

aumenta el peso y se sumerge; para mantenerlo a una profundidad constante debe lograrse que el peso sea igual a la fuerza de empuje y para salir a la superficie hay que disminuir el peso, para lo cual expulsan agua de los tanques, mediante aire comprimido. Esto es independiente de los timones, que le permiten variar la profundidad cuando se mueven en el agua.

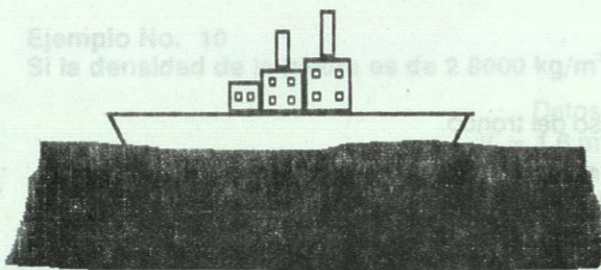


Figura No. 23

Las personas que no pueden flotar se debe a que tienen una densidad media de sus cuerpos grande, comparada con la del agua; generalmente son personas musculosas y por ello tienen mayor densidad. Por otra parte en el mar es más fácil flotar que en una alberca, pues el agua de mar tiene mayor densidad que el agua dulce.

## FLUIDOS EN MOVIMIENTO

Comenzaremos ahora el estudio de los fluidos en movimiento. La parte de la Física que se dedica al estudio de los fluidos en movimiento se denomina *Dinámica de los fluidos*. Existen muchas situaciones en las que observamos fluidos en movimiento: el agua al correr por las tuberías, ríos, el viento, el aire empujado por un abanico, etc. En dependencia del fluido que se esté analizando podemos diferenciar *la hidrodinámica*, cuando se trata de líquidos y *la aerodinámica*, cuando se trata de gases, fundamentalmente el aire.

La dinámica de los fluidos ha sido desarrollada a lo largo de mucho tiempo, gracias al trabajo de muchos científicos como Newton, Bernoulli, Pascal, etc. La hidrostática, estudiada anteriormente, puede considerarse como un caso particular de la hidrodinámica, cuando la velocidad del líquido es cero.

Por cuanto es imposible desarrollar todos los aspectos de la hidrodinámica, trataremos sólo los fundamentales.

## TIPOS DE FLUJO

Cuando observamos un fluido en movimiento, como puede ser el humo de un cigarro o el agua que sale de la llave, podemos ver que al inicio del chorro el movimiento del fluido es

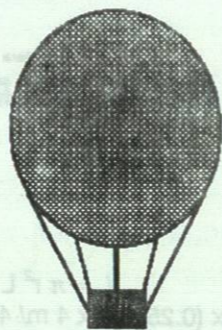


Figura No. 24

ordenado, mientras que a una determinada distancia el fluido comienza a mezclarse y forma como torbellinos. Para realizar el estudio de los flujos y darse cuenta de cómo se realiza el movimiento del fluido se utiliza la representación de las trayectorias de las partículas que componen el fluido. Así si dibujamos una serie de líneas que correspondan con las trayectorias que siguen, en su movimiento, algunas de las partículas que componen el fluido, tendremos un cuadro aproximado de cómo está ocurriendo el movimiento. A estas líneas se les llama *líneas de corriente* y cuando tenemos un haz de las líneas de corriente se le llama *tubo de corriente*.

La diferencia entre las formas de fluir es determinada por el tipo de flujo que se establece. Así diferenciamos dos tipos de flujo: el laminar y el turbulento.

El flujo laminar es aquel en el que las partículas del fluido, que van una detrás de la otra, recorren trayectorias similares, las cuales no se cruzan. Las líneas de corriente de un fluido en el flujo laminar formarán un cuadro como el mostrado en la figura 25, donde puede observarse que las líneas de corriente no se cruzan. Generalmente este tipo de flujo existe cuando las velocidades de las partículas no es muy grande, aunque también depende de los obstáculos que se presentan durante el movimiento.

El flujo turbulento es el que presenta remolinos, las trayectorias de las partículas no son similares, sino que cambian con el tiempo. El cuadro de un flujo turbulento puede ser como el representado en la figura 26 y se puede observar en la columna de humo del cigarro, a cierta distancia del mismo, donde se observa la formación torbellinos y por tanto las líneas de corriente forman un cuadro complejo.

En nuestro estudio consideraremos solamente los flujos laminares, no los turbulentos, al estudio de los cuales se dedican muchos laboratorios en el mundo dado que presentan gran complejidad.

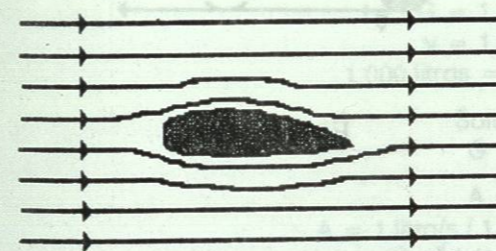


Figura 25. Líneas de corriente para un flujo laminar.

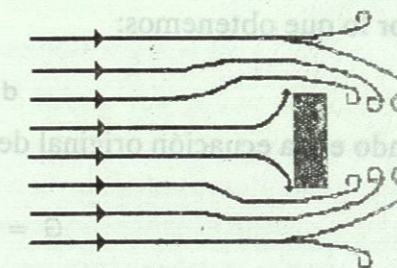


Figura 26. Líneas de corriente para un flujo turbulento.



Otra característica de los fluidos en movimiento es que en general al fluir unas capas del fluido deslizan sobre otras. Este deslizamiento se realiza con cierta resistencia, o sea que en general los fluidos presentan fricción o rozamiento. Esta fricción o rozamiento está relacionada con la viscosidad del fluido. Todos han notado cuán diferente fluye el agua, el aceite o la miel de abeja, lo cual se debe a la diferente viscosidad de estos fluidos. En nuestra presentación consideraremos que la fricción en los fluidos es muy pequeña por lo que no la tendremos en cuenta.

Una magnitud que caracteriza un flujo de un fluido determinado es el *gasto*. En general diferenciamos dos tipos de gasto:

- 1.- Gasto volumétrico (G): volumen del fluido por unidad de tiempo, que atraviesa una sección transversal del tubo de corriente.
- 2.- Gasto másico (Q): masa del fluido por unidad de tiempo, que atraviesa una sección transversal del tubo de corriente.

De acuerdo a la definición de gasto volumétrico, tenemos:

$$G = \frac{V}{t}$$

donde V es el volumen que atraviesa la sección transversal del tubo, en el tiempo t.

El volumen V es igual al área de la sección transversal A por la distancia d que recorre una capa de fluido en el tiempo t, por lo que: (figura 3)

$$V = Ad$$

La distancia es igual a la velocidad del flujo por el tiempo a partir de la definición conocida de velocidad, por lo que obtenemos:

$$d = vt$$

Sustituyendo en la ecuación original de gasto:

$$G = \frac{Avt}{t}$$

o sea:

$$G = Av$$

el gasto es igual a la velocidad del flujo, multiplicada por el área de la sección transversal del tubo por donde se desplaza el fluido. Las unidades quedarán en  $m^3/s$ , en el Sistema Internacional de Unidades, aunque en ocasiones se utilizan otras unidades como litros por segundo o galones por segundo.

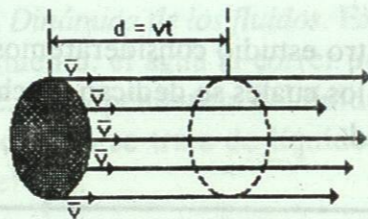


Figura No. 27

El gasto másico está relacionado con el volumétrico por la siguiente expresión:

$$Q = G\rho = Av\rho \quad \text{donde } \rho \text{ es la densidad del fluido.}$$

Analizando las unidades el gasto volumétrico tiene unidades de  $m^3/s$  y la densidad de  $kg/m^3$  por lo que las unidades del gasto másico son  $kg/s$ , correspondientes con la definición de gasto másico como masa del fluido por unidad de tiempo.

#### Ejemplo No. 12

Una tubería que comunica la presa de La Boca con la planta de distribución de agua del Municipio de Guadalupe tiene un área de la sección transversal de  $0.5 m^2$ . Si la velocidad del flujo de agua es de  $2 m/s$ , calcule el gasto volumétrico de agua que suministra la tubería.

Datos:

$$A = 0.5 m^2$$

$$v = 2 m/s$$

Solución:

$$G = Av$$

$$G = 0.5 m^2 \times 2 m/s$$

$$G = 1 m^3/s$$

$$G = 1 m^3/s \times 1000 \text{ litros}/m^3$$

$$G = 1000 \text{ litros}/s$$

Teniendo en cuenta que  $1 m^3 = 1000$  litros el gasto volumétrico, en litros por segundo.

Calcule el gasto másico del flujo por la tubería, del problema anterior.

Datos:

$$G = 1 m^3/s$$

$$\rho_{\text{agua}} = 1000 kg/m^3$$

Solución:

$$Q = \rho G = 1 m^3/s \times 1000 kg/m^3$$

$$Q = 1000 kg/s$$

#### Ejemplo No. 13

Se desea hacer la instalación de entrada de agua a una casa. Si se conoce que el agua llega a la entrada de la casa con una velocidad de  $1.5 m/s$  y el gasto de los habitantes de la casa será de  $1$  litro/s, ¿cuál debe ser el área de la sección transversal de la tubería que se coloque?

Datos:

$$G = 1 \text{ litro}/s$$

$$v = 1.5 m/s$$

$$1000 \text{ litros} = 1 m^3$$

Solución:

$$G = Av$$

$$A = G/v$$

$$A = 1 \text{ litro}/s / 1.5 m/s$$

$$A = 10^{-3} m^3/s / 1.5 m/s$$

$$A = 0.00077 m^2$$

De aquí se puede calcular el diámetro de la tubería, que es el parámetro por el que se compran normalmente, en la ferretería.



## ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

Analicemos un tubo a través del cual fluye un líquido determinado. En la sección 1 del tubo el gasto másico es  $Q_1$  (figura 28) supongamos 2 kg/s. ¿Cuál será el gasto en la sección 2 del tubo? La respuesta la podemos hallar si pensamos que si al tubo entran 2 kg de fluido por segundo, debe salir la misma masa de fluido por segundo, pues de lo contrario se desaparecería o se crearía fluido dentro del tubo, lo cual no es posible. O sea en el caso analizado:

$$Q_1 = Q_2$$

$$A_1 v_1 \rho_1 = A_2 v_2 \rho_2$$

Es importante notar que el área de la sección transversal del tubo puede ser diferente.

Con este razonamiento llegamos a una ecuación fundamental de la dinámica de fluidos: la ecuación de continuidad, que expresa que el gasto másico debe ser el mismo para cualquier sección del tubo de fluido, siempre que no haya desviaciones, por supuesto.

Esta ecuación puede escribirse:

$$Q = A v \rho = \text{constante}$$

Como puede verse la ecuación de continuidad es una consecuencia de la ley de conservación de la masa.

Si el fluido es incompresible, o sea que la densidad es constante, se puede hablar de que el gasto volumétrico también será constante a lo largo del tubo de fluido. O sea para fluidos incompresibles:

$$G = A v = \text{Constante}$$

De esta expresión se puede ver que si disminuye el área de la sección transversal  $A$ , por donde fluye el fluido, la velocidad  $v$  debe aumentar, pues el gasto  $G$ , debe ser constante. A partir de este análisis podemos obtener la explicación de por qué la velocidad de la corriente, en los ríos, aumenta cuando el cauce se hace más estrecho debido a la configuración del terreno por donde pase el río. De la misma forma cuando un chorro de agua cae libremente, de cierta altura, se puede observar como el diámetro del chorro va disminuyendo a medida que se acerca al punto donde choque con el piso; aquí la explicación se da a partir de que la velocidad del agua aumenta, bajo la acción de la fuerza de gravedad, y por tanto el área de la sección transversal del chorro debe disminuir, o sea disminuye el diámetro del chorro.

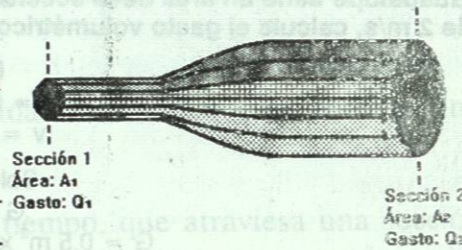


Figura No. 28

## ECUACIÓN DE BERNOULLI

Una relación fundamental de la dinámica de los fluidos es la Ecuación de Bernoulli, formulada por primera vez por el físico Daniel Bernoulli (1700-1782) en el año 1738. La ecuación es obtenida a partir del análisis energético de una corriente de un fluido incompresible (densidad constante) y sin fricción (viscosidad despreciable), en flujo laminar (las líneas de corriente no se cruzan).

Independientemente de las consideraciones señaladas para la obtención de la ecuación, la misma resulta muy útil para explicar muchos fenómenos que nos encontramos a nuestro alrededor como por ejemplo el vuelo de los aviones, las trayectorias curvas que describen los balones de fútbol o las pelotas de béisbol, la navegación de los barcos a velas, y otros muchos más.

Para realizar el análisis consideremos un tubo de corriente de un fluido, como se muestra en la figura 29, en el instante inicial  $T_1$  y luego en el instante posterior  $T_2$ . Debemos tener en cuenta el trabajo realizado, la variación de energía potencial y la variación de energía cinética del fluido, entre los dos instantes analizados.

Así podemos tener:

- 1) El trabajo realizado sobre el sistema por la fuerza de presión, en la sección 1 del tubo, será:

$$W_1 = P_1 A_1 d_1$$

recordando que el trabajo es igual a la fuerza por el desplazamiento y que la presión es la fuerza por unidad de área, por lo que la fuerza es presión ( $P$ ) por el área ( $A$ ) de la sección y  $d$  es el desplazamiento que tuvo el fluido.

- 2) El trabajo efectuado sobre el sistema por la fuerza de presión, en la sección 2 del tubo, será:

$$W_2 = -P_2 A_2 d_2 \quad (2) \text{ o sea una expresión similar, pero con signo negativo, pues la fuerza actúa en sentido opuesto al desplazamiento del fluido en esa sección del tubo.}$$

- 3) La variación de energía potencial está asociada al cambio de la altura del fluido entre las secciones 1 y 2 del tubo. Así, teniendo en cuenta que las alturas están dadas por  $Y_1$  y  $Y_2$ , la variación de la energía potencial de un elemento de fluido de masa  $M$  será:

$$E_p = M g (Y_1 - Y_2)$$

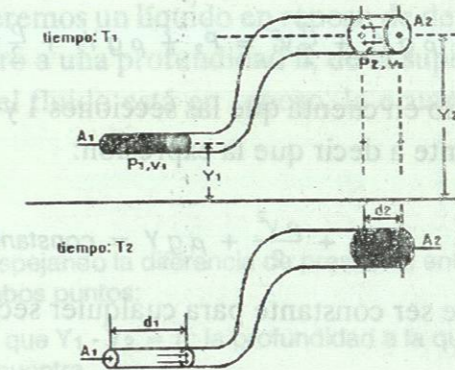


Figura No. 29



- 4) La variación de energía cinética, del mismo elemento de fluido de masa  $M$ , está relacionada con las diferentes velocidades del flujo en la sección 1 y 2 del tubo. Así:

$$E_{\text{cin}} = \frac{M(V_1^2 - V_2^2)}{2}$$

agrupando todos los miembros descritos tenemos:

$$P_1 A_1 d_1 - P_2 A_2 d_2 + Mg(Y_1 - Y_2) + \frac{M}{2}(V_1^2 - V_2^2) = 0$$

Aquí podemos introducir un cambio de variables, a través del concepto de densidad  $\rho$ , como la masa de la unidad de volumen, por lo que:

$$M = \rho V$$

y podemos observar que en la expresión del trabajo, el producto del área  $A$  por el desplazamiento  $d$ , es el volumen  $V$ , por lo que toda la ecuación puede quedar, simplificando el volumen  $V$ , en función de la densidad:

$$P_1 + \rho g Y_1 + \frac{\rho}{2} V_1^2 = P_2 + \rho g Y_2 + \frac{\rho}{2} V_2^2$$

y teniendo en cuenta que las secciones 1 y 2 del tubo fueron elegidas arbitrariamente, esto es equivalente a decir que la expresión:

$$p + \frac{\rho V^2}{2} + \rho g Y = \text{constante}$$

tiene que ser constante para cualquier sección del tubo de fluido.

En esta expresión el segundo término es la energía cinética por unidad de volumen y el tercero es la energía potencial por unidad de volumen del fluido. De esta forma la ecuación de Bernoulli no es más que una expresión de la ley de conservación de la energía aplicada al caso de fluidos.

## APLICACIONES DE LA ECUACIÓN DE BERNOULLI

La ecuación de Bernoulli, como ya se dijo, tiene muchas aplicaciones en la explicación de muchas situaciones prácticas.

Analicemos el caso del vuelo de los aviones. La fuerza de sustentación, en las alas de los aviones, aparece debido a la configuración del ala. En la figura 30 se muestra el perfil del ala de un avión. Se observa que en la parte superior del ala el fluido recorre una mayor distancia, por lo que la velocidad

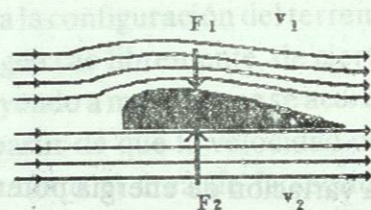


Figura No. 30

debe ser mayor, por lo que, según la ecuación, la presión debe ser menor en la parte superior que en la parte inferior del ala. Esto implica que la fuerza resultante sobre el ala está dirigida hacia arriba, y aplicada al ala, es la que sustenta el avión en vuelo.

Una explicación similar se le puede dar al caso de las bolas de béisbol, cuando el lanzador las envía hacia el home con una rotación. Supongamos que el lanzador le dió a la bola una rotación, como la indicada en la figura 31. En este caso la velocidad del fluido en la parte superior de la bola es menor que en la parte inferior y por tanto la presión en la parte superior es mayor haciendo que la bola "caiga" más rápidamente, ocasionando el lanzamiento llamado normalmente "curva" hacia abajo. El mismo caso ocurre con los balones de fútbol cuando se les imprime una rotación al patearla, lo que hace que la trayectoria sea una curva.

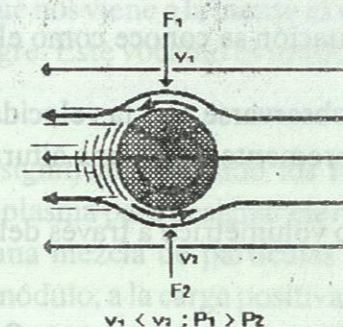


Figura No. 31

Ya habíamos señalado que la hidrostática puede considerarse un caso particular de la hidrodinámica. Consideremos un líquido en reposo de densidad  $\rho$ . Examinemos 2 puntos: uno en la superficie y el otro a una profundidad  $h$ , de la superficie. Como en ambos puntos la velocidad es cero, pues el fluido está en reposo, la ecuación de Bernoulli quedaría:

$$P_1 + \rho g Y_1 = P_2 + \rho g Y_2$$

$$P_2 - P_1 = \rho g (Y_1 - Y_2)$$

Despejando la diferencia de presiones entre ambos puntos:

$$P_2 - P_1 = \rho g h$$

Ya que  $Y_1 - Y_2 = h$ ; la profundidad a la que se encuentra.

que es la misma ecuación que la obtenida anteriormente, para la presión en el interior de un líquido.

Analicemos un nuevo caso cuando un recipiente muy grande y abierto, tiene un orificio pequeño a una distancia "h" de la superficie libre del líquido.

La presión en la superficie libre y en el orificio, es igual a la presión atmosférica, pues estos puntos están abiertos a la atmósfera. Se considerará que la velocidad del fluido en la superficie libre del recipiente es muy pequeña ( $v_2 = 0$ ), ya que el recipiente es muy grande y el orificio muy pequeño, por lo que el descenso del nivel del líquido es muy lento. Utilizando la ecuación de Bernoulli hallemos la velocidad de salida del líquido, por el orificio:

$$P_2 + \rho g Y_2 = P_1 + \rho \frac{V_1^2}{2} + \rho g Y_1$$



$$\rho g (Y_2 - Y_1) = \rho \frac{v_1^2}{2} \quad P_1 = P_2 = P_{\text{atm}}$$

$$2gh = v_1^2 \quad Y_2 - Y_1 = h$$

$$v_1 = \sqrt{2gh}$$

Esta ecuación se conoce como el teorema de Torricelli.

Puede observarse que la velocidad de salida del líquido, es la misma que la de un cuerpo que cae libremente desde una altura  $h$ .

El gasto volumétrico a través del orificio puede calcularse como:

$$G = A v \quad \text{donde } A \text{ es el área de sección transversal del orificio.}$$

$$G = A \sqrt{2gh}$$

Otra aplicación de la ecuación de Bernoulli es la relacionada con los medidores de Venturi, que permiten medir la velocidad o el gasto de un fluido dentro de un tubo.

Supongamos un tubo horizontal, que tenga un estrechamiento (figura ).

Planteando la ecuación de Bernoulli, para la sección 1 y 2 del tubo:

$$\rho + \rho g Y_1 + \frac{\rho}{2} v_1^2 = \rho_2 + \rho g Y_2 + \frac{\rho}{2} v_2^2 \quad \text{dado que } Y_1 = Y_2, \text{ pues el tubo es horizontal.}$$

De la ecuación de continuidad, para fluidos incompresibles, tenemos  $A_1 v_1 = A_2 v_2$

de donde se ve que dado que  $A_2$  es menor que  $A_1$ , la velocidad  $v_2$  debe ser mayor que  $v_1$ . Por otra parte de la ecuación de Bernoulli se ve que si  $v_2$  es mayor que  $v_1$ , la presión en 2 ( $P_2$ ) debe ser menor que la presión en 1 ( $P_1$ ).

$$\rho + \frac{\rho}{2} v_1^2 = \rho_2 + \frac{\rho}{2} v_2^2 \quad \text{para mantener la igualdad}$$

Colocando manómetros en las secciones 1 y 2, podemos medir la diferencia de presiones ( $P_1 - P_2$ ) y con ayuda de la ecuación de continuidad y la de Bernoulli, podemos determinar la velocidad del líquido en cualquier sección (1 ó 2) del tubo.

Dispositivos basados en este principio se utilizan ampliamente en la técnica para determinar velocidades o gastos de fluidos en tuberías.

Obsérvese que en este dispositivo se pone de manifiesto la misma regularidad, que en los otros ejemplos de la aplicación de la ecuación de Bernoulli, y que en forma resumida podemos expresar como: la presión disminuye en las regiones del fluido, donde la velocidad aumenta. Esta regularidad se utiliza para crear zonas de baja presión, p. ej., en aspiradoras y aspersores, en zonas donde se provoca una alta velocidad del fluido.

## LECTURA COMPLEMENTARIA

## EL PLASMA, CUARTO ESTADO DE LA MATERIA

Normalmente al escuchar la palabra plasma lo primero que nos viene a la mente es el plasma sanguíneo, o sea el componente líquido e incoloro de la sangre. Este vocablo es usado con este significado desde mediados del siglo pasado.

Sin embargo desde 1923 esta palabra tiene un nuevo significado, cuando los físicos estadounidenses Y. Langmuir y L. Tonks utilizaron la palabra plasma para designar cierto estado singular del gas ionizado. El plasma, para los físicos, es una mezcla de partículas cargadas eléctricamente en la que la carga negativa total es igual, en módulo, a la carga positiva sumaria. De modo que en conjunto el plasma es un medio eléctricamente neutro que conduce, a la perfección, la corriente eléctrica.

Se distingue el plasma débil y fuertemente ionizado. El primero contiene, en lo fundamental, electrones e iones positivos. En el segundo además de electrones e iones, hay átomos y moléculas excitados y neutros.

Aunque el desarrollo de la Física del plasma comenzó en los años 20 de nuestro siglo, algunos científicos, sin que ellos lo supieran, ya habían trabajado con el plasma antes. Ya en 1667 los científicos de la Academia de Ciencias de Florencia descubrieron que la llama del quemador tenía la propiedad de conducir la electricidad. En el siglo XIX se descubrió el arco eléctrico. Semejante descarga solo es posible cuando se crea una suficiente cantidad de partículas cargadas y el aire se convierte en conductor de la electricidad o sea en plasma.

Los estudios posteriores demostraron que las propiedades del gas en el que ocurre la descarga eléctrica se diferencian mucho de las propiedades del gas no conductor, por lo que **el plasma fue considerado un nuevo estado de la materia.**

Para lograr obtener el estado de plasma es necesario aumentar mucho la temperatura de un gas, o sea entregarle energía, de forma que los átomos y moléculas del gas pierdan parte de sus electrones y se conviertan en iones positivos. En general se considera que a temperaturas mayores de 10 000 C todas las sustancias se encuentran en su cuarto estado, en forma de plasma, pero el plasma puede existir a temperaturas menores.

El plasma existe en el interior de las lámparas que utilizamos en la iluminación de las calles de nuestras ciudades, como por ejemplo las de neón o sodio. Existe mucha materia en estado de plasma en el espacio interestelar, en las estrellas, en nuestro Sol. La Tierra también está rodeada de plasma, las capas altas de la atmósfera están formadas por un gas ionizado, que protege a la Tierra contra el efecto de la radiación del Sol.