

## Breve panorama sobre el estado actual de la tecnología de plasma frío como herramienta para el desarrollo de energías renovables: solar, eólica y biomasa

*Brief overview of the current state of cold plasma technology as a tool for the development of renewable energies: solar, wind and biomass*



Área: Biología y Química

Dr. Ricardo Reyna-Martínez<sup>1</sup>, M.C. Deniss Ithzel Díaz-Blanco<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Colegio de Estudios Científicos y Tecnológicos del Estado de Coahuila, Plantel Joaquín Arizpe de la Maza, Calzada Antonio Narro, Col. Buenos Aires, C.P. 25076, Saltillo, Coah, México.

<sup>2</sup>Instituto Tecnológico Superior de Monclova, Carretera 57, km 4.5 Col. Los 90's, C.P. 25733, Monclova, Coahuila, México.

Correspondencia para autor: M.C. Deniss Itzel Díaz-Blanco

Instituto Tecnológico Superior de Monclova

Correo electrónico: [deniss.db@monclova.tecnm.mx](mailto:deniss.db@monclova.tecnm.mx)

## Resumen

El consumo de energías renovables en todo el mundo ha crecido en años recientes, debido a que los recursos de energía renovable son prometedores para satisfacer las necesidades de energía y desarrollo de los países en todo el mundo, además de ayudar a mitigar los efectos del cambio climático. Dichos recursos son más económicos que los recursos energéticos tradicionales. En México, las energías renovables en el territorio nacional poseen una alta viabilidad de desarrollo, debido a la amplia gama de recursos naturales que posee, esto se deriva en un área de oportunidad para mejorar e innovar el desarrollo de la energía renovable en nuestro país. En este sentido, la tecnología de plasma es una tecnología emergente que podría coadyuvar al desarrollo de fuentes de energía renovable más eficientes y/o económicas debido a las diferentes estrategias de modificación superficial que esta tecnología proporciona, confiriendo un valor agregado a estos recursos. El objetivo de esta revisión es analizar y discutir las aplicaciones de la tecnología de plasma frío como herramienta clave para potenciar el desarrollo de las energías renovables, como la energía eólica, solar y la energía proveniente de la biomasa, para dilucidar el estado actual de las investigaciones, desarrollos y aplicaciones más recientes, que nos permitan comprender las ventajas generadas para este tipo de energías cuando se les aplica un tratamiento con plasma frío.

**Palabras clave:** Energías renovables, plasma frío, modificación superficial

## Abstract

Renewable energy consumption around the world has grown in recent years, as renewable energy resources hold promise for meeting the energy and development needs of countries around the world, as well as helping to mitigate the effects of climate change. These resources are cheaper than traditional energy resources. In Mexico, renewable energy in the national territory have high development viability, due to the wide range of natural

resources it possesses, this results in an area of opportunity to improve and innovate the development of renewable energy in our country. In this sense, plasma technology is an emerging technology that could contribute to the development of more efficient and/or economical renewable energy sources due to the different surface modification strategies that this technology provides, conferring added value to these resources. The objective of this review is to analyze and discuss the applications of cold plasma technology as a key tool to promote the development of renewable energies, such as wind, solar, and energy from biomass, this with the intention of shedding light on the current state of the more recent research, developments, and applications, which allow us to understand the advantages generated for this type of energy when treatment with cold plasma is applied.

**Keywords:** Renewable energy, cold plasma, surface modification

### **Introducción.**

El aumento de la población global genera un alto consumo de bienes y servicios, especialmente energéticos, necesarios para satisfacer la demanda mundial, este consumismo aumentado afecta negativamente la calidad de vida ya que genera una fuerte degeneración del medio ambiente por una sobreexplotación de sus recursos naturales. Como solución que propone una mitigación a los problemas medioambientales surge el uso de energías renovables (solar, eólica, biomasa, etc.), que proporcionan una fuente de energía inagotable, por medio de dispositivos (paneles solares, aerogeneradores, etc.) cuya función es producir electricidad mediante el aprovechamiento de la energía natural (viento, sol, biomasa, etc.). A menudo estos dispositivos se encuentran expuestos a condiciones climáticas extremas como fuertes vientos, lluvias, variantes de temperatura que degeneran el material y disminuyen su vida útil, la tecnología de plasma se ha determinado como una tecnología verde emergente, generada mediante un gas ionizado que, en sinergia con otro material proporciona una propiedad superficial que confiere al material características que potencian su funcionalidad y/o extienden su vida útil.

### **Energías renovables.**

Las energías renovables, a menudo denominadas energías limpias, provienen de fuentes naturales o procesos que se reponen constantemente. Uno de sus puntos fuertes es que tienen un impacto ambiental muy escaso, pues además de no emplear recursos finitos, no generan contaminantes (Oswald, 2017; Romo y col., 2013).

Si bien la energía renovable a menudo se considera una nueva tecnología, el aprovechamiento de la energía de la naturaleza se ha utilizado durante mucho tiempo para calefacción, transporte, iluminación y más (Recalde y col., 2015). Ahora que tenemos formas cada vez más innovadoras y menos costosas de capturar y retener energía eólica y solar, por mencionar algunas, las energías renovables se están convirtiendo en una fuente de energía más importantes, debido a que este conocimiento lucha directamente para mitigar los efectos del cambio climático y representa una fuente inagotable de energía limpia, crecientemente y competitiva, ya que sus costos evolucionan a la baja de forma sostenida y sustentable a diferencia de la tendencia a la alza de la energía proveniente de los combustibles fósiles (Vázquez, 2015).

El crecimiento de las energías renovables es imparable, como queda reflejado en las estadísticas aportadas anualmente por la Agencia Internacional de la Energía (AIE): Según las previsiones de la AIE, la participación de las renovables en el suministro eléctrico global pasará del 26% en 2018 al 44% en 2040, y proporcionarán 2/3 del incremento de demanda eléctrica registrado en ese período, principalmente a través de las tecnologías eólica y fotovoltaica (García y col., 2016; Vázquez, 2015).

La transición hacia un sistema energético basado en tecnologías renovables tendrá asimismo efectos económicos muy positivos para la economía global y el desarrollo, según IRENA (Agencia Internacional de Energías Renovables), la expansión de las energías renovables está ocurriendo a grandes escalas, por lo que un objetivo clave será encontrar

rutas de mejora para el eficiente el uso, desarrollo e innovación de estas tecnologías (García y col., 2016; Oswald, 2017).

### **Fuentes de energías renovables.**

#### **Energía solar.**

La energía solar es una fuente de energía renovable e inagotable, la irradiación solar total, que incide sobre la tierra, podría cubrir siete mil veces las necesidades energéticas de la humanidad (Zhou y col., 2012). Siendo una tecnología de con gran auge global, en especial en los últimos años, se buscan soluciones para mejorar su aprovechamiento y potenciar su rendimiento (Alurralde y col., 2004), en la actualidad esta energía deriva dos caminos principales: la energía térmica y la energía fotovoltaica (Figura 1), que, si bien ambas se basan en el aprovechamiento de la energía del sol, presentan numerosas diferencias, la principal comprende el modo de almacenaje (Larios, 2015).

La energía solar térmica es almacenada en depósitos de agua, empleada principalmente, para calentar un fluido (Datas y col., 2013). A su vez este proceso de calentamiento sirve para la producción de agua caliente sanitaria, utilizada en la climatización de edificios y casas, para calentar el agua de piscinas además de diferentes usos industriales, como la producción de electricidad a través del uso de turbinas, etc. (Foad y col., 2018). Por otro lado, la energía fotovoltaica se almacena en baterías, su aplicación principal consiste en la alimentación de motores y aparatos eléctricos, estas diferencias se derivan del uso que hacen de la energía solar, mientras la energía térmica absorbe y transforma el calor que se puede usar directamente para calentar fluidos o generar electricidad con su almacenamiento, la energía fotovoltaica utiliza la energía del sol para transformarla en electricidad (Datas y col., 2013; Iwamori y col., 2010).

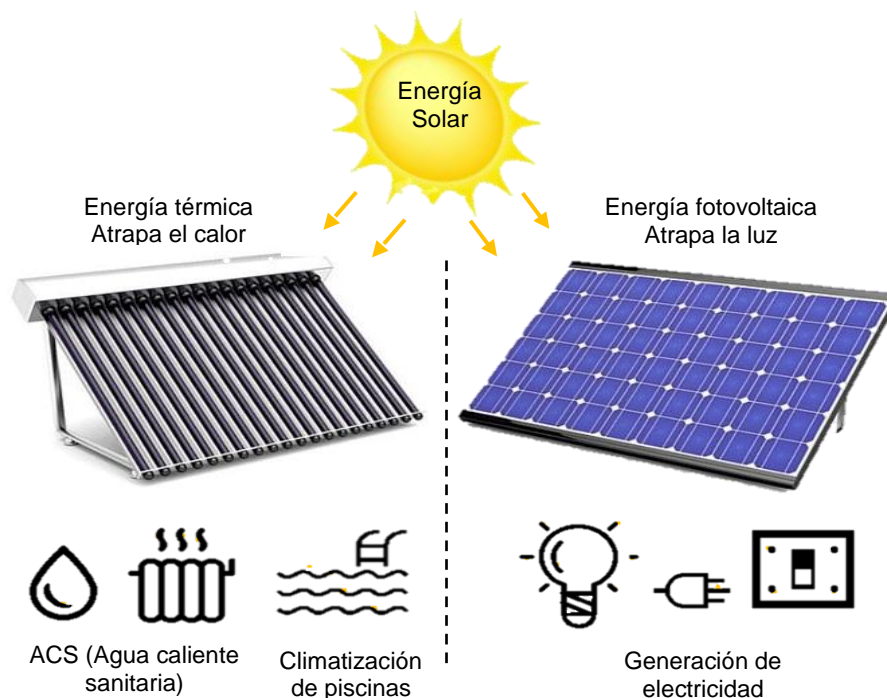


Figura 1. Conversión y uso de la energía solar.

### Energía eólica.

El calentamiento de la superficie de la tierra por la irradiación del sol es el fenómeno natural causante del viento, la circulación general del viento se ve alterada por el movimiento de rotación de la tierra, generando zonas de vientos dominantes con patrones definidos (Ali y col., 2018), la velocidad del viento es diferente de acuerdo a la naturaleza del terreno sobre la cual se desplaza, por ello la selección del terreno que albergará la instalación eólica es crucial. Las instalaciones eólicas transforman directamente la energía cinética del viento en electricidad (Alurralde y col., 2004), estas instalaciones son la principal fuente de energía en las zonas con fuertes vientos (Ali y col., 2003). Los aerogeneradores o turbinas eólicas convierten la energía cinética del viento en energía mecánica, esta energía es captada por medio de la palas, las cuales están unidas al eje a través de un elemento denominado cubo o rotor (Carvajal y col., 2019), el aire que es obligado a fluir por las caras superior e inferior de la pala, genera una diferencia de presión entre ambas caras (Ahmed y col., 2018), dando



origen a una fuerza resultante ( $R$ ) que actúa sobre el material, al descomponer esta fuerza en dos direcciones se genera fuerza de sustentación ( $S$ ) en dirección perpendicular al viento y una fuerza de arrastre ( $A$ ) en dirección paralela al viento (Figura 2), este impulso natural del viento, es aprovechado para convertir la energía rotacional que se genera en energía eléctrica (Carvajal y col., 2019).

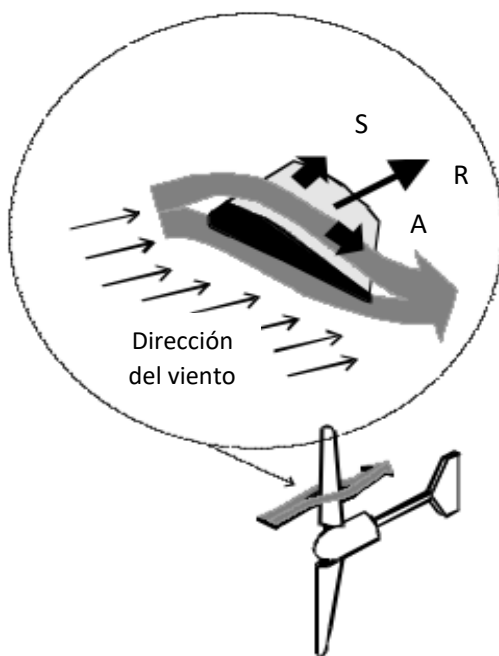


Figura 2. Fuerzas de sustentación y de arrastre que inciden sobre el material.

Fuente: <https://grupo15fluidos.wordpress.com/2016/04/24/funcionamiento-de-la-turbina/>

### **Energía de la biomasa.**

La biomasa puede definirse como un material orgánico producido mediante fotosíntesis, susceptible a transformación y ser utilizada como una fuente de energía limpia (Alonso y col., 2017). Este material orgánico puede ser obtenido de manera natural o proceder de transformaciones artificiales resultantes de algún proceso industrial, por ello se describen distintos tipos de biomasa para la generación de energía (Foad y col., 2018; Liu y col., 2011).

La biomasa primaria es aquella que se obtiene directamente de un ecosistema natural para su explotación energética, la biomasa secundaria, también llamada residual, es la obtenida como residuo o subproducto de una actividad humana, considerando la biomasa como un producto procesado previamente a su utilización energética final, se puede considerar un tercer tipo de biomasa, el biogás obtenido de la digestión de la biomasa residual húmeda, del biodiesel o del bioetanol, todos ellos son combustibles finales obtenidos de la transformación de la biomasa primaria o secundaria (Praveen y col., 2016; Liu y col., 2011). La biomasa también toma el nombre de acuerdo con el sector en el que la actividad humana la genera, esta puede ser de origen agrícola, forestal e industrial y se deriva de ella gran cantidad de energía renovable, limpia y sostenible debido a su transformación (Nogués y col., 2010; Mohan y col., 2006).

De acuerdo con dicha transformación y el modo en que de la biomasa se puede obtener energía, puede ser, sólida, húmeda y biocarburante (Jianglong y col., 2020). La biomasa sólida es extraída directamente de los ecosistemas naturales y cultivos energéticos (biomasa primaria) y de residuos de operaciones silvícolas, residuos generados por la actividad agrícola, como podas o paja y los residuos industriales del procesamiento de la madera y/o agroalimentarias (biomasa secundaria) (Praveen y col., 2016), todas ellas fuentes de materia orgánica en estado sólido, de las cuales se puede extraer energía mediante procesos termoquímicos, tales como la pirolisis, la gasificación o la combustión, para la obtención de biocombustibles sólidos (Liu y col., 2011). La biomasa húmeda, que en su mayoría es residual (secundaria) es aquella con alto contenido de humedad, y que, por su procedencia y composición, permite que la materia orgánica sea fácilmente degradable mediante procesos bioquímicos, se trata de residuos alimenticios, ganaderos como los purines, residuos urbanos, como la parte orgánica de la basura y los flujos residuales con alta carga orgánica (Mohan y col., 2006). La biomasa biocarburante se encuentra dentro de la llamada biomasa terciaria, puesto que no se obtiene directamente de un ecosistema



natural y tampoco es subproducto de actividades humanas, sino que es convertida en biocombustibles que proporcionan un alto poder calórico, esta biomasa biocarburante o terciaria, es biomasa procesada, o transformada por medio de procesos biológicos como la fermentación y la digestión anaerobia a partir de fuentes primaria y secundaria (Searchinger y col., 2008; Praveen y col., 2016).

### **Tecnología de plasma.**

La palabra plasma se ha utilizado para describir una amplia variedad de partículas y moléculas neutras interactuando en forma ionizada (Sileshi y col., 2016). Este término fue acuñado por primera vez en 1929 por Langmuir (Pankaj y col., 2017) que lo definió como un gas ionizado, casi neutro, compuesto principalmente de fotones, iones y electrones libres, así como átomos en sus estados fundamentales o excitados con una carga neta neutra (Cools y col., 2014), se le conoce habitualmente como el cuarto estado de la materia.

Los plasmas se subdividen frecuentemente en 2 vertientes, las cuales son: plasmas con equilibrio termodinámico, llamados también térmicos, de alta temperatura o calientes y los plasmas en donde no existe un equilibrio termodinámico, no térmico, de baja temperatura o frío.

### **Plasmas fríos.**

En lo que respecta al plasma no térmico o plasmas frío, se define como un plasma que no está en equilibrio termodinámico, porque la temperatura de los electrones es mucho más alta que la temperatura de las especies pesadas (iones y especies neutras). Un tipo de plasma frío común es el gas de vapor de mercurio dentro de una lámpara fluorescente, donde los electrones del gas que se encuentra ionizados alcanzan una temperatura de 20,000 K (19,700 ° C; 35,500 ° F), mientras que el resto del gas, iones y átomos neutros se mantiene apenas por encima de la temperatura ambiente, por lo que la bombilla puede tocarse incluso con las manos mientras funciona (Bao y col., 2020).

Este tipo de plasmas es generado por una descarga eléctrica en un gas, es decir, la aplicación de un campo eléctrico a un gas neutro, que asegura la ionización parcial del gas y de este modo las partículas cargadas creadas se aceleran en el campo eléctrico aplicado. Especialmente los electrones, se ven afectados por el campo debido a su masa despreciable, obteniendo una mayor cantidad de energía, por lo que alcanzan altas temperaturas (105-106 K), mientras que los iones pesados intercambian eficientemente su energía por colisiones con el gas de fondo y, por lo tanto, permanecen fríos. La temperatura del gas es inferior a 473 K. En la colisión entre electrones energéticos y moléculas neutras, se crean radicales. Estos radicales juegan un papel importante en la actividad química del plasma. Gracias a la baja temperatura, el tratamiento con plasma puede ser utilizado en la superficie de materiales sensibles que son sensibles al calor, por ejemplo en los biopolímeros, en donde lo típico son las modificaciones superficiales a baja presión ( $10^{-3}$  -1000 Pa), ya que la descarga es más estable y las reacciones plasmáticas son más fáciles de controlar, (Hung y col., 2018; Kulawik y col., 2018; Zilley col., 2015).

Estos plasmas generan un gran número y diversidad de especies reactivas que activan procesos físicos y químicos difíciles de conseguir en entornos químicos habituales u ordinarios, por ello, es posible que los procesos industriales se puedan realizar de forma más eficiente y barata, además por medio de este proceso se reducen la contaminación y los residuos tóxicos generados (Gordillo y col., 2008; Tanarro y col., 2010).

### **Interacciones del plasma frío en las superficies.**

Las diferentes interacciones del plasma frío con la materia conducen a diferentes estrategias de tratamiento de superficie, a continuación, se presentan brevemente (Figura 3):

Tratamiento con plasma por activación: En este tratamiento con plasma se utilizan gases inertes. Como resultado, se introducen funcionalidades químicas en las superficies o se crean radicales libres. Estos radicales se pueden usar para la reticulación o el injerto en las

superficies. Típicamente, se usan gases como Ar, He, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> y CF<sub>4</sub>. Las funcionalidades introducidas se pueden usar posteriormente para unir polímeros u otras moléculas. Frecuentemente, el tratamiento con plasma se usa solo para obtener superficies más hidrofílicas (Centre y col., 2013; Cools y col., 2014; Mariotti y col., 2016).

Injerto de plasma: Se sabe que el uso de plasma He y Ar introduce principalmente radicales en la superficie, sin embargo, si estos radicales libres se someten al aire de la atmósfera o al O<sub>2</sub>, se formarán peróxidos e hidroperóxidos. Esas funcionalidades se pueden usar posteriormente para iniciar una reacción de polimerización, utilizando un monómero, pero en este caso, este monómero no se somete al plasma y, por lo tanto, los polímeros injertados tendrán la misma composición que los polímeros logrados por polimerización convencional (Minati y col., 2017; Zille y col., 2015).

Polimerización por plasma: Un monómero se introduce en el plasma y forma una fase gaseosa, posteriormente se convierte en fragmentos reactivos, estos pueden combinarse con polímeros en la fase gaseosa (polimerización en estado de plasma) (García y col., 2012).

### TECNOLOGÍA DE PLASMA FRÍO

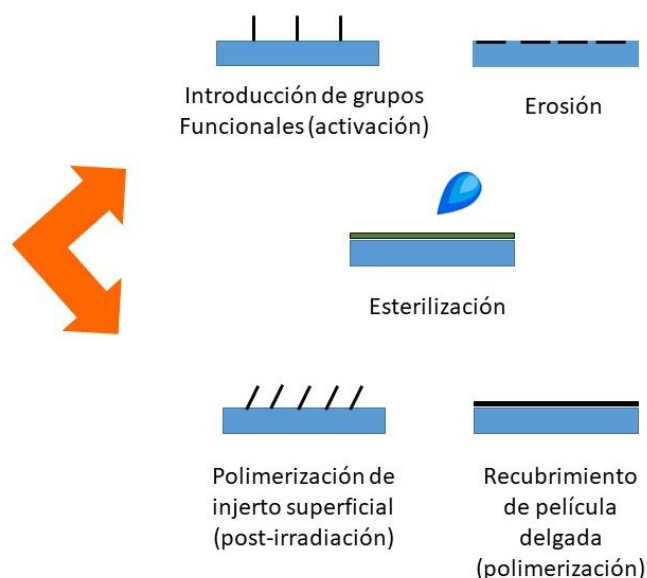


Figura 3. Ejemplos de interacción del plasma frío en la superficie de los materiales.

Erosión de superficie: Otra técnica, que puede generar una modificación superficial es, mediante la erosión por plasma, la cual se basa en el desgaste de una superficie mediante la remoción de la última capa superficial del material por el bombardeo simultáneo de iones (García y col., 2012).

### **Plasma y energías renovables.**

#### **La tecnología de plasma en la energía solar.**

Para la obtención concentrada de energía solar se han utilizado dispositivos parabólicos o paneles solares, en los cuales la irradiación solar se concentra en su material fotocatalizador, los haces de luz se reflejan en celdas o espejos solares seriados que reflejan los rayos del sol y los concentran hasta 80 veces más (Jianglong y col., 2020; Múgica-Vidal y col., 2017), con el uso, los dispositivos solares se ven expuestos a condiciones ambientales extremas, lluvia, granizo, etc. Por esta razón es necesario colocar una capa protectora para aumentar las propiedades del espejo y extender su vida útil (Masuko y col., 2007).

La eficiencia de la central solar depende de la intensidad de la potencia de reflexión y de la exacta posición de los espejos en conexión con el sol (Alurralde y col., 2004). Cada revestimiento convencional de polímeros para la protección contra la corrosión adicional reduce la eficacia y, con ello, su rendimiento (Foad y col., 2018). Por esto el uso de plasma como revestimiento protector contra la corrosión confiere una solución innovadora que contribuye a mejorar la superficie de los espejos térmicos o paneles solares, por ejemplo, se han utilizado técnicas de revestimiento superficial utilizando monómeros de ácido láctico para producir un recubrimientos de ácido poliláctico (PLA) como un material de recubrimiento cristalino o monómeros de propileno para la generación de polipropileno que generan una protección fiable y duradera contra la corrosión e incluso a altas temperaturas (Carvajal y col., 2019).

Los materiales fotocatalizadores que conforman la superficie del espejo térmico o panel solar deben tener un adecuado potencial redox, de modo que sean suficientemente positivos como para hacer factible la mineralización de la materia orgánica (Datas y col., 2013), su foto-activación debe caer dentro del intervalo de luz visible-UV cercano para poder aprovechar la luz solar, además de presentar resistencia a la fotocorrosión, baja toxicidad y elevada área activa (Carvajal y col., 2019), por este motivo, se ha descrito que la polimerización con plasma de diferentes monómeros podrían proporcionar un recubrimiento en los fotocatalizadores, lo cual podría conferir una mayor resistencia y durabilidad al dispositivo (Alurralde y col., 2004; Carpentier y col., 2005).

#### **Polimerización por plasma en superficies de vidrio.**

La técnica de polimerización por plasma se ha implementado en algunos países como Alemania para promover modificaciones en las propiedades funcionales de los sustratos de vidrio mediante la aplicación de recubrimientos por plasma (Foad y col., 2018), algunas de estas propiedades conferidas al material son el aumento simultáneo de hidrofugación, tratamiento que sirve para dificultar la filtración de agua o vapor de agua mediante la aplicación de un revestimiento impermeable, o el empleo de un aditivo adecuado (Alurralde y col., 2004), la resistencia al desgaste, mejorando así la adecuación del material, lo que genera gran ventaja puesto que extiende la vida útil del material y preserva sus características por más tiempo (Carpentier y col., 2005).

Desde el punto de vista de la hidrofugación, esta se ve favorecida por el uso de materiales con baja energía superficial (Carvajal y col., 2019), en este sentido, los recubrimientos con materiales basados en fluorocarburo se han convertido en un importante punto de atención en los últimos años, ya que este material rico en Flúor tiende a presentar un carácter hidrófugo debido a la baja reactividad de los enlaces C-F expuestos en la superficie del material (Tierriza y col., 2012), sin embargo, la escasa reactividad y la baja energía superficial de este tipo de materiales pueden dar lugar a problemas de adhesión al sustrato

(Iwamori y col, 2010; Sever y col., 2011), por ello, es conveniente utilizar estos precursores mediante el uso de la tecnología de plasma y en combinación con otro material que promueva su adhesión y gobierne la respuesta mecánica de la superficie del material ya sea plástico, metálico, cerámico o vidrio (Carpentier y col., 2005; Searchinger y col., 2008).

El recubrimiento de la superficie del material por tratamiento de polimerización con plasma, requiere que el compuesto que conformará el recubrimiento sea colocado en una cámara junto con el gas que formará el plasma (gas de proceso) (Jung y col., 2916), formándose una capa extrafina del compuesto sobre el material base, el cual no modifica el aspecto del producto final (Foad y col., 2018), durante este proceso el compuesto se adhiere a la superficie del material por medio de fuerzas de atracción y fuerzas intermoleculares de Van der Waals (Figura 4) (Masuko y col., 2007), otros compuestos que pueden utilizarse para formar el recubrimiento son politetrafluoroetileno (PTFE) añadiendo tetrafluoruro de carbono (CF<sub>4</sub>) (Múgica-Vidal y col., 2017). Esta técnica de polimerización por plasma se ha utilizado, además de extender la vida útil de los materiales utilizados para la fabricación de celdas solares, en la fabricación de textiles, biochips y tanques de combustible, entre otros (Tierraza y col., 2012).

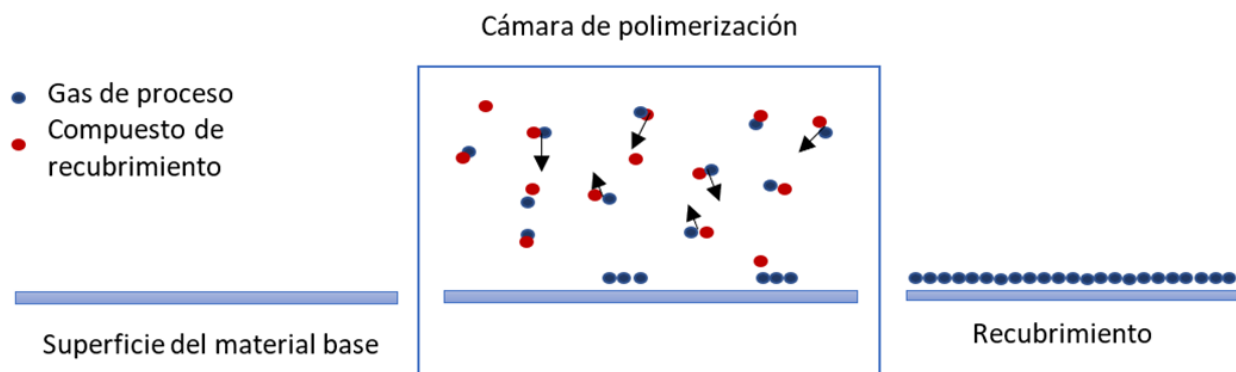


Figura 4. Proceso de recubrimiento de superficies por plasma.



### **La tecnología de plasma atmosférico en la energía eólica.**

La eficacia de las instalaciones eólicas depende de su forma constructiva, y en especial, de sus dimensiones. Actualmente se construyen instalaciones con una potencia de hasta 10 megavatios y palas con dimensiones de hasta 90 metros de largo (Nogués y col., 2010). La tecnología necesaria para la fabricación de una instalación eólica se asemeja en muchos campos a la tecnología aeronáutica, en la estabilidad mecánica, así como el flujo en el perfil dependen del diseño de la pala, al igual que en la aeronáutica, la velocidad tangencial en el extremo de la pala produce exigencias sobre el material, quedando expuesto ante turbulencias del aire en el rango ultrasónico o la deposición de hielo (Carvajal y col., 2019). Por ello, los materiales utilizados para la fabricación de modernos rotores para centrales eólicas requiere ciertas especificaciones como lo son: utilizar materiales ligeros, estructuras altamente resistentes, superficies lisas libres de turbulencias, de alta calidad y estabilidad superficial (Ahmed y col., 2018). Estos requisitos pueden ser cubiertos con el uso de plásticos reforzados con fibras de vidrio (PRFV) y plásticos reforzados con fibras de carbono (PRFC), al igual que es utilizado en la industria aeronáutica (Ali y col., 2018), el tratamiento con plasma atmosférico ofrece una solución efectiva que confiere al material las características necesarias para aumentar su rendimiento y extender su vida útil (Tabla 1). El plasma atmosférico le proporciona al material de construcción de las palas un acabado firme y resistente, utilizado en el proceso de laminado, en el pegado de cubiertas y en el pretratamiento de la superficie de las piezas (Datas y col., 2013).

El tratamiento de la superficie con plasma frío es un proceso utilizado para modificar las características de la superficie de materiales metálicos y poliméricos, representando una alternativa eficiente y limpia para activar los materiales poliméricos. Hoy en día existen múltiples aplicaciones del plasma frío, es usado para el endurecimiento de matrices o metales, fabricación de circuitos integrados semiconductores, tratamiento anticorrosión, térmico o eléctrico, el tratamiento de los materiales con plasma frío permite mejorar las

propiedades mecánicas, reforzar la adhesión entre las fibras y la matriz dando la posibilidad de modificar las características de la superficie del material sin afectar sus propiedades (Adhamash y col., 2020; Carrino y col., 2002).

El tratamiento con plasma frío sobre las palas de los aerogeneradores consiste en un continuo bombardeo de partículas de plasma a la superficie del material acompañado de radiación electromagnética que forma una interacción dinámica entre el flujo del gas y la superficie del material, produciendo también un aumento de la rugosidad de la superficie, un fenómeno muy importante que puede ser explotado con propósitos adhesivos. La rugosidad aumenta el número de enlaces químicos entre el revestimiento que forma el plasma frío y el sustrato (Figura 5). El bombardeo y radiación emitida por las partículas de plasma causa una ruptura de las macromoléculas del polímero y la simultánea creación de radicales libres, formando así una capa polimérica reticulada que aumenta la tensión superficial (Kehrer y col., 2020; Adhamash y col., 2020; Carrino y col., 2002).

En México este tratamiento se encuentra solo en etapa de investigación, en contraste con países como Suecia, Suiza, siendo Alemania uno de los principales países fabricantes y proveedores de la tecnología de plasma, así como prestadores de servicios para el tratamiento de superficies a nivel mundial (Kehrer y col., 2020; Bengi y col., 2009).

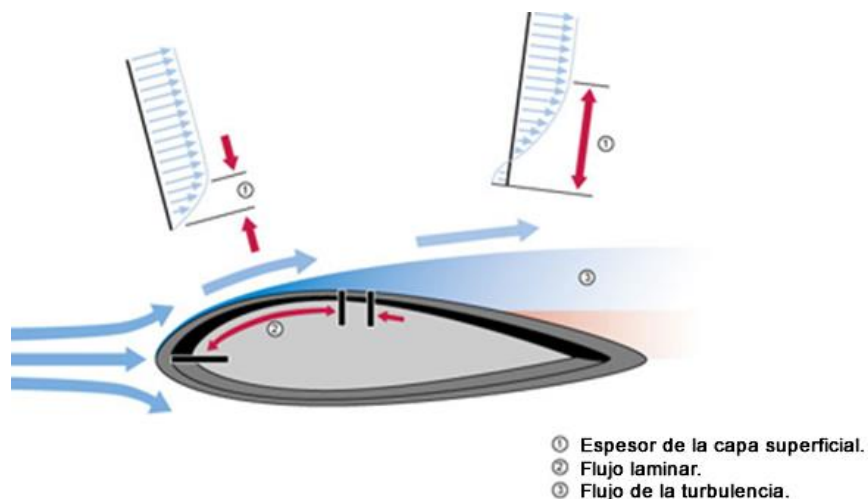


Figura 5. Esquema del rozamiento de la superficie del aire con las palas.  
 Fuente: <http://sauron.etse.urv.es/public/PROPOSTES/pub/pdf/2629pub.pdf>

**Tabla 1.** Tratamientos por plasma atmosférico, efecto superficial (azul) e interior (verde) (Kehrer y col., 2020).

| Tratamiento | Efecto                          | Acción   |
|-------------|---------------------------------|--|
| Superficial | Limpieza                        | Evita el uso de disolvente halogenado tóxicos, operando a bajas temperaturas.  |
| Superficial | Decapado                        | Eliminación de material superficial para creas un relieve. Se utiliza Helio para estabilizar la descarga.  |
| Superficial | Activación                      | Adición de funcionalidades químicas a la superficie del sustrato que le confiere propiedades específicas mediante cambios en su energía superficial.                             |
| Superficial | Recubrimiento                   | Deposición de funcionalidades sobre el material manteniendo sus propiedades interiores.  |
| Interior    | Tratamiento de polvos           | Síntesis de partículas a elevadas temperaturas y reactividad de una corriente de plasma.   |
| Interior    | Tratamiento de residuos tóxicos | Las altas temperaturas inducen la pirolisis de desechos orgánicos, mientras que los inorgánicos funden y vitrifican, se reduce su volumen y aumenta la facilidad de eliminación. |
| Interior    | Maquinado                       | Se aplica a altas temperaturas, se utiliza un gas inerte (Ar, He) para evitar contaminación.   |

### Modificación superficial por plasma en fibras de biomasa lignocelulósica.

Las fibras lignocelulósicas son parte de la pared celular vegetal, su estructura se encuentra altamente entrelazada, lo que dificulta su acceso, pero al llegar a ella proporcionan una materia prima bioenergética apta para la producción de biocarburantes (Ali y col., 2018). La modificación superficial con plasma frío es una tecnología que puede incrementar la resistencia térmica de la materia prima orgánica, debido a la remoción de compuestos volátiles presentes en las fibras y además promueve la asimilación de la naturaleza química de la matriz polimérica, dando lugar a una tecnología sustentable y no contaminante (Alonso y col., 2017; Mohan y col., 2006).

El uso de disolventes orgánicos para el pretratamiento de las fibras lignocelulósicas implica la generación de residuos tóxicos, el plasma supone un proceso rápido, amigable con el medio ambiente y seco (Mohan y col., 2006), el uso de plasma frío de gases neutros o reactivos, iones y electrones proporciona una polimerización que actúa modificando la naturaleza fisicoquímica sin afectar sus propiedades intrínsecas del polímero natural, proporcionando un recubrimiento directo en la superficie e introduciendo nuevas funcionalidades al material a través de la ruptura de enlaces en su superficie que reaccionan con las especies activas como iones o radicales presentes en el plasma (Praveen y col., 2010; Alonso y col., 2017), este recubrimiento consta de una fina capa funcional en la superficie del sustrato, el polímero de plasma se forma a partir de fragmentos de monómeros bajo la influencia del plasma (gas ionizado). La Tabla 2 muestra algunos ejemplos de gases y monómeros que pueden ser utilizados en el proceso de polimerización por plasma, en la cual se definen características con las que se dota al material base (Fránces y col., 2012).

**Tabla 2.** Gas/monómero aplicado para el tratamiento superficial por plasma en el material base (Carrino y col., 2002).

| Gas/monómero  | Funcionalidad de la capa generada |
|---|-----------------------------------|
| Hexametildisiloxano (HMDSO)                           | Repelencia a líquidos             |
| Tetraoxisiloxano (TEOS)                               | Repelencia a líquidos             |
| Tetraoxisiloxano (TEOS) + Oxígeno (O <sub>2</sub> )   | Barrera de gases                  |
| Tetrafluoruro de Carbono (CF <sub>4</sub> )           | Hidrofobicidad                    |
| Metano (CH <sub>4</sub> ) + Oxígeno (O <sub>2</sub> ) | Hidrofobicidad                    |
| Ácido acrílico + Oxígeno (O <sub>2</sub> )            | Antiestática                      |
| Acrilonitrilo   | Absorción de agua/colorantes      |
| Polianilina (PANI) + Oxígeno (O <sub>2</sub> )        | Conductividad eléctrica           |

## Conclusión.

El tratamiento con plasma es un método prometedor para mejorar las propiedades superficiales de diversos materiales, esto genera un impacto de gran importancia en la industria y en el desarrollo de energías renovables, además esta tecnología se considera ambientalmente amigable y limpia, sin embargo, de acuerdo con esta breve revisión esta tecnología solo se encuentra en etapa de investigación. En esta revisión se estudió la capacidad de las técnicas de modificación con plasma frío utilizadas para tratar diferentes materiales enfocados al desarrollo de diversas energías y las perspectivas que existen hasta el día de hoy para ser explotadas. La elección de la técnica de tratamiento con plasma dependerá de la aplicación del material. El análisis de la literatura abrió el panorama para constatar la eficacia de diferentes técnicas de modificación por plasma como herramientas versátiles para aplicaciones en la ciencia de los materiales y las energías renovables.

## Referencias

- Adhamash, E., Pathak, R., Chen, K., Rahman, T. (2020). High-energy plasma activation of renewable carbon for enhanced capacitive performance of supercapacitor electrode. *Electrochimica Acta*. 362: 137148.
- Ali, S., Gaona, G., Taweekun, J., Techato, K., Waewsak, J., Gyawali, S. (2018). "GIS based site suitability assessment for wind and solar farms in Songkhla, Thailand". *Renewable Energy Reviews*. 132: 1360– 1372.
- Ahmed-Solangi, Y., Tan, Q., Waris, A., Hussain-Mirjat, N., Ahmed, I. (2018). The Selection of Wind Power Project Location in the Southeastern Corridor of Pakistan: A Factor Analysis, AHP, and Fuzzy-TOPSIS Application. *Energy*. 11 (8).

- Alonso, M. F., Narro, C. R., Castañeda, A. O. (2017). Efectos de la Modificación Superficial por Plasma en Fibras Lignocelulósicas y su Aplicación. *Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila*. 9: 21-26.
- Alurralde, M., Barrera, M., Bolzi, C. (2004). Últimos desarrollos relacionados con la fabricación y el ensayo de paneles solares y componentes para usos espaciales. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente (ASADES)*. 8:1-6.
- Bao, T., Hao, X., Rezaul, M., Shishir, I., Karim, N., & Chen, W. (2020). Cold plasma : An emerging pretreatment technology for the drying of jujube slices. *Food Chemistry*. 337.
- Bengi, K., Aysun-Cireli, A., Mehmet, M. (2009). "Surface modification and characterization of cotton and polyamide fabrics by plasma polymerization of hexamethyldisilane and hexamethyldisiloxane". *International Journal of Clothing Science and Technology*. 104: 2318-2322.
- Carrino, L., Moroni G., Polini W., (2002). Cold plasma treatment of polypropylene surface: a study on wettability and adhesión. *Process. Technol.* 121: 373–382.
- Carpentier, J., & Grundmeier, G. (2005). Chemical structure and morphology of thin bilayer and composite organosilicon and fluorocarbon microwave plasma polymer films. *Surface and Coating Thechnology*. 192: 189-198.
- Carvajal, E. E., Muñoz, G. J. y Rivera, S. (2019). Optimización de la operación de una microgrid considerando el costo de operación, la vida útil de las baterías y el costo de incertidumbre de energía eólica. *Entre Ciencia e Ingeniería*. 13: 23-34
- Centre, C. C., & Sarmadi, M. (2013). Advantages and Disadvantages of Plasma Treatment of Textile Materials. *International Symposium on Plasma Chemistry*. 25:7–10.



- Cools, P., Van Vrekhem, S., De Geyter, N., & Morent, R. (2014). The use of DBD plasma treatment and polymerization for the enhancement of biomedical UHMWPE. *Thin Solid Films*. 572: 251–259.
- Datas, A., Chubb, D. L. & Veeraragavan, A. (2013). Steady state analysis of a storage integrated solar thermophotovoltaic (SISTPV) system. *Sol. Energy* 96: 33–45.
- Encinas, N., Martínez, M. Abenojar, J. (2012). Modificación superficial de materiales poliméricos mediante fuentes de plasma frío. *Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química*. 1:328-339.
- Fargione, J. et al. (2008). “Land clearing and the biofuel carbon debt”. *Science*. 319:1235-1238
- Foad, H., Gandomana, A., Adel, M. Sharaf, Pierluigi S. (2018). Review of FACTS technologies and applications for power quality in smart grids with renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 82: 502-514.
- Frances, J., Gisbert, S. (2012). Application of the plasmapolimerization technology in textiles substrates for technical. *Science and technology*. 1: 1-16.
- García, E., Correcher, A., Quiles, E., Morant, F. (2016). Recursos y sistemas energéticos renovables del entorno marino y sus requerimientos de control. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*. 13: 141–161.
- García, E. S., Fernando, T., Elías, A., Marcos, G. (2012). Estudio de procesos de plasma-polimerización de recubrimientos antifricción sobre materiales plásticos. Tesis. 114.
- Gordillo-Vázquez, F. (2008). Plasmas fríos. *Investigación y Ciencia*. 381: 70–79.
- Hung, Y. W., Chen, H. L., Lee, L. T., Tung, K. C., Bau, D. T., Wong, Y. K. (2018). Effects of non-thermal plasma on sandblasted titanium dental implants in beagle dogs. *Journal of the Chinese Medical Association*. 81: 920–925.

- Iwamori, S., Hasegawa, N., Kormunda, M. (2010). Friction and adhesion properties of fluorocarbon polymer thin films prepared by magnetron sputtering. *Vacuum*. 84: 592-596.
- Jung, J., Jo, J.W., Juang, E. (2016). Recent progress in high efficiency polymer solar cells by rational desing and energy level tuning of low bandgap copolymers with various electron-withdrawing units. *Organic Electronics*. 31: 149-170.
- Jianglong, L, Jiashun, H. (2020). The expansion of China's solar energy: Challenges and policy options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 132.
- Kehrer, M., Rottensteiner, A., Hartla, W. (2020). Cold atmospheric pressure plasma treatment for adhesion improvement on polypropylene surfaces. *Surface and Coatings Technology*. 403: 126389
- Kulawik, P., Alvarez, C., Cullen, P. J., Aznar-Roca, R., Mullen, A. M., & Tiwari, B. (2018). The effect of non-thermal plasma on the lipid oxidation and microbiological quality of sushi. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 45: 412–417.
- Larios-Vázquez, A. (2015). Desarrollo y perspectivas de energía renovable en México. *Economía Informa*. 1.
- Liu, G. et al. (2011). Making Fischer-Tropsch Fuels and Electricity from Coal and Biomass: Performance and Cost Analysis. *Energy & Fuels*. 25: 415-437.
- Mariotti, D., Belmonte, T., Benedikt, J., Velusamy, T., Jain, G., Švrček, V. (2016). Low-Temperature Atmospheric Pressure Plasma Processes for “Green” Third Generation Photovoltaics. *Plasma Processes and Polymers*. 13: 70–90.
- Masuko, M., Miyamoto, H., & Suzuki, A. (2007). Tribological characteristics of self-assembled monolayer with siloxane bonding to Si surface. *Tribology International*. 40: 1587-1596.
- Minati, L., Migliaresi, C., Lunelli, L., Viero, G., Dalla Serra, M., Speranza, G. (2017). Plasma assisted surface treatments of biomaterials. *Biophysical Chemistry*. 229: 151–164.

- Mohan, D. et al. (2006). Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review. *Energy & Fuels*. 20: 848-889.
- Múgica-Vidal, R., alba-Elías, F., Sainz-García, E. (2017). Reducing friction on glass substrates by atmospheric plasma-polymerization of APTES. *Surface and Coating Technology*. 309: 1062-1071.
- Nogués, F.S., García-Galindo, D., Rezeau, A. (2010). Energías Renovables. Energía de la Biomasa. *Zaragoza, España: Prensas Universitarias de Zaragoza*. 1.
- Oswald, Ú. (2017). Seguridad, disponibilidad y sustentabilidad energética en México. *Revista Mexicana de Ciencias Políticas y Sociales*. 62: 155–195.
- Paris, O., Zollfrank C., Zickler G. (2005). Decomposition and carbonisation of wood biopolymers— A microstructural study of softwood pyrolysis. *MPG. Pure Publication Repository*. 43: 53–66.
- Praveen, K. M., Thomas, S., Grohens, Y., Mozetic, M., Junkar, I., Primc, G., Gorjanc, M. (2016). Investigations of plasma induced effects on the surface properties of lignocellulosic natural coir fibres. *Appl. Surf. Sci*. 368: 146-156.
- Searchinger, S., Heimlich, T., Houghton, R., Dong, R.A., Elobeid, F., Fabiosa, A., Tokgoz, J., Hayes, S. (2008). Use of US croplands for biofuels increase greenhouse gases through emissions from land-use change. *Science*. 319: 1238- 1240.
- Sever, K, Erden S, Gülec HA, Seki Y, Sarikanat M. (2011). Oxygen plasma treatment of jute fibers in improving the mechanical properties of jute/HDPE composites. *Mater. Chem. Phys*. 129: 275-280.
- Recalde, M. Y., Bouille, D. H., Girardin, L. O. (2015). Limitaciones para el desarrollo de energías renovables en argentina. *Problemas Del Desarrollo*. 46: 89–115.

- Romo-Fernández, L. M. R., Guerrero-Bote, V. P., Moya-Anegón, F. (2013). Análisis de la producción científica española en energías renovables, sostenibilidad y medio ambiente (Scopus, 2003-2009) en el contexto mundial. *Investigacion Bibliotecologica*. 27: 125–151.
- Tanarro, I. (2010). Plasmas fríos moleculares en el Universo y en el laboratorio. *Revista Española de Física*. 24: 16–19.
- Thiry, D., Konstantinidis, S., Cornil, J., Snyders, R. (2016). Plasma diagnostics for the low-pressure plasma polymerization process: A critical review. *Thin Solid Films*. 606: 19–44.
- Tierra, A., Álvarez, R., Borrás, A. (2012). Roughness assessment and wetting behavior of fluorocarbon surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science*. 376: 274-282.
- Vázquez, A. L. (2015). Desarrollo y perspectivas de energía renovable en México. *Economía Informa*. 390: 132–135.
- Zhou Z, Wang J, Huang X, Zhang L, Moyo S, Sun Sy Qiu, Y. (2012). Influence of absorbed moisture on surface hydrophobization of ethanol pretreated and plasma treated ramie fibers. *Appl. Surf. Sci*. 258: 4411-4416
- Zille, A., Oliveira, F. R., Souto, P. A. P. (2015). Plasma treatment in textile industry. *Plasma Processes and Polymers*. 12: 98–131.