

A partir de las aproximaciones mecánicas puede deducirse las ecuaciones habituales, tanto para los fluidos en movimiento (hidrodinámica) como para los fluidos en reposo (hidrostática). Dichas ecuaciones comprenden, en el primer caso, las ecuaciones de Bernoulli (general y simplificada) y la que describe el efecto Venturi; en el segundo caso, el teorema de Torricelli, la ecuación fundamental de la hidrostática y los principios de Arquímedes y Pascal.

A partir de las aproximaciones térmicas se llega tanto a la formulación del primer principio de la Termodinámica como al balance de entalpía utilizado en el cálculo de calores de reacciones químicas.

Las aproximaciones mixtas, es decir, con predominio tanto de algunos términos mecánicos como de otros térmicos, lleva a la descripción matemática de dos dispositivos de suma importancia actual: la turbina y la tobera.

Consideramos que esta forma de abordar el estudio de la energía permite no sólo unificar la nomenclatura, sino demostrar que muchos de los fenómenos que hasta ahora se han estudiado de forma completamente independiente y sin relación aparente tienen todos una base común.

Estos desarrollos teóricos se complementan con ejemplos numéricos que permitan apreciar los órdenes de magnitud de los diferentes términos que se consideran despreciables en las respectivas aproximaciones, lo que permite fijar de forma más rotunda los conceptos desarrollados (<http://riull.ull.es/xmlui/handle/915/5868>). También se está abordando el diseño de algunas prácticas de laboratorio que permitan estudiar experimentalmente cada uno de estos casos. No olvidemos que una fracción importante de los alumnos universitarios no han estudiado mecánica de fluidos en Secundaria y/o Bachillerato (36 % según nuestros datos), ni siquiera hidrostática (45%).

La elaboración del material descrito ya de por sí supone una mejora sustancial en la satisfacción de las demandas formativas; pero no hay que despreciar la posible realimentación aportada por los alumnos para verificar el método en su aplicación en cursos sucesivos y, si procede, extrapolarlo a otras asignaturas que necesiten de similares conocimientos. Una vez analizados los resultados, cabe la incorporación de este esquema de refuerzo formativo al aula de Ingeniería Química Básica del entorno virtual de la OCW de la Universidad de La Laguna.

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo forma parte del Proyecto de Innovación Educativa 2016/2017 «Recuperación de una demanda formativa fundamental en la Ingeniería Química y olvidada en la Enseñanza Secundaria: la Mecánica de Fluidos», concedido por el Vicerrectorado de Docencia de la Universidad de La Laguna.

REFERENCIAS

- BOE. (1993) *Temario de Profesores de Enseñanza Secundaria. Física y Química*, ORDEN de 9 de septiembre de 1993, (BOE de 21/09/1993).
- SUAY, J.M. (2005). *La enseñanza de los fluidos en los libros de texto de secundaria. Conceptos elementales no siempre presentes*, https://www.researchgate.net/publication/267820367_La_ensenanza_de_los_luidos_en_los_libros_de_texto_de_secundaria_Conceptos_elementales_no_siempre_presentes.
- TURMERO, P. (2016). «Mecánica a nivel de Bachillerato», <http://www.monografias.com/trabajos104/mecanica-nivel-bachillerato/mecanica-nivel-bachillerato.shtml> (accedido en 06/2016).