

Plasma: ¿qué es y para qué se utiliza?

Saúl Guadamuz Brenes (*)
sguadamuz@itcr.ac.cr

Unos 9200 millones de años después del *big bang*, nuestro planeta llegó a existir [1, 2] y como si de un nuevo bebé en la familia cósmica se tratase, desde su mismo nacimiento recibió una calurosa bienvenida: aproximadamente 1368 W/m^2 de parte de su hermano mayor el Sol, repartida, al momento de llegar a la parte superior de la atmósfera, en 50% de radiación infrarroja, 40% de luz visible y 10% de radiación ultravioleta. Pero para permitir la vida como la conocemos, después de pasar por la atmósfera terrestre se ha filtrado un 70% de la radiación ultravioleta y la energía se ha atenuado a unos 1000 W/m^2 . [3]

Fuentes de energía actuales

Sin duda, el Sol ha jugado, desde el mismo inicio de la historia de la Tierra, y seguirá jugando, un papel esencial para la vida en nuestro planeta desde todo punto de vista; pero concentrémonos específicamente en el aspecto energético... Las fuentes actuales de energía (en porcentajes) se pueden clasificar como sigue:

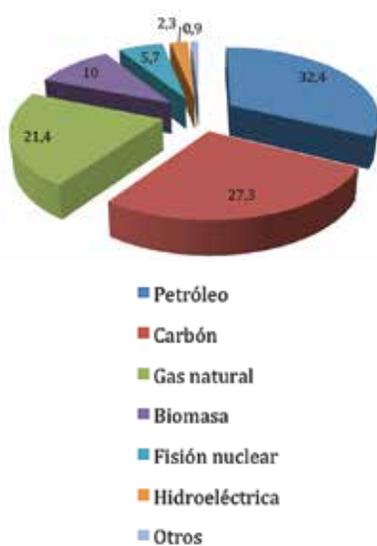


Figura 1. Distribución de las fuentes de energía mundiales. [4]



Analicemos por un momento las cuatro mayores fuentes de energía de nuestra sociedad:

- **Petróleo:** en su estado crudo es un líquido inflamable compuesto principalmente por hidrocarburos insolubles en agua y otros compuestos orgánicos; el petróleo es una fuente de energía no renovable ya que su formación toma millones de años, durante los cuales grandes cantidades de desechos orgánicos como zooplancton y algas, son sepultados y sometidos a enormes presiones y una gran cantidad de calor. [5]
- **Carbón:** se presenta en forma de roca sedimentaria de color oscuro; al igual que el petróleo, es un recurso no renovable formado en el arco de millones de años, mayormente durante el período carbonífero. El carbón está principalmente formado por carbono y cantidades variables de hidrógeno, azufre, oxígeno y nitrógeno. [6]
- **Gas:** verdaderamente es una mezcla de varios gases pero principalmente de metano; cuando ocurre naturalmente, en su mayoría es producto de dos procesos: el biogénico, como producto de la metabolización de desechos orgánicos por parte de microorganismos, y el termogénico, que se da a mayores profundidades y temperaturas, también a partir de material orgánico. [7]
- **Biomasa:** a diferencia de los tres anteriores, es una fuente de energía renovable producto de material orgánico vivo o que lo estuvo recientemente; se pueden obtener diversas formas de combustibles una vez que se procesa, dándose la extracción de energía de forma térmica, química o bioquímica. [8]

Tabla 1. Datos relevantes del Sol. [9]

Edad	4600 millones de años
Masa	$1,9891 \times 10^{30}$ kg (333 000 tierras)
Radio ecuatorial	$69\,634 \times 10^5$ km (109 el de la Tierra)
Temperatura de la fotosfera	$\sim 1,57 \times 10^7$ K (15 millones grados Celsius)
Composición principal	Hidrógeno y helio

Si buscamos un factor común en estas fuentes de energía nos damos cuenta de que todas proceden de material orgánico, siendo la diferencia el tiempo y las condiciones a las que fue sometido para convertirse en petróleo, carbón, gas o biomasa; esto implica que, de una forma u otra, casi toda la energía utilizada en nuestro planeta en realidad es producto de una enorme central nuclear: el Sol. Luego la fotosíntesis y el tiempo se encargaron del resto.

¿Qué tanto conocemos al astro rey?

Todos los datos sobre el Sol impresionan, pero quizás uno de los más llamativos es su temperatura; debido a esta, el estado del Sol se conoce como plasma; para entender qué cosa es el plasma pensemos en cómo alguna sustancia, por ejemplo el agua, cambia de estado con la temperatura¹.

¹ El cambio de estado también lo determina la presión, pero no la consideraremos en esta explicación.

Plasma: el cuarto estado de la materia

Empezamos en un estado sólido, en el que los átomos forman moléculas que se encuentran muy juntas en un estado de reducida actividad cinética (o sea, casi no se mueven); conforme aumentamos la temperatura pasamos a un estado líquido en el que las moléculas de agua gozan de relativa libertad de movimiento, pero aún estando fuertemente ligadas; después de aumentar aún más la temperatura pasamos al estado gaseoso de vapor de agua, en el que las moléculas prácticamente no están ligadas una a la otra y tienen mucha libertad de movimiento. Normalmente hasta aquí el comportamiento del agua nos resulta muy familiar, inclusive obvio, pero ¿qué sucedería si continuáramos incrementando la temperatura?

La energía térmica en los átomos sería suficiente para arrancarles los electrones energéticamente más alejados del núcleo convirtiendo el vapor de agua en un gas ionizado muy caliente: el plasma.

El plasma no se comporta como un gas cualquiera; de hecho, su comportamiento es incluso contra-intuitivo, por lo menos para nosotros, lo cual es completamente comprensible ya que se calcula [10] que el plasma es el estado del 99% del universo y resulta que nosotros vivimos en parte del 1% que no lo es... No estamos acostumbrados al plasma y la manera en que se comporta, mientras que nos sentimos muy confiados al “predecir” que al calentar agua en una olla, tarde o temprano hervirá. Veamos a continuación algunas de las características que hacen del plasma un estado tan particular. El lector interesado puede profundizar en dichas características refiriéndose a [10].

Características del plasma: comportamiento colectivo

En un gas cualquiera como el aire, el movimiento de las moléculas es dominado por colisiones o fuerzas externas, esto por cuanto la fuerza gravitacional es mínima y los campos electromagnéticos no tienen relevancia al tratarse de moléculas neutras.

En un plasma, la situación es completamente diferente ya que incluye partículas cargadas (electrones y iones), los cuales son susceptibles a campos electromagnéticos. Es más, conforme estas partículas se mueven existe la posibilidad de que se produzcan concentraciones de carga positiva o negativa, conllevando a la generación de campos eléctricos dentro del plasma. También, recordemos que cargas en movimiento significa corrientes eléctricas lo cual, a su vez, significa campos magnéticos.

La combinación de estos campos dentro del plasma puede afectar otras de sus partículas cargadas a grandes distancias, por lo que se dice que el plasma es susceptible a fuerzas de Coulomb de largo alcance²; es justamente este comportamiento colectivo el culpable de que el plasma presente características muy diferentes bajo distintos escenarios. No es de extrañar que muchos de los que hemos estudiado sobre la física de plasmas concordemos con [10] en no estar de acuerdo con la palabra “plasma”, la cual viene de un término griego que significa algo “moldeado” o “fabricado”, ya que sabemos muy bien que la mayoría del tiempo pareciera que este particular gas tuviera mente propia.

Características del plasma: cuasi-neutralidad

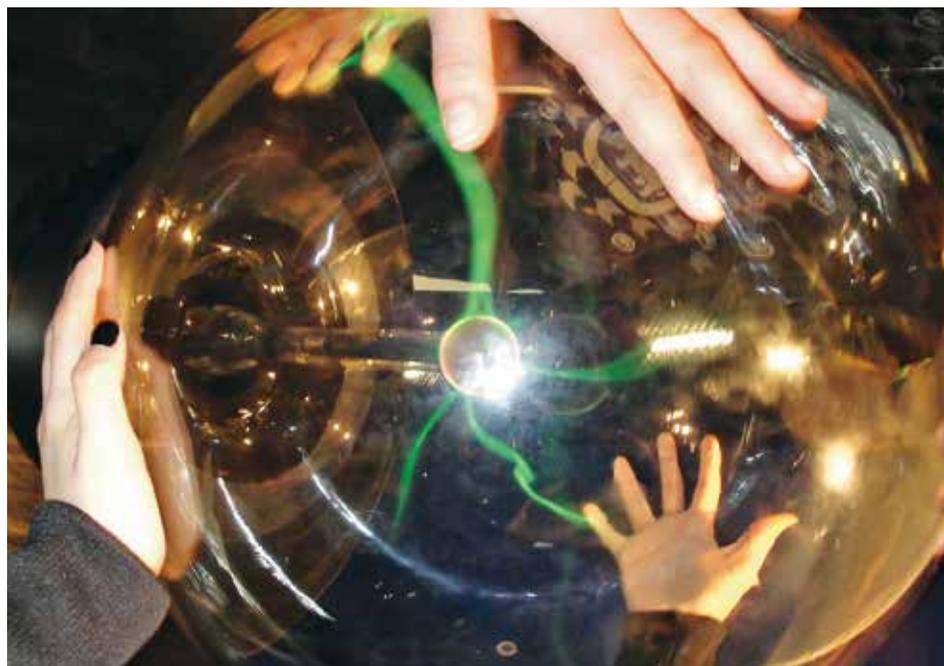
Como se infiere del término, esto significa que el plasma es casi neutro eléctricamente. ¿Por qué decimos “casi”? Debido a la alta

movilidad de los electrones, cualquier concentración de carga positiva que pudiera dar lugar a un campo eléctrico será anulada por una avalancha electrónica de manera prácticamente instantánea justificando así la parte de “neutralidad” en nuestro subtítulo. Sin embargo, dependiendo de la densidad y de la temperatura de un plasma en particular, existirán en él regiones en las cuales habrán concentraciones de carga y, por lo tanto, campos eléctricos; el tamaño de dichas regiones –idealizadas como esferas– está dado por el radio de Debye (llamado también longitud de Debye), que puede variar desde unas centenas de nanómetro en el núcleo del Sol hasta una decena de kilómetros en el medio intergaláctico. Dentro de una esfera de Debye se rompe la neutralidad, lo cual justifica el prefijo “cuasi”.

Podemos decir, entonces, que si las dimensiones totales de nuestro cúmulo de gas ionizado son mucho mayores a un radio de Debye, se cumple con la condición de cuasi-neutralidad.

Características del plasma: temperatura

Sin entrar en una discusión innecesariamente profunda, cuando hablamos de “temperatura” hablamos de una medida de cuán “excitadas” se encuentran las partículas en un sistema, o en otras palabras, qué tanto se “mueven”; y abusando de los conocimientos de física del lector, sabemos que la temperatura es un escalar, es decir, una cantidad que



² Donde “largo” depende de un parámetro conocido como longitud de Debye, que se definirá en el siguiente subtítulo.

cuenta con magnitud pero no con dirección, ya que el movimiento (o más elegantemente, su distribución de velocidad) no tiene preferencia por una dirección u otra.

En un plasma esto ya no es cierto: debido a que los electrones tienen una movilidad muy diferente a la de los iones, y a que la frecuencia de colisiones entre electrones con electrones, iones con iones y electrones con iones es también diferente, las diferentes partículas tienen diferentes distribuciones de velocidad; por eso es frecuente hablar de “temperatura electrónica” y de “temperatura iónica”.

Esta distinción de temperaturas es aún más marcada cuando el plasma se somete a la influencia de un campo magnético; debido a la fuerza de Lorentz, dicho campo actúa diferente sobre partículas que se mueven de forma paralela o perpendicular a él, por lo que ahora tenemos, además, una preferencia de dirección: “temperatura paralela” o “temperatura perpendicular” al campo magnético.

Un experimento realizado recientemente en el Laboratorio de Plasmas para Fusión y Aplicaciones del TEC ilustra muy bien los conceptos de temperatura previamente comentados. En la figura 2 se observa una descarga de plasma conocida como “plasma plum”. La explicación de [11] se reproduce a continuación.

“¿Se puede tocar un plasma?”

El plasma es un estado de la materia; comúnmente escuchamos hablar que el Sol y los rayos están compuestos por plasma y se hace difícil imaginar cómo es posible tocarlo. En un plasma es posible distinguir entre la temperatura de los electrones y la de las partículas pesadas o especies masivas. Bajo este escenario podemos clasificar un plasma como térmico o no térmico. Los plasmas no térmicos, o también llamados “plasmas fríos”, son plasmas a baja presión y poco ionizados donde los electrones tienen una temperatura mucho mayor que las partículas pesadas, lo cual produce una situación de desequilibrio térmico.

En un plasma “frío” los electrones poseen temperaturas de cinco mil a cien mil grados, aunque suene contradictorio. Sin embargo, el resto de las especies masivas, que son de hecho las que pueden transmitir el calor a las superficies en contacto con el plasma,



Figura 2. Un investigador toca el plasma generado en el Laboratorio de Investigación en Plasmas para Fusión y Aplicaciones del TEC. [11]

se encuentran prácticamente a temperatura ambiente así que, pese a la elevada temperatura de los electrones, es posible tocar un “plasma frío” con el dedo sin experimentar siquiera una quemadura. Gracias a esto el plasma se abre espacio en aplicaciones donde interactúa con tejidos vivos.”

El plasma en nuestra vida diaria

Aún sin percatarnos de ello, el plasma juega un papel cotidiano en nuestras vidas, tanto el producido naturalmente como el generado artificialmente. Algunos ejemplos son:

- **Relámpagos o rayos:** cuando se da una diferencia de potencial eléctrico lo suficientemente alto entre las nubes y el suelo, un trayecto a través del aire se ioniza y un canal de plasma se hace visible (el relámpago). La temperatura de un rayo puede alcanzar los 50 000 K (49 727 °C) en un tiempo del orden de los microsegundos, lo cual causa que el aire se expanda de una manera violenta produciendo una fuerte y audible onda de choque (el trueno). [12]
- **Ionosfera:** en las partes altas de la atmósfera terrestre la radiación solar en forma de rayos ultravioleta es lo suficientemente energética como para ionizar las moléculas de aire; a dichas alturas la atmósfera es tan rala que los electrones liberados pueden existir por cortos períodos de tiempo antes de recombinarse con los iones. Sin embargo, su existencia es lo suficiente como para reflejar ondas electromagnéticas transmitidas desde la Tierra, permitiendo así la propagación de ondas de radio.

- **Iluminación:** cuando se llena un tubo de vidrio con gas a una presión menor a la atmosférica y se le aplica un alto voltaje a un par de electrodos en los extremos del tubo, el cátodo emite electrones³ que al colisionar con el gas lo ionizan produciendo, a su vez, más electrones, que podrán contribuir a la ionización inicial en un proceso denominado ionización en avalancha; parte de la energía liberada es luz visible que se puede acentuar recubriendo el tubo con material fluorescente. Este es el principio operativo subyacente en muchos sistemas de iluminación -desde las famosas luces de neón hasta fluorescentes domésticos- e incluso de las pantallas de plasma en los televisores.
- **Manufactura:** aunque indirectamente, la tecnología de plasmas ha tenido uno de sus impactos más masivos al ser parte del proceso de fabricación de circuitos integrados. En primer lugar se utiliza una descarga de plasma de oxígeno para oxidar la superficie de las obleas de silicio y hacer crecer en ellas capas de dióxido de silicio; posteriormente se utiliza de nuevo el plasma para remover selectivamente partes de las capas previamente depositadas en un proceso conocido como “etching”.

Esto es tan solo una pequeña muestra de cómo el llamado cuarto estado de la materia influye en nuestras vidas y, en el caso de las aplicaciones industriales, se trata de la punta

³ Este proceso se denomina emisión termiónica.

del iceberg, ya que no hemos considerado el tratamiento de desechos con antorchas de plasma, la purificación de agua con arcos de plasma, la esterilización de equipo médico, el tratamiento de superficies, deposiciones de metales en textiles para tratamientos dermatológicos, aplicaciones biomédicas con plasmas fríos y muchos otros.

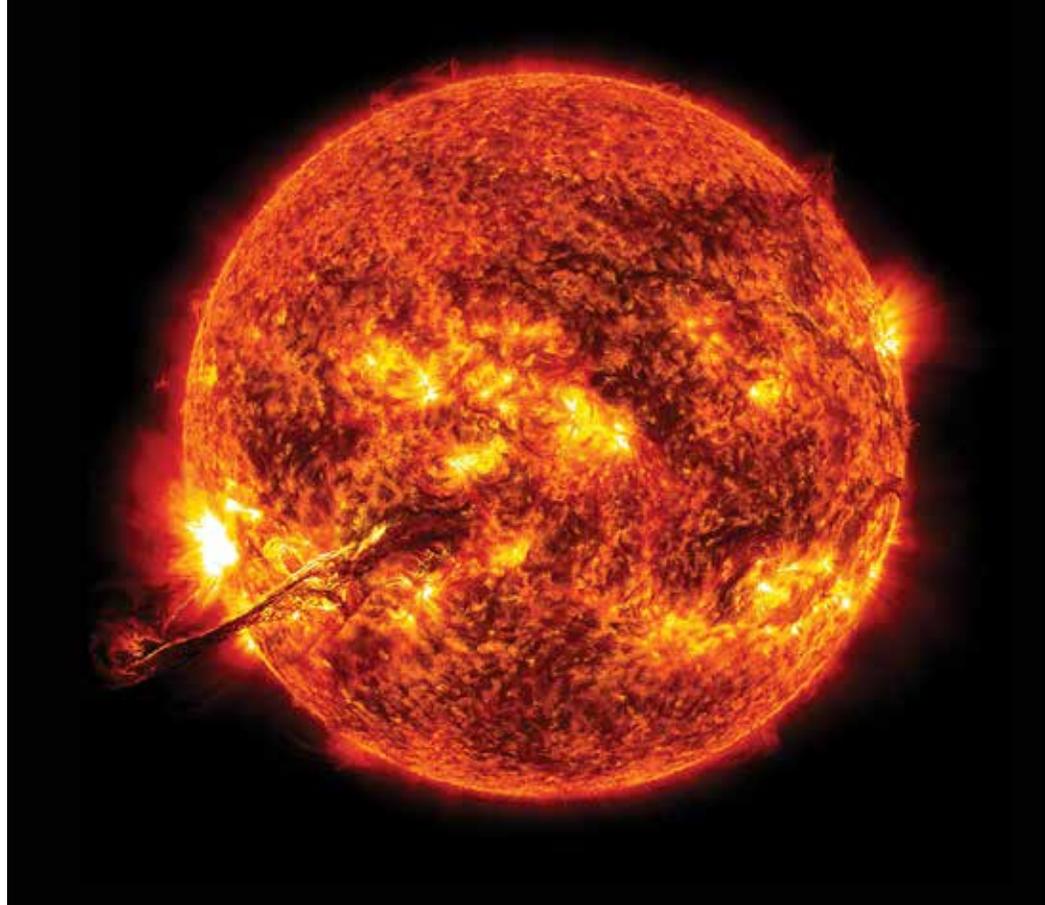
El plasma como fuente de energía

Ahora volvamos al Sol. Una de las preguntas que más ha intrigado a la comunidad científica es: ¿Tenemos el conocimiento suficiente en física de plasmas y los recursos técnicos necesarios para reproducir lo que sucede en el Sol aquí en la Tierra? Para dar respuesta, primero debemos saber qué es lo que ocurre en Sol.

De manera muy general, se puede decir que las estrellas son enormes centrales de fusión nuclear donde elementos livianos se fusionan para producir elementos más pesados, liberando energía en el proceso. Las reacciones nucleares específicas dependen de factores como la edad de la estrella y su tamaño.

En el caso del Sol, la reacción dominante se denomina cadena protón-protón, donde dos pares de protones de hidrógeno se combinan de manera sucesiva hasta formar un isótopo de helio-4. Cuando se hace un balance de masas entre los cuatro protones iniciales y el helio resultante, se observa una pérdida del 0,7% que se ha convertido en energía, en forma de rayos gama y neutrinos, [13] para un total de 26,73 MeV.

Lamentablemente, esta reacción no puede reproducirse en la Tierra; la energía que se necesita para hacer que los dos protones de hidrógeno se fusionen es enorme ya que se debe vencer la fuerza de Coulomb que hace que dos cargas iguales se repelan; en el Sol dicha fuerza se puede vencer gracias a la enorme presión de la gravedad consecuencia de su masa. Por otra parte, la cadena protón-protón presenta una tasa de reacción notablemente lenta, lo cual para una estrella no es un problema gracias a su gran densidad de partículas. En un laboratorio terrestre sería extremadamente difícil alcanzar estas condiciones de presión y densidad de partículas. No obstante, existen otras reacciones de fusión nuclear que presentan mejor desempeño en su tasa de reacción; la más apta es la llamada reacción D-T, en la que se fusionan



deuterio y tritio para producir helio, un neutrón y 17,6 MeV de energía. [14]

Pero contar con una reacción adecuada es solo el inicio de la historia, falta responder preguntas como: ¿Qué mecanismo de confinamiento se utilizará para contener el plasma? ¿Cómo se consiguen el deuterio y el tritio? Aún partiendo de la reacción más eficiente, ¿se puede alcanzar la fusión con la tecnología actual? Suponiendo que la producción de energía a partir de la fusión nuclear sea posible y rentable, ¿es segura, especialmente en comparación con la fisión nuclear de la cual ya existen centrales operando? Estas preguntas las abordaremos en un artículo posterior.

Referencias

- [1] "How Old is the Universe?". WMAP-Age of the Universe. The National Aeronautics and Space Administration (NASA). 2012-12-21. Accesado 03-06-2013.
- [2] Newman, William L. (2007-07-09). "Age of the Earth". Publications Services, USGS. Retrieved 2007-09-20.
- [3] Holton, James R. "Encyclopedia of Atmospheric Sciences". Elsevier Science, 2003.
- [4] "2012 Key World Energy Statistics". International Energy Agency, 2012.
- [5] Petroleum. In Wikipedia, The Free En-

cyclopedia. Accesado 3-6-2013.

[6] Coal. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Accesado 3-6-2013.

[7] Natural gas. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Accesado 3-6-2013.

[8] Biomass. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Accesado 3-6-2013.

[9] Sun. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Accesado 3-6-2013.

[10] Chen, Francis F. "Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion". 2 Ed, Plenum Press, New York. 1984.

[11] <https://www.facebook.com/plasma-CostaRica>

[12] Lightning. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Accesado 17-6-2013.

[13] Proton-proton cycle. In Encyclopaedia Britannica. Accesado 17-6-2013.

[14] Wesson, John. "Tokamaks". 3 Ed, Oxford University Press, New York. 2004.

(*) Saúl Guadamuz Brenes es profesor e investigador de la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC). Es ingeniero en electrónica graduado en el TEC y tiene una maestría y un doctorado en ingeniería electrónica y comunicaciones, ambos del Politecnico de Torino, Italia.