



UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE MORELOS
ESCUELA DE ESTUDIOS SUPERIORES DE XALOSTOC
LICENCIATURA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Efecto generado por la aplicación de plasma frío
sobre el compuesto polímero de silicón con un
material dopante R812.

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO
INGENIERO INDUSTRIAL.

QUE PRESENTA:
FERNANDO AVELAR DOMÍNGUEZ

Director: Dr. Fidel Benjamín Alarcón Hernández.

Codirector: Dra. María del Carmen Fuentes Albarrán.

Junio 2024

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Fidel Benjamin Alarcon Hernandez quien fue mi tutor de tesis y profesor de la carrera, un excelente ser humano con gran vocación de enseñanza. Le agradezco por su tiempo, paciencia, dedicación y todo el apoyo brindado a lo largo de este trayecto.

A la Dra. Myriam Paredes Olguin por brindarnos las herramientas y materiales (polímeros) necesarios para la realización de este proyecto, con el cual doy por culminada mi formación univesitaria.

A los honorable miembros del jurado por brindarme apoyo y de su presiado tiempo: Dr. Fidel Benjamín Alarcón Hernández, Dra. María Del Carmen Fuentes Albarrán, Dr. Esteban Montiel Palacios, Dr. Félix David Olivos Juárez y al Ing. Alejandro Hernández Hernández.

A mi querida universidad, lugar donde tuve la oportunidad de conocer a grandes personas y lograr crecimiento a nivel personal y profesional.

A mi esposa Alba Deni Trejo Sánchez quien ha estado presente en mi vida, brindándome siempre su amor y apoyo incondicional. Mi compañera de vida y madre de mi hija.

A mis padres que han sido un pilar fundamental en mi formación, brindándome su amor incondicional y las herramientas necesarias con las cuales he salido adelante.

Y quiero brindar un agradecimiento especial a la Maestra Alba María Antonieta Sánchez Villalva, por su apoyo y por ser una de las personas que más influyó para que culminara mis estudios universitarios y pudiera llegar a ser un profesional.

ÍNDICE

Lista de figuras	2
Lista de gráficas	4
Lista de tablas	5
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	6
1.2. Hipótesis	9
1.3. Objetivos.....	9
1.3.1. Objetivo general	9
1.3.2. Objetivos particulares.....	9
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	10
2.1. Antecedentes del plasma	10
2.2. Plasma	11
2.2.1. Descarga corona	12
2.2.2. Aplicación de corona continua	13
2.2.3. Plasma no térmico o frío.....	14
2.2.4. Plasma térmico o caliente.....	15
2.3. Polímeros	16
2.3.1. Construcción de un polímero	17
2.4. Clasificación de los polímeros	17
2.4.1. Naturales	17
2.4.2. Sintéticos	18
2.5. Compósito polímero/silicón	18
2.6. Hidrofobicidad (técnica de ángulo de contacto)	19
2.7. Espectrofotometría infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).....	20
2.8. Microscopía electrónica de barrido por emisión de campo (FESEM)	22
CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	25
3.1. Dispositivo experimental	25
3.2. Obtención de muestras de compósito.....	26
3.3. Exposición de muestras al plasma	27
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30

4.1. Hidrofobicidad	30
4.2. Cambio en la masa	32
4.3 Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier	35
4.4. Microscopía electrónica de barrido por emisión de campo- FESEM.....	41
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	43
BIBLIOGRAFÍA	45

Lista de figuras

FIGURA 2.1. Ángulo formado entre la interfase. ([Martínez y Ferrer], 2022).....	20
FIGURA 2.2. Partes del interferómetro de Fourier (FTIR) (Centro de astrobiología, 2015)	21
FIGURA 2.3. Componentes del microscopio electrónico de barrido FESEM. (Laboratorio nacional de investigaciones en nanociencias y nanotecnología, 2018).....	23
FIGURA 3.1. Diagrama de dispositivo generador de plasma.	25
FIGURA 3.2. Dispositivo generador de plasma.	26
FIGURA 3.3. Exposición de una muestra de compósito de interés al plasma.....	27
FIGURA 3.4. Angulo de contacto formado por la superficie de la muestra tratada y una gota de agua.	28

Lista de gráficas

GRÁFICA 4.1. Cambio del ángulo de contacto de una gota de agua sobre la superficie de las muestras de silicón dopado, en función del tiempo de exposición al plasma.	30
GRÁFICA 4.2. Resultados de los ángulos medidos como función del tiempo de exposición al plasma del silicón puro. ...	32

GRÁFICA 4.3. Comparación del valor de las masas de las muestras dopadas antes y después de ser expuestas al plasma. La línea azul representa el valor de las masas de las muestras antes de ser expuestas al plasma, la línea anaranjada representa el valor de las masas de las muestras después de ser expuestas al plasma.....33

GRÁFICA 4.4. Comparación del valor de las masas de las muestras sin dopar antes y después de ser expuestas al plasma. La línea azul representa el valor de las masas de las muestras antes de ser expuestas al plasma, la línea anaranjada representa el valor de las masas de las muestras después de ser expuestas al plasma.....33

GRÁFICA 4.5. Se presenta la pérdida de masa de las muestras dopadas conforme se aumentó el tiempo de exposición al plasma.....34

GRÁFICA 4.6. Se presenta la pérdida de masa de las muestras sin dopar conforme se aumentó el tiempo de exposición al plasma.35

GRÁFICA 4.7. Resultados de las muestras dopadas mediante el estudio de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier.....36

GRÁFICA 4.8. Resultado del acercamiento a la región (550 - 650 cm^{-1})37

GRÁFICA 4.9. Resultado del acercamiento a la región (1630 – 1655 cm^{-1}).38

GRÁFICA 4.10. Espectro de infrarrojo de las muestras sin dopar.....39

GRÁFICA 4.11. Espectro infrarrojo de la muestra sin dopar en la región de silicio (550 – 650 cm^{-1}).40

GRÁFICA 4.12. espectro infrarrojo de la muestra sin dopar (grupo carbonillo).40

GRÁFICA 4.13. Espectros de muestras de silicón dopadas con tiempos de exposición41

GRÁFICA 4.14. Espectros de muestras de silicón puro con tiempos de exposición T = 0 min, T = 1 min y T = 5 min42

Lista de tablas

TABLA 2.1. Datos fisicoquímicos y características.19

TABLA 3.1. Parámetros de exposición de plasma para cada muestra.29

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, y gracias al crecimiento científico y de las nuevas tecnologías aplicada a los materiales, la economía del país va en crecimiento. La creación de nuevos materiales se ha convertido en parte importante de la economía de las sociedades y en la vida de las personas en los diferentes campos, primordialmente los materiales compuestos y los plásticos de alto rendimiento. Muchos de estos nuevos materiales conservan su naturaleza e incluso mejoran al grado de desarrollar nuevas propiedades, lo que los convierte en una parte esencial para el desarrollo de las nuevas tecnologías. (Paredes, Myriam et al., 2010) Estos nuevos materiales compuestos, además de tener un valor económico bajo, muestran una mejora notable comparados con su contraparte.

La nanotecnología, el procesamiento de materiales y los aisladores poliméricos son excelentes para el uso de exteriores de los sistemas de distribución eléctrica y sistemas de transmisión. Este tipo de aisladores compuestos están sustituyendo progresivamente a los aisladores convencionales debido a sus ventajas de costo, resistencia al vandalismo, menor tiempo de instalación, y fácil transporte. (Paredes, Myriam et al., 2010)

Al tratarse de materiales orgánicos, la contaminación y las descargas eléctricas superficiales hacen que se encuentre sujeto a una degradación o envejecimiento. En particular las descargas eléctricas provocadas por una mala distribución del campo eléctrico a lo largo del aislador, o bien, por un campo local intenso aunado a la presencia de contaminación del ambiente donde se encuentra (humedad). (Paredes, Myriam et al., 2010) Aunque cabe mencionar la capacidad de estos polímeros en las primeras etapas para aportar un mayor rendimiento en exteriores contaminados sobre los demás aislantes.

La baja permitividad y la geometría continua de los aisladores poliméricos resultan en un cambio notable de los gradientes de tensión, en especial de los extremos del aislador.

Satisfaciendo en ocasiones parámetros que rebasan el umbral de generación parcial de descargas eléctricas (30 KV/cm) que dañan gradualmente el plano del material, haciendo que las zonas cercanas a los electrodos tengan un daño mayor en el aislador.

El aire es utilizado como medio aislante el cual rodea a los aisladores compuestos. Dado que la resistencia eléctrica de los materiales sólidos es mayor a la resistencia que ejerce el aire, inicialmente las descargas parciales se desarrollan en áreas sometidas a la alta tensión de campo debido a que se encuentran rodeadas por el aire (accesorio y/o conductor).

La exposición del material al efecto corona genera cambios tanto estructurales como de sus propiedades, se engloban en el concepto de “fatiga eléctrica”. Para evitar problemas generados por descargas superficiales y que sean menos frecuentes se reduce el gradiente de campo eléctrico en el plano del material aislador, rectificando la conductividad térmica y sus propiedades dieléctricas mediante la añadidura de rellenos inorgánicos para aumentar la permisividad relativa y disipación térmica, minimizando los esfuerzos eléctricos y reduciendo los efectos de arqueo sobre el plano del material aislador. (Paredes, Myriam et al., 2010)

Sin dejar de lado el envejecimiento de los materiales poliméricos, es decir, la pérdida progresiva de atributos es un problema que limita el reemplazo total de aisladores cerámicos y vidrio por aisladores poliméricos, los problemas por degradación del plano polimérico pueden ser eliminados por medio del desarrollo de técnicas de diagnóstico y medición avanzada todo esto con el apoyo de fabricantes e investigadores en el área que apoyan la idea.

Implementar estrategias de desarrollo de productos para obtener beneficios tanto a usuarios como consumidores hace que el sector de los aislantes y conductores desarrolle productos funcionales y sustentables por medio de nano materiales. Por esta razón se emula el efecto corona debido a la aplicación en nanocompuestos poliméricos controlada de una atmosfera de plasma con atributos similares a las experimentadas en la

distribución eléctrica y sistemas de transmisión, con la finalidad de conocer los posibles efectos ventajosos de la incorporación de nano partículas en dieléctricos.

La finalidad de este proyecto es observar los cambios experimentados por el compósito polímero de hule silicón R812 después de haber sido expuesto a plasma de tipo frío, buscando ver las modificaciones generadas por tal exposición, entre ellas el envejecimiento, resistencia del material o alguna otra condición mecánica, eléctrica o de desgaste que lo afecten. Para esto se realizaron estudios como la espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), medidas de hidrofobicidad (mediante la técnica de ángulo de contacto) y microscopía electrónica de barrido por emisión de campo FESEM.

El presente trabajo de investigación se distribuye de la siguiente manera:

- Capítulo 1 Introducción. Brinda un concepto general del estudio y del cual se desea conocer sus aplicaciones, objetivos y novedades a partir del trabajo de investigación.
- Capítulo 2 Marco teórico. Se explican las diferentes formas de generación de plasma, las condiciones físicas, mecánicas y de erosión que poseen los polímeros y como son afectados por los cambios climáticos y por descargas de efecto corona.
- Capítulo 3 Desarrollo experimental. De manera detallada se explica cómo se llevó a cabo el proyecto, los equipos y materiales requeridos, tiempo de exposición de las diferentes muestras sometidas a plasma.
- Capítulo 4 Resultados y discusión. Se da a conocer los resultados obtenidos en el trabajo experimental, su análisis y la discusión de estos.
- Capítulo 5 Conclusiones. Se dan a conocer las conclusiones más sobresalientes de la investigación

1.2. Hipótesis

El compuesto polimérico de silicón (hule silicón/SiO₂) experimenta cambios cuando es expuesto a un plasma de aire a baja presión.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Establecer cuantitativa y cualitativamente los efectos en la superficie del ejemplar compuesto polímero/silicón (hule silicón/SiO₂) con material dopante R812 debido a la exposición ante un plasma de aire en la región descarga corona.

1.3.2. Objetivos particulares

1. Construir un sistema experimental para exposición del compuesto polímero/silicón (hule silicón/SiO₂) con material dopante R812 ante un plasma de aire a baja presión.
2. Exponer un compuesto polímero/silicón (hule silicón/SiO₂) con material dopante R812, ante un plasma de aire a baja presión generado con valores específicos de diferencia de potencial, corriente y distancia de separación entre electrodos.
3. Cuantificar los efectos en las muestras tras su exposición al plasma; respecto a su hidrofobicidad, cambio de masa, espectroscopia infrarroja y análisis de componentes mediante Microscopia electrónica de barrido por emisión de campo- FESEM.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del plasma

El origen del término moderno plasma en la ciencia de la física data de apenas inicios de siglo XIX, aunque ya hace algunos cientos de años se comenzaba a trabajar con él en una forma desconocida hasta 1668 cuando se buscaba electrificar ámbar, lo que provocó el surgimiento de una chispa (descarga eléctrica en el aire) dando así el primer dato conocido por el hombre, lo cual desató el interés de otros científicos que continuaron con el estudio del plasma. No fue hasta 1879 que se dio el reconocimiento al estado plasma como estado particular de la materia. El origen del plasma data de los inicios en el universo. Este se encuentra en las estrellas, asteroides, los planetas, el sol y el vacío en el universo.

Actualmente se han descubierto formas de generar plasma de manera artificial ya que naturalmente se genera, pero en condiciones extremas(como por ejemplo las descargas eléctricas también llamadas “relámpagos”), en condiciones altas de temperatura o en las luces generadas en el polo norte y otras partes del planeta llamadas “auroras”. (National Geographic, 2022) Entre la generación de plasma artificial se tiene el efecto corona producido por una descarga de corriente que ioniza las partículas de aire generando lo que se conoce como plasma, otra es ionizando un gas a temperaturas aproximadas a los $10,000^{\circ}$ K lo que significa que cualquier sustancia bajo estas condiciones se considera plasma y otra en particular generada por absorción de fotones la cual se produce debido a partículas de luz que desprenden electrones de los átomos y que chocan entre sí para provocar un proceso llamado fotoionización (Leguizamo, 2021).

2.2. Plasma

Se genera mediante la ionización de los átomos, que están conformados por protones los cuales están cargados positivamente y un valor equivalente de electrones los cuales poseen carga del tipo negativo. En su forma completa los átomos son enteramente neutros. La extracción de uno o varios electrones provoca que se genere una concentración mayor de carga positiva lo que se conoce como ion. En casos particulares, el ion puede ser núcleo atómico puro al cual se les desprenden todos los electrones circundantes. Una sustancia ionizada y que a su vez conserva parte de los electrones, pero que se desplazan libremente, se le considera plasma. (Alonso, 2022)

El plasma es el cuarto estado de la materia que se caracteriza por su alta energía. El estado sólido tiene una forma definida además de tener una estructura muy firme debido a la cohesión y fuerte atracción de sus átomos. Al exponer la sustancia a altas temperaturas elevada la estructura entre los átomos se vuelve débil a causa de la agitación térmica pasando así a otro estado que se conoce como líquido el cual ya no posee una forma definida, pero si ocupa un volumen definido. Al incrementar la temperatura los átomos de la sustancia tienden a liberarse debido a la poca fuerza de atracción entre si para de esta manera pasar al estado al estado gaseoso, donde no posee forma ni volumen fijos, ahora dependen de un recipiente que la contiene. Si la sustancia se calienta más producirá un cambio nuevo en el interior de los átomos, ya que comienzan a desprenderse de los electrones, hasta el grado de ionizarse y convertirse en un plasma. Al exponer el material a más temperatura, sus átomos viajan con mayor rapidez chocando unos con otros, en agitación puede originarse el desprendimiento de sus electrones orbitales, quedando solo los átomos ionizados y algunos electrones libres.

Es importante mencionar que el plasma no solo es generado por condiciones térmicas ya que también existen factores como, las descargas eléctricas el cual al aplicar un campo eléctrico muy fuerte a un gas ordinario desprende algunos electrones orbitales obteniendo así átomos ionizados y algunos electrones libres. Los átomos libres son acelerados por el campo eléctrico hasta chocar con otros átomos, desprendiendo algunos electrones y provocando un proceso de avalancha. A esto es a lo que se le conoce como

descarga eléctrica y un gas ionizado. Es un típico caso de plasma. (National Geographic, 2022)

Por medio de absorción de fotones se puede también obtener este estado ya que estas partículas de luz también pueden desprender los electrones de los átomos debido al choque contra estos. Tal proceso es conocido como fotoionización. La mayor parte del plasma del universo ha sido producido por fotoionización debido a la luz ultravioleta de las estrellas.

Normalmente la densidad de los plasmas naturales varía demasiado; algunos tenues que contienen poco menos de un par electrón-ion por cada centímetro cúbico y demasiados densos con un orden de 10^{25} pares electrón-ion por centímetro cúbico, La mayor parte del plasma existente en el universo es el hidrogeno, debido a que es el elemento más abundante. El núcleo del hidrógeno solo contiene una carga positiva, se constituye por un solo protón y por ende contiene únicamente un electrón (Leguizamo, 2021). En un plasma de hidrógeno ionizado se tienen, protones y electrones libres en una especie de mezcla que, aunque electrónicamente neutra, no llega a constituirse en átomos.

2.2.1. Descarga corona

La descarga corona puede ser observada rodeando las líneas de transmisión de alto voltaje, pararrayos y mástiles de barcos. El efecto corona prácticamente consiste en las descargas parciales ocurridas en el gas cuando un campo eléctrico de ruptura es excedido se le conoce como parcial debido a que la descarga está limitada en una zona sin perder las propiedades aislantes del material. Desde el punto de vista fisicoquímico es un fenómeno por medio del cual surge un proceso de multiplicación ionizante por el impacto de electrones. Hablando de una línea de transmisión, la ionización es la causante de una redistribución del campo eléctrico cercano al plano del material. Después de esto, se excede la ruptura crítica del aire y se producirá una descarga parcial. (Gómez, 2021)

Esto producirá visualmente un efecto efluvio luminoso de color violáceo que rodeará por completo al conductor y gracias a este fenómeno es como se conoce el término efecto "corona". (Cárdenas de la Vega, 2019) La descarga corona puede producir luz, ruido

audible, calor, interferencia de radio y televisión, ozono, vibraciones mecánicas y vientos ionico. La intensidad y la frecuencia de la descarga corona se ven afectadas principalmente por las condiciones de los conductores, condiciones climáticas y campo eléctrico en la superficie del conductor. La magnitud del campo eléctrico en la superficie de los conductores está en función a su configuración geométrica y parámetro de las líneas de distribución. En relación a las condiciones climáticas el mayor problema que perjudican al efecto corona es el nivel de precipitación y humedad generada en el ambiente y en menor incidencia se tiene la densidad relativa del aire, el viento y la temperatura.

El estado de la superficie de los conductores esta en función del deterioro (vejez), tipo de polución del aire y la intensidad de la lluvia con esto la superficie de los conductores se suavizan y hace que el efecto corona sea más riguroso debido a factores como la oxidación y la grasa formados (Gómez, 2021).

2.2.2. Aplicación de corona continua

La aplicación es un factor importante dentro de la descarga de corona ya que se limitan debido a las bajas corrientes y de potencias, lo que da como resultado un menor rendimiento en los materiales y corrientes de escape. El incremento de potencia en la corona sin una transición a la salida (chispa), se genera durante el uso de pulsos voltaicos con periodicidad. Una de las descargas no térmicas más prometedoras generadas a presión atmosférica es la corona pulsada debido a su velocidad de corriente cercana a los 10^8 cm/s ya que excede por un factor de 10 la velocidad de deriva de electrones en una avalancha. Si la distancia entre electrodos es de aproximadamente 1 a 3 cm, el tiempo necesario para el desarrollo de avalanchas, la transición de avalancha a serpiente y su propagación entre electrones es de aproximadamente 100 a 300 ns.

Las fuentes de alimentación con pulsos de voltaje de entre 100 y 300 ns son capaces de sostener serpentinadas y transferir energía al plasma sin que haya formación de chispas. La fuente de alimentación debe proporcionar una tasa de voltaje alta de (0.5 - 3 KV/ns) dando como resultado un mayor voltaje en la ignición de corona y un incremento de potencia (Jiménez et al., 2017).

2.2.3. Plasma no térmico o frío

Los plasmas no térmicos o también llamados plasmas fríos tienen la característica de mantener una temperatura ambiente en especies pesadas como lo son: las partículas neutras y los iones de (entre 20 y 100°C), respectivamente. Mientras que su temperatura electrónica se encuentra entre 5000 y 10⁵ °C. (Canal, 2023).

El plasma frío se genera incluso con una presión pequeña de apenas 133 mbar en algunos tipos de reactores geométricos, radiofrecuencia, sistemas de corriente continua, descargas pulsadas y microondas (Canal, 2023). Este tipo de plasmas se generan por medio de presión atmosférica y la utilización de pulsos de (10⁻⁶ y 10⁻⁹ s) por medio de barrera dieléctrica y descarga corona respectivamente. Algunas de las propiedades que caracterizan el plasma son la temperatura electrónica y la densidad como sus principales parámetros (Portugal, 2021). La densidad electrónica es de 10²⁵ electrones por cm³ la cual supera la concentración de electrones en metales. Por otro lado, la distancia media cubierta antes de la colisión entre las partículas del plasma llega a extenderse desde solo unas micras a millones de kilómetros. (Portugal, 2021).

El plasma frío, cuya temperatura es menor a 100°C, pueden clasificarse en homogéneo y heterogéneo (Tirado et al., 2021).

El heterogéneo funciona en base a una superficie sólida o líquida y homogéneo interacciona con gases como en nitruros, eliminación de sulfuros o en la síntesis de ozono. Los procesos de plasma en sólidos se dan en 3 categorías: Por erosión, que es el desgaste del plasma en plano durante un bombardeo iónico simultáneo. Este proceso es de gran interés para la industria micro eléctrica debido a la erosión de cierto material de modo anisótropo (con una anchura y altura diferente).

En procesos de depósito químico en fase de vapor asistido por plasma, es una base a la cual se añade una capa delgada sobre la superficie del material. En último lugar las superficies sólidas que son tratadas con plasma sufren cambios del tipo fisicoquímico

como consecuencia de procesos radioactivos y la interacción con las partículas de plasma. (Caballero et al., 2022).

El interés científico y técnico de la interacción plasma-superficie nació del trabajo de Jerome Goodman en 1960. Él expuso que el depósito de una película de material mediante plasma podía ser de utilidad y no solo un residuo molesto. Observó que el depósito de una micra de espesor de estireno polimerizado por plasma mostraba propiedades dieléctricas valiosas. Desde ese momento la obtención de polímeros empleando plasmas fríos dejó de ser un subproducto indeseable y se convirtió en uno de los más aplicados. Los plasmas corona generados a presión atmosférica, por el hecho de ser homogéneos, se utilizan para el tratamiento de materiales de modo superficial, este ha sido sustituido con el tiempo por plasmas generados por descargas luminiscentes a baja presión (0.013 y 13 mbar). (Caballero et al., 2022)

Actualmente se han empleado descargas de barrera y luminiscentes para generar plasmas a presiones atmosféricas en régimen homogéneo, lo que los hace prácticos y muy económicos frente a los plasmas a baja presión.

Las partículas de plasma al interactuar con las superficies sólidas cambian bruscamente su energía y carga eléctrica ya que se genera una transferencia. El plasma activa las superficies (hace que las partículas de plasma se enlacen con los componentes del sólido a nivel molecular); por otro lado, cuando se eligen gases específicos para generar el plasma este servirá para el recubrimiento de los materiales. Esta capacidad que tienen los plasmas fríos de modificar las superficies se debe a varios factores, por ejemplo; la elevada energía de los electrones que se encuentran libres en el plasma, los efectos producidos por los fotones que son características en el tratamiento de superficies por medio de los plasmas fríos. (Portugal, 2021) Este tipo de tratamiento de superficies permite una funcionalización o activación funcional del material.

2.2.4. Plasma térmico o caliente

Los plasmas del tipo térmico o también llamados plasmas calientes tienen como característica principal una temperatura muy elevada en comparación a los plasmas de

tipo frío, la temperatura de los plasmas térmicos es de aproximadamente de 1 eV siendo casi cercana a la temperatura de las ya mencionadas partículas pesadas. El plasma en este punto se encuentra cerca del equilibrio térmico local el cual se lleva a cabo a presiones mayores a la atmosférica. La transferencia de energía dada por este tipo de plasma es aproximadamente de 1 eV equivalente a 11,600 K. (Palomares, 2018) Existen 3 formas de conseguir el plasmas caliente, por ejemplo: antorchas de plasma, arcos eléctricos transferidos y radiofrecuencia de alta intensidad. El plasma térmico generado por arco eléctrico funciona en base a un electrodo y un contra-electrodo el cual puede estar en contacto con la antorcha en este caso el cuerpo y en el punto medio presentarse la ionización debido a un campo eléctrico.

Donoso et al., (2015) señala que... La temperatura en el plasma térmico es independiente en su composición química, tiende a proveer un equilibrio en base a un equilibrio termodinámico en su temperatura, presión y naturaleza (especies ionizadas, átomos y electrones) que se activan a altas temperaturas. En la antorcha de plasma su funcionamiento radica en aprovechar el calor generado de un arco de plasma el cual es producido como consecuencia de la ionización ocurrida en un gas, entre un electrodo (cátodo) y el baño metálico, que se encuentra conectado al ánodo. Esta corriente atraviesa el gas al punto de ionizarlo, alcanzando en su núcleo temperaturas por arriba de los 10,000°C. La generación de plasma se logra provocando una diferencia de potencial entre 2 electrodos, de modo que se produzca una reacción en cadena la cual ionizará el gas dando origen al arco de plasma.

2.3. Polímeros

Los polímeros son macromoléculas particularmente de gran tamaño, su constitución está dado por “eslabones” generalmente del tipo orgánico, conocidos como monómeros unidos por enlaces del tipo covalente. Este tipo de eslabones están formados por átomos de carbono los cuales poseen grupos radicales o laterales de uno o más átomos. Estas moléculas orgánicas son la base para la construcción de los materiales plásticos que se

conocen actualmente, y también de los tejidos de seres vivos (músculo, tela de araña, seda, piel, etc).

Una macromolécula se constituye por cientos de miles de monómeros. El proceso de polimerización se produce en un reactor que contiene dichos monómeros y reactivos o catalizadores para la producción del polímero. (Ondarse, 2018)

2.3.1. Construcción de un polímero

Los polímeros sintéticos principalmente son producidos mediante el proceso de polimerización el cual se encarga de activar la reacción de miles de monómeros los cuales forman una extensa cadena macromolecular. Existen 2 tipos de polimerización: de condensación o crecimiento por pasos y la adición o crecimiento de cadena (Gila, 2021). La polimerización por cadena se caracteriza principalmente por los intermediarios que ocurren en el proceso (complejos metálicos, radicales libres o iones) estos no pueden aislarse y son transitorios. La polimerización por pasos se produce por reacciones entre moléculas que poseen grupos funcionales. A los compuestos intermediarios que poseen bajo peso molecular se le conoce como oligómeros, y si se pueden aislar. Se describe como una reacción química sencilla que se efectúa repetidamente. El grado de polimerización de la cadena equivale al número de subunidades o monómeros empleados para crear dicha cadena. Por ejemplo, el grado de polimerización del polietileno varía entre 3,500 y 25,000 (Valdés, 2019).

2.4. Clasificación de los polímeros

2.4.1. Naturales

Este tipo de polímeros son producidos por organismos vivos empleados sin algún tipo de modificación. Algunos de estos son: los polisacáridos, caucho natural y la proteína empleada para crear la tela de las arañas. En especial la seda de araña es poseedora de una resistencia elevada, de alta deformidad y apropiadas para absorber impactos. Ahí el esfuerzo de crear fibras de proteínas similares al que producen las arañas mediante la utilización de la ingeniería genética. (Carrillo et al., 2022)

2.4.2. Sintéticos

Este tipo de polímeros tienen la característica de ser muy resistentes a condiciones químicas como la acidez, no son conductores de la electricidad y no son biodegradables. Estos polímeros en su mayoría son compuestos orgánicos por lo que son de fácil combustión en presencia de oxígeno. Además su estructura puede ser blanda o rígida. (Carrillo et al.,2022)

2.5. Compósito polímero/silicón

Las siliconas son compuestos inorgánicos, inertes que son capaces de soportar altas temperaturas. Son utilizados principalmente como adhesivos, lubricantes y en aplicaciones médicas. Este tipo de siliconas son polímeros que están formados por silicio en conjunto con carbono, oxígeno, hidrógeno y otros elementos químicos.

Entre sus propiedades se encuentra la baja reactividad química, baja toxicidad, estabilidad térmica en el intervalo de -100 a 250°C, capacidad de repeler el agua, posee resistencia al oxígeno, ozono, luz ultravioleta, aislamiento eléctrico, no es compatible con el crecimiento microbiológico y es altamente permeable a los gases a una temperatura 25°C (Galego et al., 2018).

Aspectos generales del Compósito polímero/silicón utilizado:

El compósito polímero (hule/silicón) con un material dopante R812, es una sílice pirogénica tratada previamente con HMDS (Hexametildisiloxano) con una superficie específica alta y marcado carácter hidrofóbico. Se aplica principalmente en sistemas de revestimiento para optimizar el efecto de protección contra la corrosión. Se adhiere fácilmente a fórmulas de goma silicona mejorando así propiedades mecánicas y ópticas. La **TABLA 2.1** contiene la información técnica y físico/química del material.

TABLA 2.1. Datos fisicoquímicos y características.

Propiedad y métodos de prueba	Unidades	valor
Superficie específica	m ² /g	230-290
Valor de pH con 4% de dispersión		5.5-8.0
Pérdida por secado de 2 horas a 105°C	%	≤ 0.5
Contenido C	%	2.0-3.0
Densidad modificada	g/l	Aproximadamente 60.
Contenido SiO ₂ basado en material encendido	%	≥ 99.8

2.6. Hidrofobicidad (técnica de ángulo de contacto)

La hidrofobicidad es una propiedad que tienen algunos materiales, los cuales repelen una masa de agua que entra en contacto con sus moléculas.

El ángulo de contacto es un atributo que los sólidos tienen, el cual mide la tendencia que este posee a la hidrofobicidad como un factor de gran importancia, con el fin de analizar la interacción entre el estado sólido y líquido (Química General, 2022). La forma de medir el ángulo de contacto de una superficie consiste en colocar una gota de agua sobre una superficie sólida o incluso líquida por medio de un microscopio se proyecta la imagen de

la gota sobre la superficie del material a analizar y se mide con un goniómetro graduado que se encuentra en el microscopio (Dos santos et al., 2016).

El proceso convencional para su resolución no es compatible para materiales de granulometrías finas, debido a que se basa en la medida del ángulo formado al contacto de una gota y una superficie plana y uniforme. (Portillo, 2018) La **FIGURA 2.1** muestra el ángulo formado entre las diferentes interfases.

El ángulo de contacto que se considera para determinar el cambio de hidrofobicidad es el ángulo θ de la **FIGURA 2.1** conforme el ángulo decrece, la hidrofobicidad decrece.

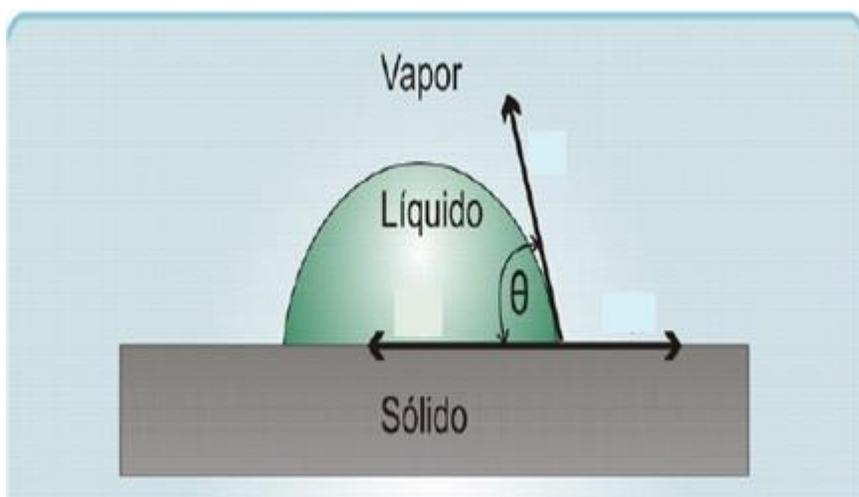


FIGURA 2.1. Ángulo formado entre la interfaz. (skrimer, 2020)

2.7. Espectrofotometría infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Esta técnica está fundamentada en la interacción de la materia y la radiación. Este tipo de interacciones son las que provocan procesos como la difusión o absorción. Cuando las moléculas absorben o emiten fotones, el estado energético cambia. Generalmente el

cambio se manifiesta en la energía traslacional de las moléculas, y un cambio del estado electrónico vibracional o rotacional. Poniendo de lado estos cambios traslacionales, los estados energéticos de las moléculas son cuantizados, consecuentemente, en cuanto a los procesos de absorción y emisión solo se dan a una determinada frecuencia de los fotones. Además, las frecuencias a la cual son producidos estos procesos son únicos de cada molécula. Para cada molécula, el espectro de absorción/emisión plasma una huella de la misma (Zambrano, 2020).

La espectroscopia es una técnica de análisis, que ayuda a obtener información en base a procesos de absorción y emisión debido a la interacción de la radiación con las moléculas de la muestra estudiada. El objetivo de esta técnica es determinar las sustancias químicas o grupos funcionales en materiales sólidos ya sean materiales aislantes y conductores, líquidos y gases. En la **FIGURA 2.2** se muestran las partes de un interferómetro de Fourier.

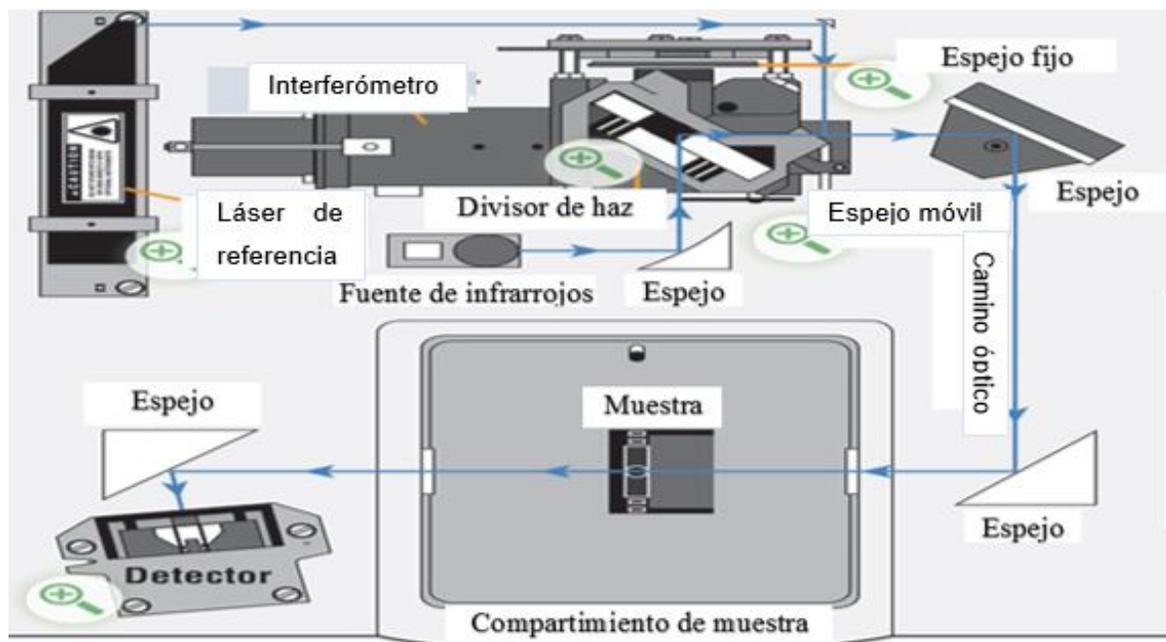


FIGURA 2.2. Partes del interferómetro de Fourier (Centro de astrobiología, 2015)

El funcionamiento del interferómetro de Fourier se basa en el interferómetro de Michelson en el cual la fuente de radiación pasa a través de un divisor de haz (beamsplitter) , el cual dirige una parte de la radiación a un espejo móvil y la otra mitad a un espejo fijo. Los 2 rayos se combinan en el beamsplitter de forma constructiva o destructiva dependiendo de la exposición del espejo (Zambrano, 2020).

2.8. Microscopía electrónica de barrido por emisión de campo (FESEM)

Un microscopio electrónico de barrido esta compuesto por un emisor de electrones, una columna y diferentes lentes electromagnéticas. El emisor es el encargado de la generación de un haz de electrones el cual tiene una aceleración entre 200 V y 30 keV que viaja por una columna (vacío 10^{-4} Pa) (Esparza, 2022).

Los electrones pasan a través de diferentes lentes electromagnéticas y un sistema que permite la manipulación del haz de electrones para poder realizar el barrido superficial de la muestra. En la **FIGURA 2.3** se muestra las partes que conforman el microscopio electrónico de barrido por emisión de campo FESEM.

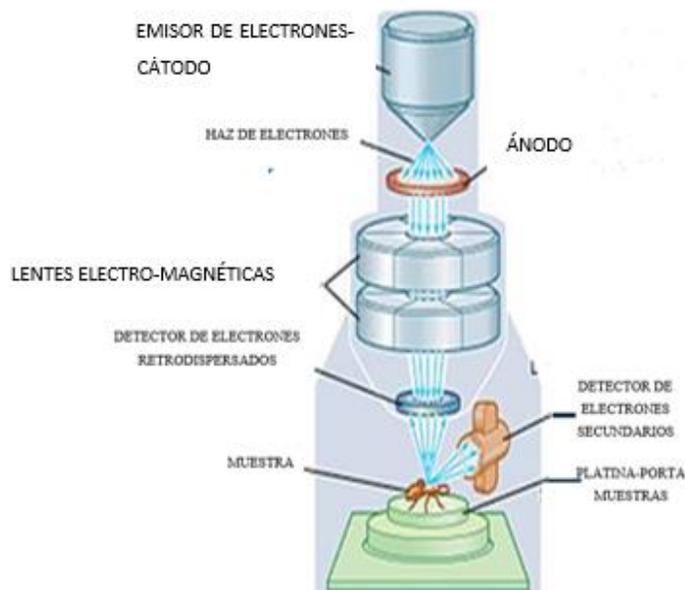


FIGURA 2.3. Componentes del microscopio electrónico de barrido FESEM.
(Laboratorio nacional de investigaciones en nanociencias y nanotecnología, 2018).

Cuando los electrones interactúan con la superficie de la muestra diferentes señales se generan por los electrones secundarios, Rayos X, electrones retro dispersados entre otros. Cuando las señales son recibidas por los diferentes detectores estos ayudan a obtener información morfológica y composición química de la superficie de la muestra (Reyes, 2020).

Entre los beneficios que caracterizan al microscopio electrónico de barrido se encuentran:

- Es una herramienta utilizada en la biología, materiales, ciencias ambientales, geociencias, etc.
- Es una técnica de caracterización de superficies que no es destructiva y proporciona información química y morfológica de los materiales.
- Como resultado de la interacción entre el haz de electrones y el plano de la muestra se pueden obtener algunas señales como:
- Electrones retro dispersados (BSE) la cual genera imágenes con diferente brillantez en función de composiciones químicas superficial.

- Electrones secundarios (SE) los cuales proporcionan información acerca de la morfología en la superficie de las muestras.
- Espectrometría de energía dispersiva de rayos X (EDS) la cual detecta cualitativamente rayos X que caracterizan elementos químicos que existen en la superficie de la muestra (muestra un análisis semi-cuantitativo de la composición química detectada).

CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1. Dispositivo experimental

Para la producción del plasma se utilizó una cámara de vacío, la cual está conformada por un recipiente de vidrio templado de cierre hermético que permite el manejo adecuado de las variables generadoras del plasma y del vacío como en la **FIGURA 3.1**

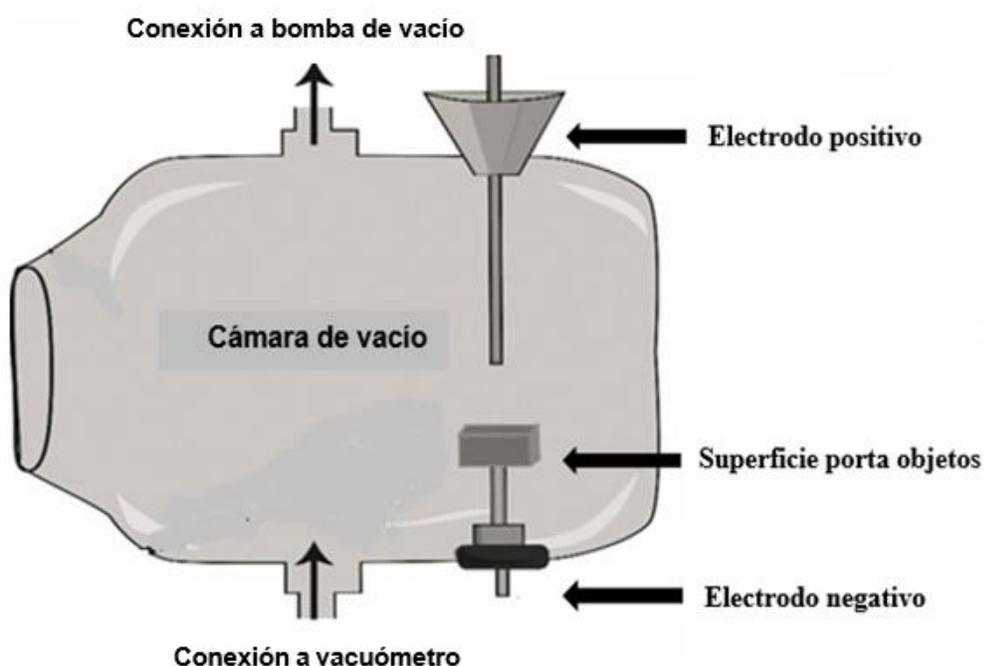


FIGURA 3.1. Diagrama del dispositivo generador de plasma.

Una de las salidas laterales en el dispositivo está conectada a un vacuómetro digital (marca CPS) que permite medir el vacío y tener control de su magnitud, la otra salida lateral está conectada a una bomba de vacío (marca LABCONCO) la cual se encargará de sacar el aire del interior del recipiente.

En la parte inferior de la cámara se encuentra el electrodo negativo, mientras que en la parte superior está el electrodo positivo; ambos se conectan a una fuente de alto voltaje (marca SPELLMAN, SL600) y es en los que se lleva a cabo la generación del plasma de aire a baja presión. La **FIGURA 3.2** muestra una imagen del dispositivo utilizado. En medio de estos electrodos se coloca la muestra del compuesto de interés para ser tratada con plasma.

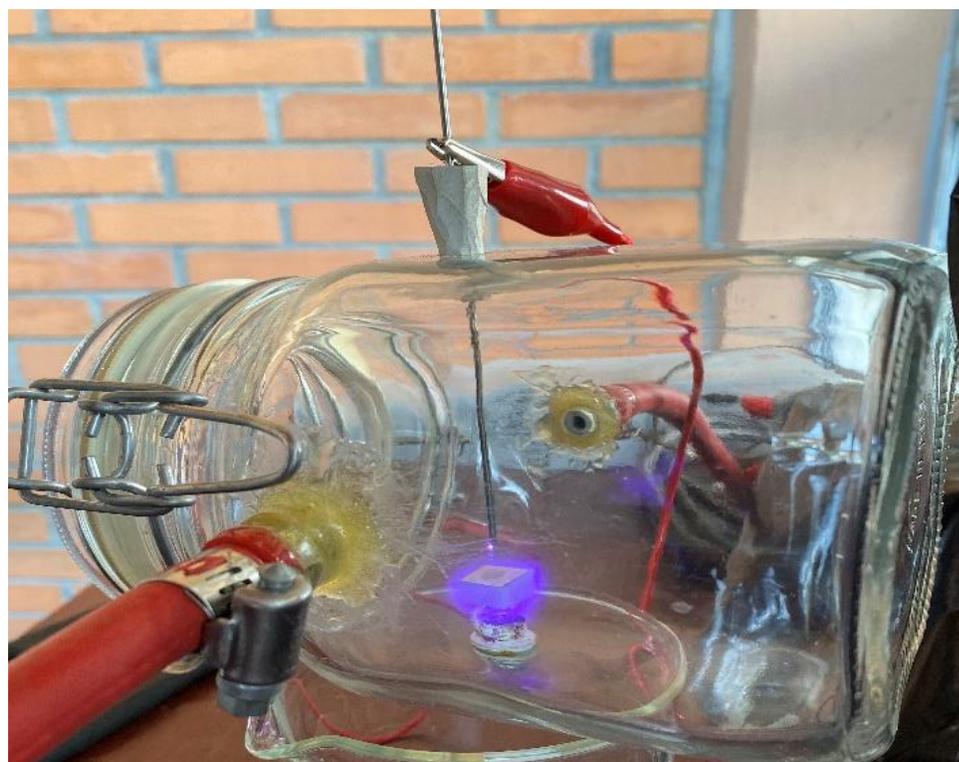


FIGURA 3.2. Dispositivo generador de plasma.

3.2. Obtención de muestras de compuesto

Se obtuvieron cinco muestras del compuesto polímero de silicón con material dopante R812 de medidas de 1 x 1 cm y espesor de entre 0.40 y 0.67 μm . También se obtuvieron cinco muestras de compuesto polímero sin material dopante. Las muestras fueron descontaminadas con alcohol y se dejaron en secado a temperatura ambiente por 18

horas. Al término de este tiempo se midió el espesor de cada una de ellas (micrómetro Electric micrometer digital) y se determinó su peso (balanza digital ADAM, modelo PW 254).

3.3. Exposición de muestras al plasma

1. Se coloca la muestra a tratar con plasma en la cámara de vacío sobre el electrodo negativo.
2. Se procede a encender la bomba de vacío para extraer el aire dentro de la cámara. Se establece la presión de la cámara en 20 Torr para tener una atmósfera controlada al momento de la exposición de las muestras.
3. Se genera el plasma de aire en el interior de la cámara al establecer los valores respectivos de corriente y voltaje para cada una de las muestras.
4. Una a una las muestras son expuestas al plasma durante el tiempo definido de tratamiento. La **FIGURA 3.3** presenta la exposición de una muestra al plasma.

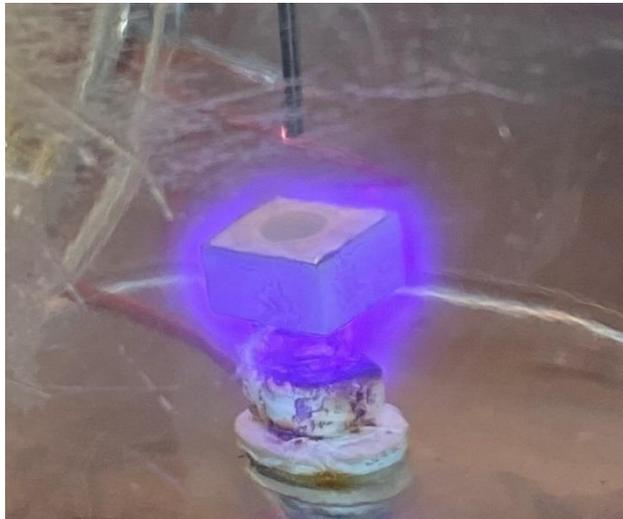


FIGURA 3.3. Exposición de una muestra de compuesto de interés al plasma.

5. Al término del tratamiento respectivo se apaga la fuente de alto voltaje, se apaga la bomba de vacío, se estabiliza el valor de la presión a presión atmosférica y se retira la muestra.
6. Enseguida se mide el valor de la masa de la muestra después del tratamiento de plasma, se guarda la muestra en un contenedor de plástico de cierre hermético para su almacenamiento y posteriores medidas y análisis de variables de interés (cambio de masa, hidrofobicidad, estudio de espectroscopia infrarroja y análisis mediante Microscopia Electrónica de Barrido por Emisión de Campo- FESEM).
7. Para realizar la prueba de hidrofobicidad se midió el ángulo de contacto formado por la superficie de las muestras tratadas y una gota de agua como se observa en la **FIGURA 3.4** En esta figura se muestra el ángulo medido con el microscopio.

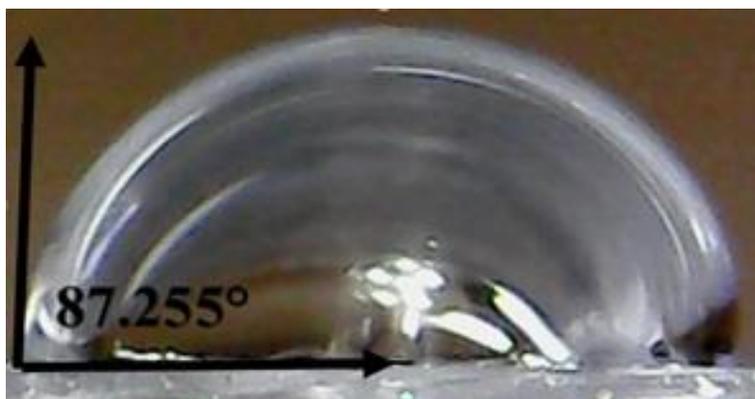


FIGURA 3.4. Ángulo de contacto formado por la superficie de la muestra tratada y una gota de agua.

8. Tal procedimiento fue utilizado para todas las muestras (con y sin material dopante) sometidas al plasma a diferentes tiempos de exposición. Los parámetros pueden observarse en la **TABLA 3.1** la muestra testigo mantiene sus propiedades intactas y servirá como punto de comparación para observar los cambios provocados por el plasma.

TABLA 3.2. Parámetros de exposición de plasma para cada muestra.

Muestra	Tiempo de exposición (min)	Material dopante (%)	Amperaje (mA)	Voltaje (KV)
1	1	1	20	4
2	5	1	20	4
3	10	1	20	4
4	15	1	20	4

9. Para obtener los espectros de infrarrojo por transformada de Fourier o la emisión que hay por las muestras, se utilizó un espectro (Alpha FITR espectrometer, Bruker optics). Se recopilaron de manera simultánea los datos espectrales de alta resolución en un intervalo espectral amplio (Número de onda de $500-4000\text{ cm}^{-1}$).

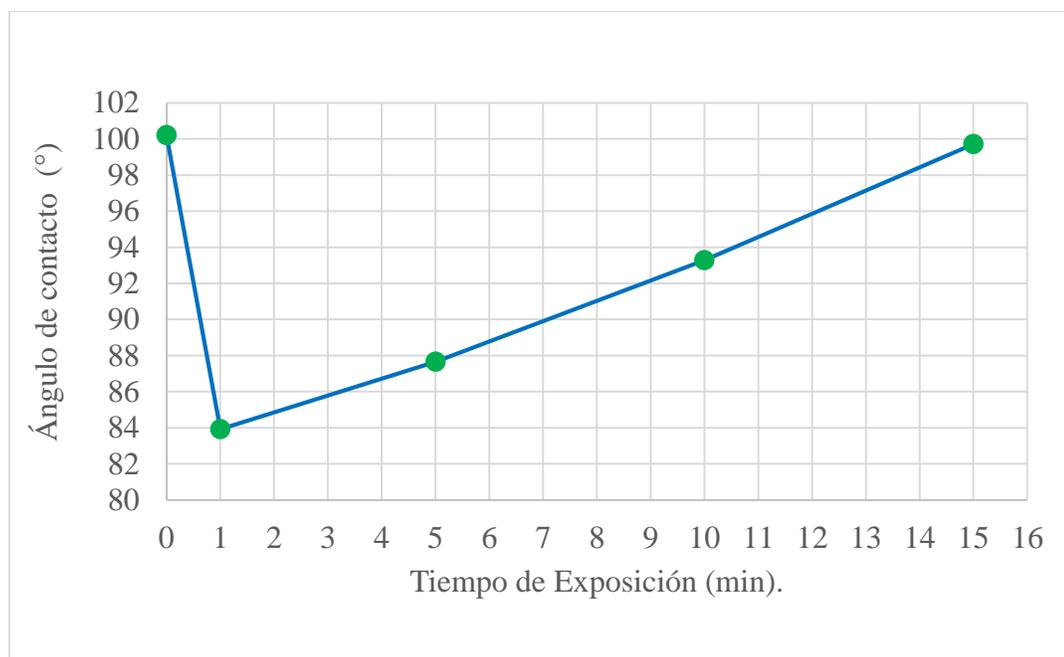
10. Las muestras fueron analizadas en un Microscopio electrónico de barrido por emisión de campo-FESEM por sus siglas en inglés modelo SU5000 marca Hitachi. El análisis se llevo a cabo a 60 Pa. Y a un voltaje de 10 kV.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan a continuación los resultados obtenidos de las pruebas realizadas respecto a la hidrofobicidad, cambio de masa, espectroscopia infrarroja y microscopía electrónica de barrido de las muestras expuestas al plasma y de la muestra testigo y las expuestas por el plasma dopadas y sin dopar.

4.1. Hidrofobicidad

La **GRÁFICA 4.1** presenta el comportamiento del cambio del valor del ángulo de contacto de las muestras dopadas como función del tiempo de exposición (a menor ángulo de contacto, menor hidrofobicidad).

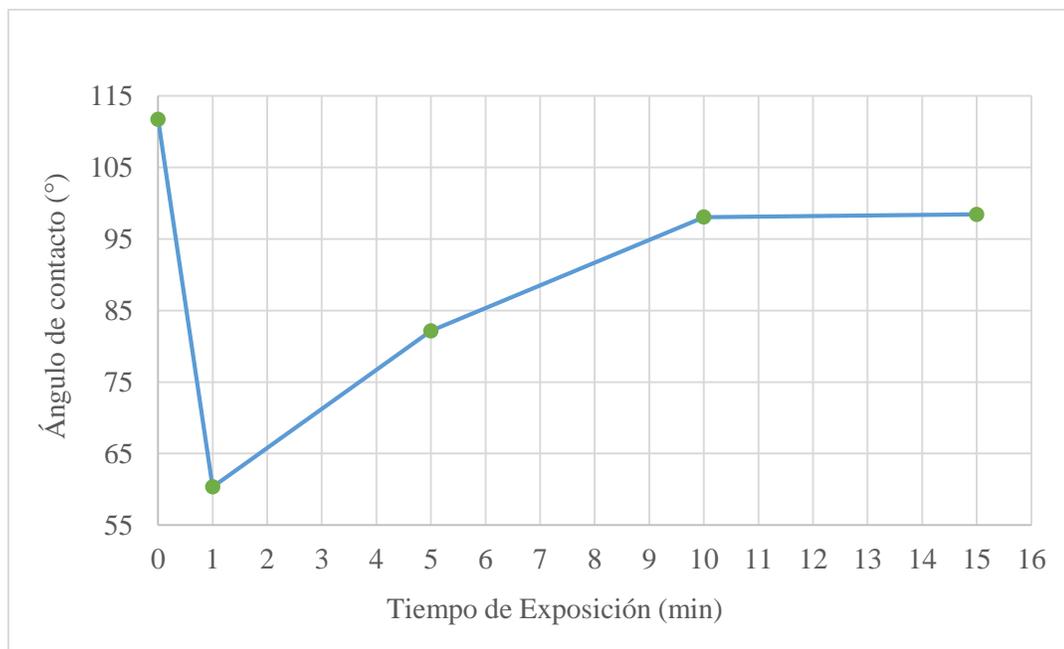


GRÁFICA 4.1. Cambio del ángulo de contacto de una gota de agua sobre la superficie de las muestras de silicón dopado, en función del tiempo de exposición al plasma.

Se puede observar de la **GRÁFICA 4.1** que los ángulos de contacto cambian en función del tiempo de exposición para la muestra testigo fue de aproximadamente 100° , mientras que para las demás muestras los valores fueron menores. Cabe destacar que los ángulos de contacto muestran un comportamiento creciente conforme el tiempo de exposición al plasma fue aumentando. El ángulo de la muestra expuesta al plasma durante un minuto midió aproximadamente 83° ; siendo el menor ángulo medido de las muestras sometidas al plasma. Los demás ángulos midieron aproximadamente 87° , 93° y 99° para los tiempos de 5, 10 y 15 minutos de exposición respectivamente.

De las medidas de los ángulos sobre cada muestra se puede inferir que la hidrofobicidad cambia con el tiempo de exposición al plasma. A menor ángulo medido, menor hidrofobicidad.

Se puede deducir que, la hidrofobicidad fue menor para tiempos cortos de exposición al plasma. Se puede inferir que la hidrofobicidad de las muestras tienden a su valor original o que no es afectada cuando los tiempos de exposición al plasma son mayores, en las muestras dopadas **GRÁFICA 4.1** no se alcanzó el valor de la muestra testigo; la tendencia que se presenta indica que posiblemente si se alcanzaría, Por su parte, en las muestras sin dopar **GRÁFICA 4.2** la tendencia también es creciente, pero presenta un comportamiento asintótico a un valor menor ($\sim 98^\circ$), que el de la muestra testigo ($\sim 111^\circ$).

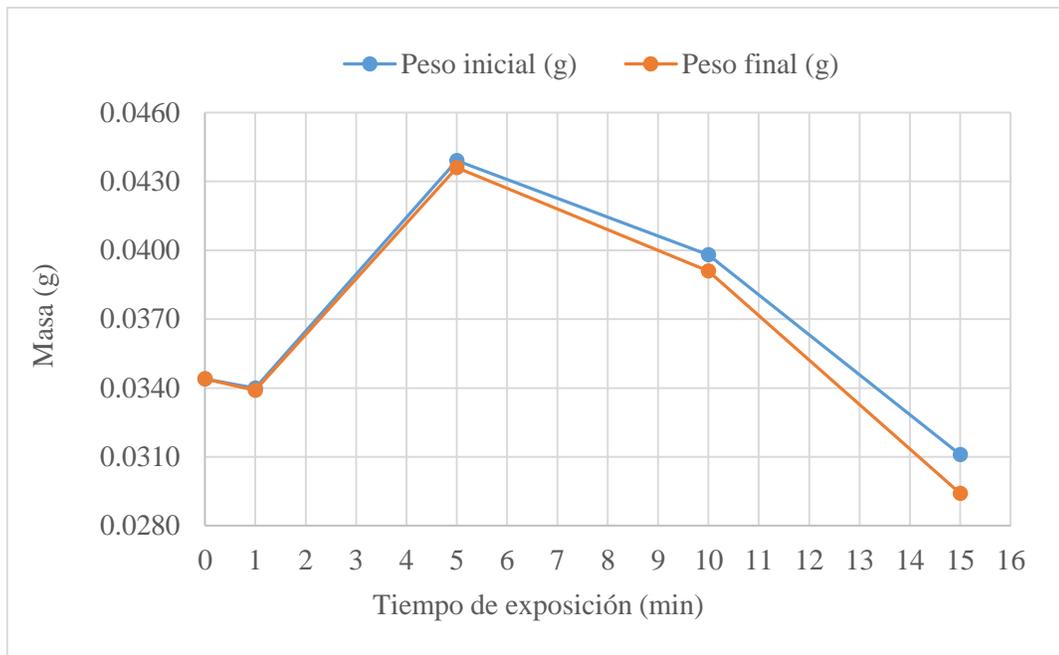


GRÁFICA 4.2. Resultados de los ángulos medidos como función del tiempo de exposición al plasma del silicón puro.

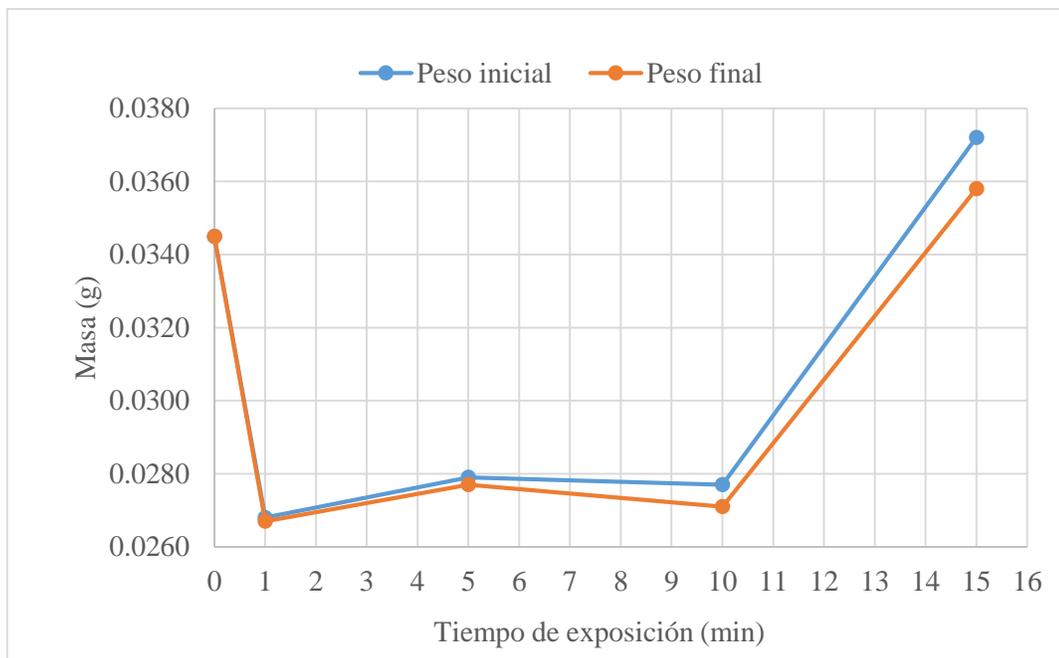
Comparando ambos gráficos, se observa que el material dopante dentro del polímero base de estudio, tiene un efecto en el cambio de la hidrofobicidad. Las muestras dopadas no presentan una tendencia asintótica.

4.2. Cambio en la masa

Las **GRÁFICAS 4.3** y **4.4** presentan el peso de cada muestra considerada (dopada y sin dopar respectivamente) como función del tiempo de exposición al plasma, antes y después de ser expuestas al plasma.



GRÁFICA 4.3. Comparación del valor de las masas de las muestras dopadas antes (línea azul) después de ser expuestas al plasma (línea anaranjada).

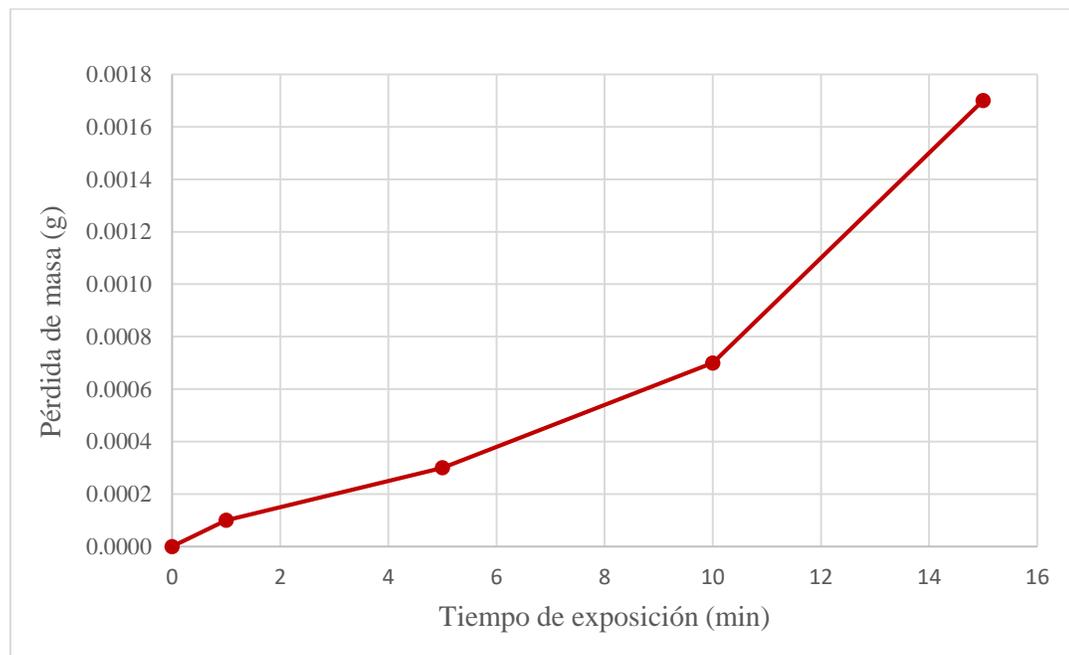


GRÁFICA 4.4. Comparación del valor de las masas de las muestras sin dopar antes (línea azul) y después de ser expuestas al plasma (línea anaranjada).

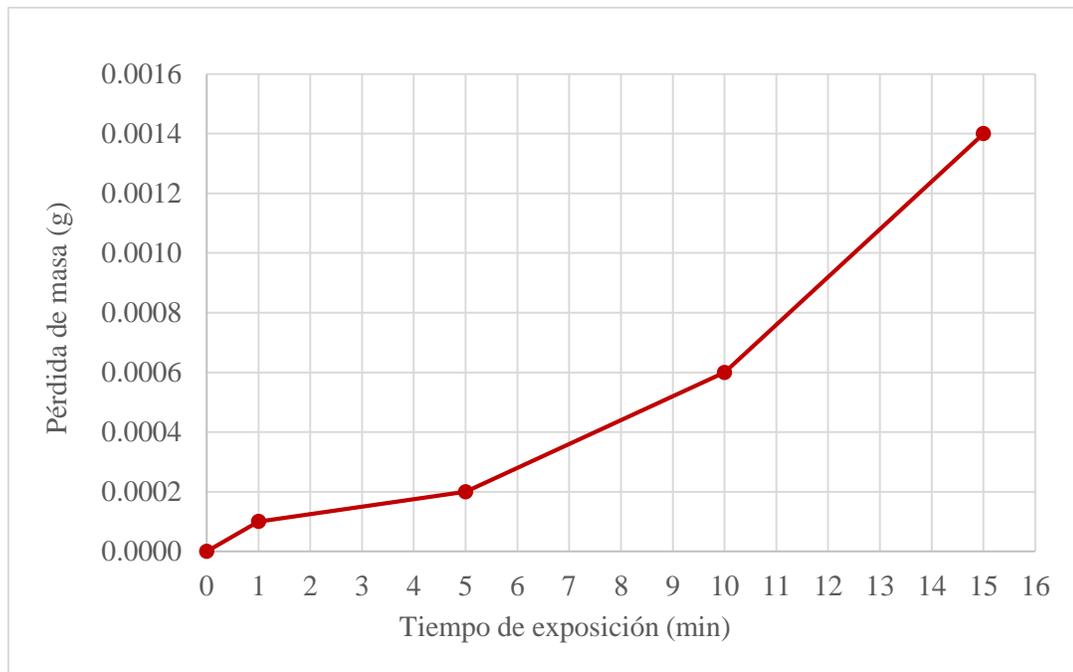
Se observa en las **GRÁFICAS 4.3 y 4.4** que la exposición de las muestras al plasma cambió su masa.

Es de resaltar que el valor de la pérdida de masa de cada muestra va aumentando conforme el tiempo de exposición al plasma incrementa. La pérdida de masa es mayor para las tres últimas muestras dopadas (0.0003, 0.0007 y 0.0017 g respectivamente), que para las tres últimas muestras sin dopar (0.0002, 0.0006 y 0.0014 g respectivamente), como se observa en las **GRÁFICAS 4.5 y 4.6**.

En particular, se observó una mayor pérdida de masa para las muestras dopadas expuestas al plasma a tiempos de 10, 15 y 20 minutos para las muestras expuestas 1 minuto, no se observó diferencia de masas dentro del intervalo de precisión del equipo de medición.



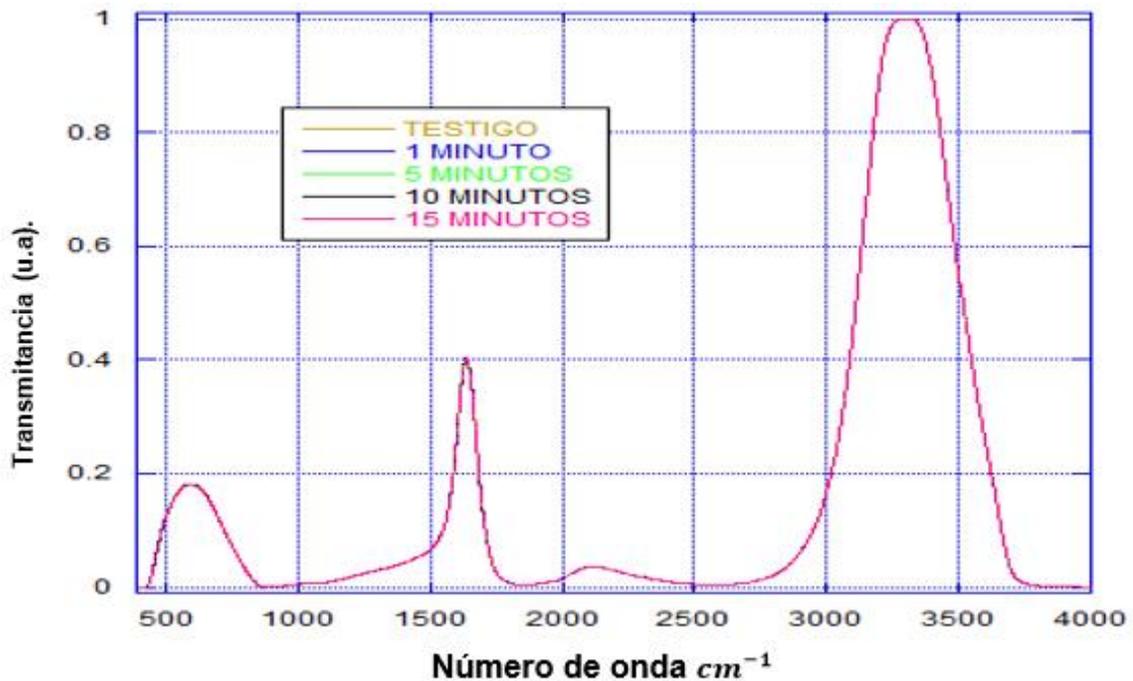
GRÁFICA 4.5. Pérdida de masa de las muestras dopadas conforme se aumentó el tiempo de exposición al plasma.



GRÁFICA 4.6. Pérdida de masa de las muestras sin dopar conforme se aumentó el tiempo de exposición al plasma.

4.3 Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier

En la **GRÁFICA 4.7** se presenta los resultados obtenidos de la espectroscopia infrarroja de muestras dopadas. Estos revelan que aparentemente no existen cambios significativos en las muestras.



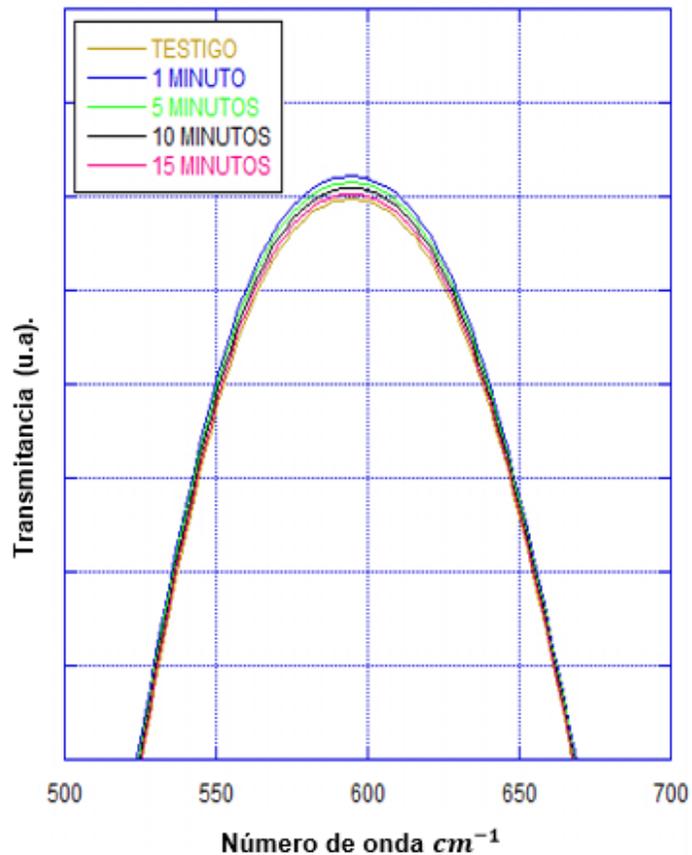
GRÁFICA 4.7. Resultados de las muestras dopadas mediante el estudio de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier.

Al hacer un acercamiento en la gráfica, se pueden observar particularidades de interés.

Al ampliar la región en el espectro que corresponde a la señal del silicio (550 – 650 cm^{-1}) (Wade, 2021).

1), se observa que medida que aumenta el tiempo de exposición al plasma la intensidad de la señal en el espectro disminuye.

La intensidad de la señal aumenta al exponer el polímero durante intervalos pequeños de tiempo al plasma (1 minuto), y al aumentar el tiempo de exposición la intensidad va decreciendo hasta casi regresar al valor original es decir, al valor de la muestra sin tratamiento (Testigo). En la **GRÁFICA 4.8** se observa lo mencionado anteriormente.

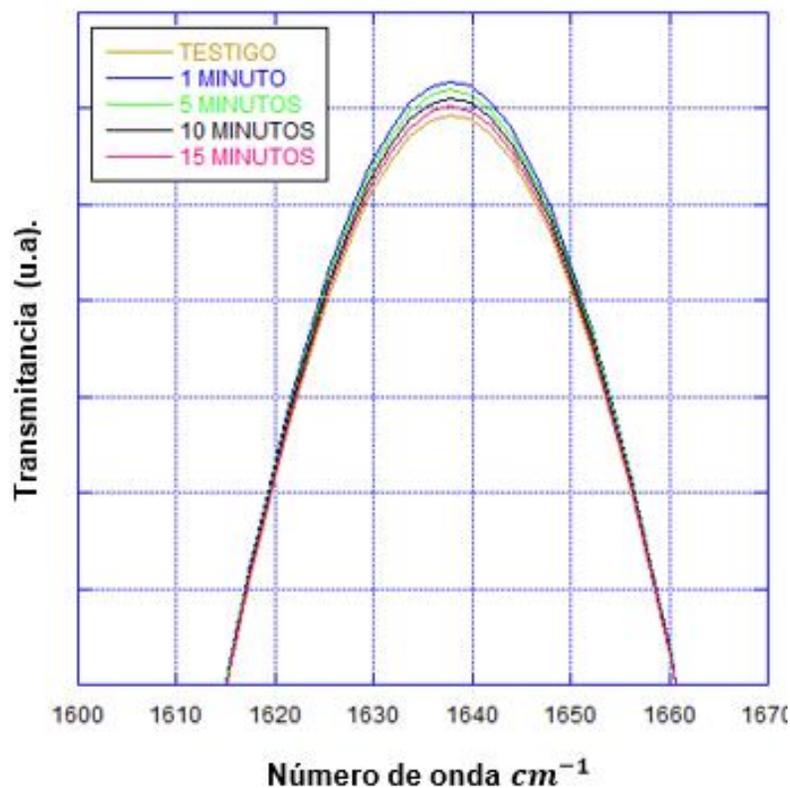


GRÁFICA 4.8. Resultado del acercamiento a la región (550 - 650 cm^{-1})

La muestra testigo (línea amarilla) presenta la menor intensidad, siguen en orden creciente la muestra rosa (tiempo de exposición al plasma 15 minutos), negra (10 minutos), verde oscuro (5 minutos) y azul (1 minuto).

Por otra parte, para el intervalo (1630 – 1655 cm^{-1}) correspondiente a los grupos carbonilos, igual que en el intervalo anterior; la intensidad de la señal aumenta al exponer el polímero durante intervalos pequeños de tiempo al plasma (1 minuto). Al aumentar el tiempo de exposición la intensidad va decreciendo hasta casi regresar al valor original (Wade, 2001).

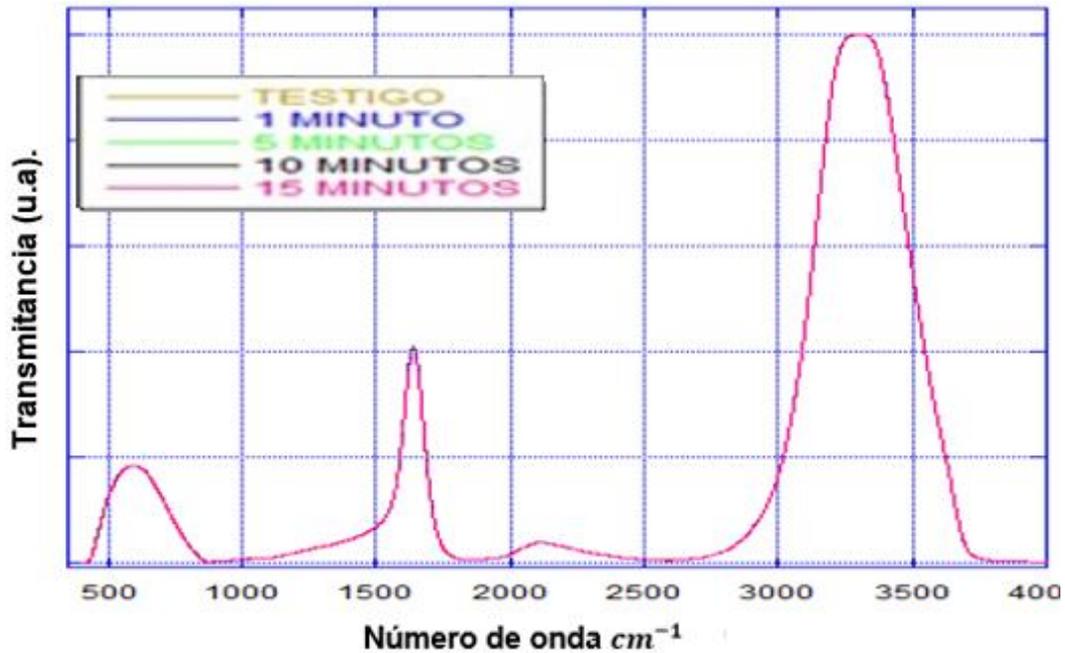
es decir, al valor de la muestra sin tratamiento (Testigo), como se observa en la **GRÁFICA 4.9**



GRÁFICA 4.9. Resultado del acercamiento a la región (1630 – 1655 cm^{-1}).

La muestra testigo (línea amarilla) presenta la menor intensidad, siguen en orden creciente la muestra rosa (tiempo de exposición al plasma, 15 minutos), negra (10 minutos), verde (5 minutos) y azul (1 minuto).

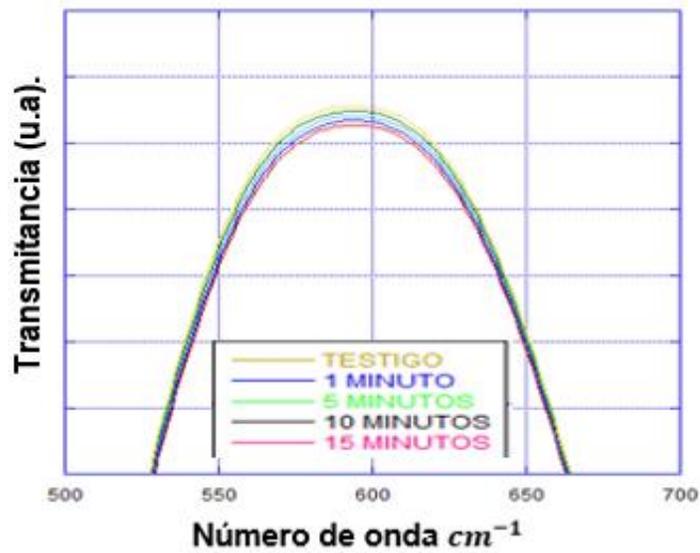
La **GRÁFICA 4.10** muestra los espectros de IR de las muestras sin dopar. Al juntarlas en una misma escala no se observa ningún cambio. Sin embargo, al hacer un acercamiento se observan algunas diferencias.



GRÁFICA 4.10. Espectro de infrarrojo de las muestras sin dopar.

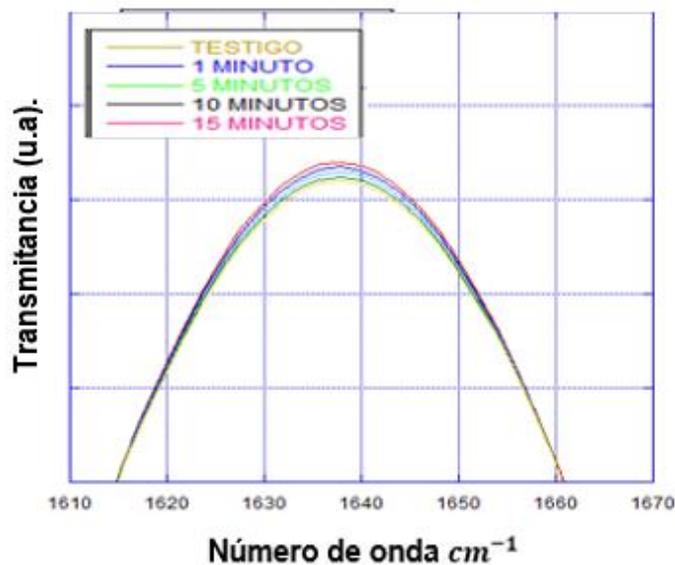
En la **GRÁFICA 4.11** se observa un cambio en las muestras correspondientes a la región de silicio ($550 - 650 \text{ cm}^{-1}$). A medida que el tiempo de exposición al plasma incrementa, la señal disminuye en intensidad en esta región.

La muestra testigo (línea amarilla) presenta la mayor intensidad, siguen en orden decreciente la muestra verde (tiempo de exposición al plasma 1 minuto), azul claro (5 minutos), azul oscuro (10 minutos) y rojo (15 minutos).



GRÁFICA 4.11. Espectro infrarrojo de la muestra sin dopar en la región de silicio (550 – 650 cm^{-1}).

De igual manera, en la **GRÁFICA 4.12** que corresponde a la presencia del grupo carbonilo en la muestra sin dopar, se tiene un comportamiento análogo al anterior. A mayor tiempo de exposición la señal disminuye.

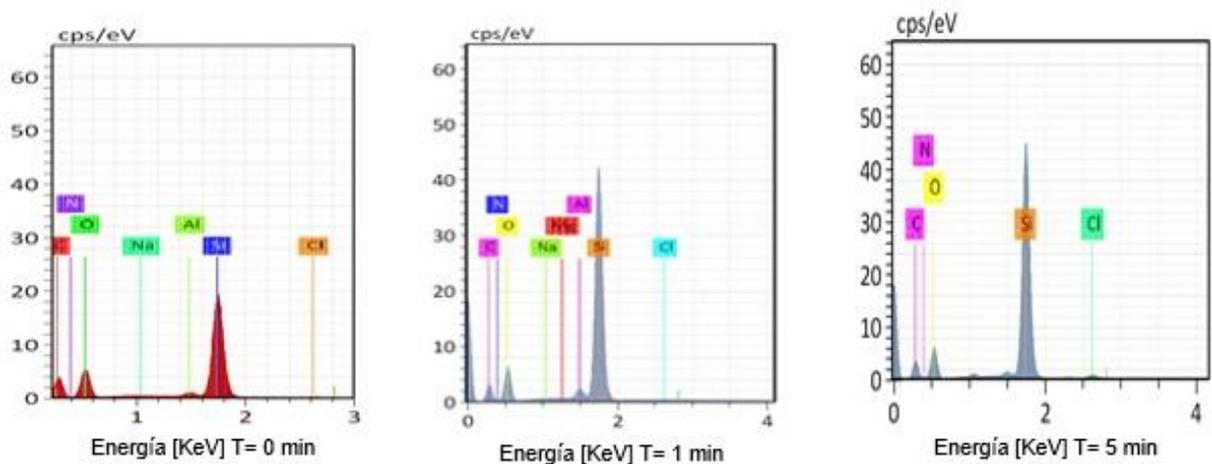


GRÁFICA 4.12. Espectro infrarrojo de la muestra sin dopar en la región del (grupo carbonilo).

4.4. Microscopía electrónica de barrido por emisión de campo- FESEM

En particular se hizo un estudio de Espectroscopia de rayos X de energía dispersiva para determinar la composición del material. Se presentan espectros de las muestras dopadas con tiempos de exposición $T = 0$ min, $T = 1$ min y $T = 5$ min respectivamente.

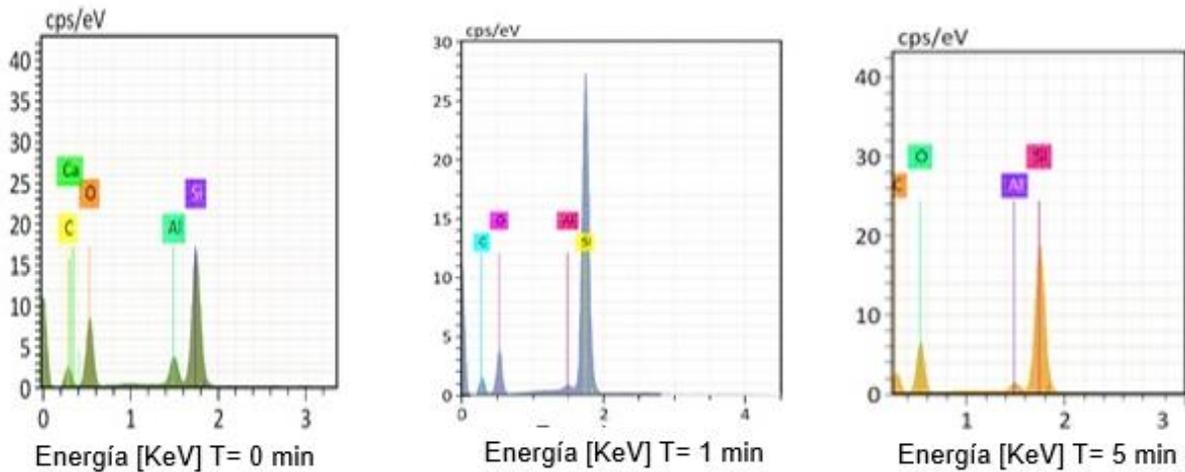
Con esta prueba se puede observar una dispersión de partículas con número atómico mayor (de Al) al observado en la superficie (polímero). Hipótesis corroborada al obtener un EDS (Espectroscopia de rayos X de energía dispersiva) de la muestra analizada. Se presentan algunos espectros ilustrativos en la **GRÁFICA 4.13**



GRÁFICA 4.13. Espectros de muestras de silicón dopadas con tiempos de exposición $T = 0$ min, $T = 1$ min y $T = 5$ min.

En principio, se sabía que elementos y compuestos deberían estar en las muestras. Se constató la presencia de tales elementos, así como el porcentaje promedio en las diferentes muestras.

Por otra parte, en la **GRÁFICA 4.14** se observa la presencia de los elementos que forman el polímero base no están presentes los elementos del material dopante. En caso de haber elementos que no deberían de estar, es debido a contaminación de los materiales.



GRÁFICA 4.14. Espectros de muestras de silicón puro con tiempos de exposición $T = 0$ min, $T = 1$ min y $T = 5$ min.

Se observa que además de los elementos componentes de las muestras, están presentes también elementos contaminantes como calcio, aluminio, cloro, sodio y magnesio. En particular los elementos de las muestras dopadas deberían ser los componentes del silicón (silicio, oxígeno, carbono e hidrógeno) y los del material dopante (silicio y oxígeno).

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

Con las actividades realizadas en la presente investigación, se establecieron cuantitativa y cualitativamente los efectos en la superficie del compuesto polímero/silicón (hule silicón/SiO₂) con material dopante R812 tras su exposición ante un plasma de aire en la región descarga corona. De manera particular se concluye lo siguiente.

- Se diseñó e implementó un dispositivo experimental que permitió realizar la exposición del compuesto polímero/silicón dopado con R812 ante un plasma de aire a baja presión de manera controlada.
- Se expuso el compuesto (hule silicón/SiO₂) dopado con R812, ante un plasma de aire a baja presión generado con valores específicos de presión, diferencia de potencial, corriente, distancia de separación entre electrodos y tiempos de exposición.
- Se cuantificaron los efectos en las muestras del material de interés tras su exposición al plasma; respecto de hidrofobicidad, cambio de masa, espectroscopia infrarroja y análisis de componentes mediante Microscopia electrónica de barrido por emisión de campo- FESEM.
- El estudio de hidrofobicidad indicó un cambio en su valor original con relación al tiempo de exposición de las muestras tratadas. Conforme los tiempos de exposición fueron incrementando, la hidrofobicidad de las muestras parece tener un comportamiento de retorno al valor original o de no verse afectado.
Se observó que el material dopante dentro del polímero, tiene un efecto en el cambio de la hidrofobicidad. El material dopado sin tratamiento de plasma presentó menor ángulo de contacto (100.2°) que el no dopado (111.7°). Cuando se exponen al plasma las muestras dopadas, el ángulo de contacto generalmente es mayor (83.9°, 87.6°, 93.2° y 99.7°) que el ángulo respectivo de las muestras no dopadas (60.3°, 82.1°, 98.0° y 98.4°) esto indica que hubo modificaciones en la estructura de las muestras.

- Respecto del cambio de masa se observó una pérdida progresiva a medida que el tiempo de exposición al plasma incrementó. El valor de la pérdida de masa de cada muestra fue aumentando conforme el tiempo de exposición al plasma se fue incrementando. La pérdida de masa es mayor para las tres últimas muestras dopadas (0.0003, 0.0007 y 0.0017 g respectivamente), que para las tres últimas muestras sin dopar (0.0002 g, 0.0006 g y 0.0014 g respectivamente). El material dopante influye en la pérdida de masa.
- La espectroscopia infrarroja en general, presentó un comportamiento similar de la intensidad del espectro entre las muestras dopadas y sin dopar. Al ampliar la región del espectro que corresponde a la señal del silicio en el intervalo ($550 - 650 \text{ cm}^{-1}$) y la del intervalo ($1630 - 1655 \text{ cm}^{-1}$) correspondiente a los grupos carbonilos, se observó un comportamiento análogo.

A medida que aumenta el tiempo de exposición al plasma la intensidad de la señal en el espectro disminuyó. La intensidad de la señal se incremento al exponer el polímero durante intervalos pequeños de tiempo al plasma (1 minuto), a tiempos de exposición mayores la intensidad fue decreciendo hasta casi tener el valor de la muestra sin tratamiento es decir, aumentar el tiempo de exposición de las muestras al plasma causa que la intensidad del espectro tome valores menores y casi iguales que el valor de la muestra testigo. A tiempos menores de exposición al plasma (1 minuto), la intensidad del espectro del material aumenta.

- La microscopia electrónica de barrido por emisión de campo mostró los elemento que constituyen las muestras. Se constató la presencia de Si, O, C, H en las muestras sin dopar y de Si y O en el material dopante. Así mismo se observó la presencia de elementos contaminantes como Ca, Al, Cl, Na y Mg.

BIBLIOGRAFÍA

- Alonso, M. (06 de mayo 2022). Plasma. Fisiquimicamente. <https://fisiquimicamente.com/blog/2022/05/06/plasma/>
- Caballero, E., Torres, E., Hernández, H. & Escamilla, M. (2022). Revisión sobre las tecnologías emergentes no térmicas para el procesamiento de alimentos. *Revista especializada en ciencias químico-biológicas*. 26 (1), 1-14. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tip/v25/1405-888X-tip-25-e459.pdf>
- Canal, C. (30 de Agosto 2023). ¿Qué es el plasma frío que se usa en algunos tratamientos médicos? [En línea]. *El país*. <https://elpais.com/salud-y-bienestar/nosotras-respondemos/2023-08-30/que-es-el-plasma-frio-que-se-usa-en-algunos-tratamientos-medicos.html>
- Cárdenas de la Vega, D. (2019). Incidencia del efecto corona en la rediointerferencia electromagnética en líneas de trasmisión de alta tensión en C.A, Perú [Tesis de titulación, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. https://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/4722/253T20190675_TC.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Carrillo, A., Plazuelos, G. & Talanquer V. (2022). *Polímeros*. Universidad Nacional Autónoma de México. <http://www.librosoa.unam.mx/handle/123456789/3413>
- Dos Santos, S. (2016). Cambios de la mojabilidad en superficies de maderas tratadas térmicamente: ángulo de contacto y energía libre de superficial. *Maderas: ciencia y tecnología*, vol. 18 (2) 383-394. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48545017015>
- Donoso, J., Del Rio, E & Tierno, S. (2015). ¿El cuarto estado de la materia? Introducción al plasma para estudios preuniversitarios. *Revista Eureka sobre enseñanza y divulgación de las ciencias* 12 (3), 1-8. <https://www.redalyc.org/pdf/920/92041414015.pdf>

Esparza, R. (2022) La microscopia electrónica de barrido en la caracterización de materiales. *+ciencia*, 1 (1), 48-51.

<file:///C:/Users/ferbu/Downloads/kvelasco,+REVISTA+CIENCIA-FRONTIERAS-1-SEPTIEMBRE-DICIEMBRE-2022.pdf>

Galego, N., Rozsa, C. (2018). Ciencia de los polímeros en la Universidad de la Habana. *Revista Cubana de Química*. 30 (1) 77-89.

http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212018000100007

Gila, P. (2021). Estudio de transiciones líquido-líquido en disoluciones acuosas de polipéptidos sensibles a estímulos [Trabajo de fin de grado, Universidad de Valladolid].

<https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/58333/TFG-G6058.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Gómez ,J. (2021). Análisis térmico del efecto corona en líneas de distribución, Ecuador [Tesis de titulación, Universidad Politécnica Salesiana].

<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/21485/1/UPS-CT009455.pdf>

[Fotografía de un angulo formado entre la interfaz]. (2022),

<https://images.app.goo.gl/XCXZqd9SPqZCf5B47>

Jiménez, G., Valdivia, R., Colín, A., Pacheco, M., Pacheco, J. (2017). Control de un sistema de descargas de barrera dieléctrica basado en el diseño gráfico de sistemas. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 13 (01), 17-29.

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432017000100017

Leguizamo, C. (7 de Febrero 2021). Plasma: ¿qué es? Y como se conforma. Geek. https://www.icesi.edu.co/blogs_estudiantes/geek/2021/02/07/plasma-que-es-y-como-se-forma/ Antecedentes del plasma

NATIONAL GEOGRAPHIC. (15 de Diciembre 2022). Plasma, el cuarto estado de la materia. NATIONAL GEOGRAPHIC.

https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/plasma-cuarto-estado-materia_14421

Artículo web

Ondarse, D. (2018) Polímeros. *Enciclopedia Humanidades* [versión electrónica]. Buenos Aires, Argentina: Editorial Etece., <https://humanidades.com/polimeros/#ixzz8LG8ji58g>

Palomares, J. (2018). Espectroscopia óptica de emisión de descargas luminiscentes de alcoholes primarios [Tesis para título de físico, Universidad Autónoma del Estado de México].

<http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/99301/jcpatesis.pdf;jsessionid=E7C2421B5D99CAA35EB9F6E184613939?sequence=1>

Paredes, M., Espino, F. & Gomez, C. (2010). Compuestos de alta permitividad para atenuar el campo eléctrico en aisladores poliméricos. *Revista Científica*. 14 (04), 197-204. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61419260006>

Portillo, C. (2018). Hidrofobicidad de superficies poliméricas mediante inclusión de nanopartículas [Tesis de Maestría, Universidad de Sonora]. <http://www.repositorioinstitucional.uson.mx/bitstream/20.500.12984/6189/1/portillosotoluisclaudiom.pdf>

Portugal, S. (2021). Introducción al plasma frío producido a través de descargas de barrera dieléctrica (dielectric barrier discharge, dbd). <https://ridda2.utp.ac.pa/bitstream/handle/123456789/13480/INTRODUCCI%C3%93N%20AL%20PLASMA%20FR%C3%8DO%20DBD.pdf?sequence=1>

Química General II FQByF. (06 septiembre del 2022). *Hidrofobicidad en la naturaleza* [Archivo de video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=8XgOpq5uOxw>

Reyes, J. (2020) Breve reseña histórica de la microscopía electrónica en México y el mundo. *Mundo Nano*, 13 (25), 79-100. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-56912020000200079

Tirado, V., Miranda, R. & Leyva, L. (2021). Análisis crítico del potencial del plasma frío como tecnología no destructiva en el procesamiento alimentario: situación actual y tendencias futuras. *Revista de la Universidad de Zulia*. 12 (32), 284-316
<file:///C:/Users/ferbu/Downloads/34878-Texto%20del%20art%C3%ADculo-59227-1-10-20210112.pdf>

Skrimer, C. (2020). Ángulo formado entre la interfaz [imagen]. Academia Nacional de Medicina de Buenos Aires , Argentina. <https://www.doccity.com/es/angulo-de-contacto-superficial/5958254/>

Valdés, J. (02 Mayo del 2019). *Qué es un polímero. Clasificación, estructura, ejemplos y procesos de polimerización* [Archivo de video]. YouTube.
<https://www.youtube.com/watch?v=dfnCKYCWgi0>

Zambrano, M. (08 abril 2020). *Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier FTIR* [Archivo de video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=29KeOW0JbEM>



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



ESCUELA DE ESTUDIOS SUPERIORES DE XALOSTOC

Secretaría de Docencia

Jefatura de Servicios Académicos

03 de junio del 2024, Xalostoc Morelos

Asunto: Voto Aprobatorio

DR. GREGORIO BAHENA DELGADO
DIRECTOR DE LA EESX

P R E S E N T E

Por medio del presente, los revisores de la tesis que lleva por título: **Efecto generado por la aplicación de plasma frío sobre el compósito polímero de silicón con un material dopante R812**. Que ha realizado el pasante de la Licenciatura en **Ingeniería Industrial, Fernando Avelar Domínguez**, otorgamos nuestro voto de aprobación para su impresión por haberse realizado las correcciones consideradas pertinentes de nuestra parte.

Atentamente
Por una humanidad culta

Dr. Fidel Benjamín Alarcón Hernández	Director
Dra. María del Carmen Fuentes Albarrán	Co- directora
Dr. Esteban Montiel Palacios	Revisor
Dr. Félix David Olivos Juárez	Revisor
Mtro. José Alejandro Hernández Hernández	Revisor





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

FIDEL BENJAMIN ALARCON HERNANDEZ | Fecha:2024-06-03 08:26:46 | FIRMANTE

NTiMwvsBBVjDwYygtx5zBGr5+wmWK5H1KrhKnREv5HXhd1Kja0KvPvYMHvHBe0Sdi4Ls8ZC6f3dhBkMi/XIOOvCxbSiAe4EEow2NshshMLBfGOq2DH/A4eJwKC2/2H8Qsv7jrsv5slKKuFAI44QXpJ/sGZemizyftJ8TMXJ/seCHXy6gUNerfLGIau14EjlbsWMDk+0QYcard3BLQ3ql+MKXcLJ4aTAv8DbdxYPbsMtSOCnMIX3bbHmHd7P2OIYkbfFfxK+B072mKASHYiyTqedL79q2o0HvS89CFiy98imfCwSCV0ur09KbHWxAgpP5M5mm4zMgXmwHk+XvDbWvRQ

FELIX DAVID OLIVOS JUAREZ | Fecha:2024-06-04 08:18:52 | FIRMANTE

nOiHvFPSAx/I5+/7GnXPYtYze/FyYBPFqTYqCLtDImAJsRQL5ZS6hRWIBESIFhUFmwZ7uWMSVJfOhXbP/Z49WAbiCeXyPL8vJtGyluX+LhJjd+bks/C93qA8w0XHk7ZcP1dB8P2a14H7F273wPcGbFiUW4kA+ARP40kNvM0XFAbi6uA/NbjwN1zsXNXf6Q8GWyKix2hNi6edq+fMUrMh0Qf83I7BjsaR3irJKhSMoJ+lw7kpsuMSCBQAFmF2T80caoX5VtoymZ1QhNYfAt+a0WOOOJveRD3bLXFYZ7fLcoGz1Enw6fDFh7j0QJtmeqAgw6nFAG+9dh31gQp1q0w

MARIA DEL CARMEN FUENTES ALBARRAN | Fecha:2024-06-05 09:29:56 | FIRMANTE

HfVLv6yRtG2L1UNDxik8teUaop+JAKCo3qJbk9QmLMsAbYqmNYs6bPtoSK18PXTF2bV3vOXo458+u6l/6SrdEAhz5K/KyPwMnbQw4MT5oKXduVhLtiQjcnuxRB18RmAxFeuPdcjZl3Ew80qEe0CkXgENIKSx/peHQOSYMRfvXF1tc0aJe+4LSaELVv/sBGNH8JAikzeil+R0nNSmGplE7CREWWi9JL056AjvGU8pnKvIhUob1IDpzifP2Oos3YAcPEWtv413VKrtOTXRtq6GEtGaZmdpEyca2FyR6Vw9CJfDgvOTerTtoS+Z+UoEtGyk3e0181Ak5XhNzjTDjnpLmA==

ESTEBAN MONTIEL PALACIOS | Fecha:2024-06-05 11:01:49 | FIRMANTE

kcH2C1VXkN1PtoCSiOX9FPj8gty2zvX6xmgIRQFuglsx+Z9QZyCG30ajruQTVoVBrfI34HGfVCOkpDkR2FVGXwQsom2wsKeZSLjeaYTNLEix33f3VpKn4FgbZCLGmCvNvdvVFClsWmUGw8azm3ghyHizUG6AG4WBXyANKZQGs7PBnGyCfyVxgPWsPRNvLiEQP+FYh+YCN4xFl5UB7BcbR2lrukaq5W5e2lr4WR1a8w/XLnkYDmzOveEcCEiPpYVYeSFJvNYFILPHXbz/oww/qS6VxF4v5d/DS/2m+qoscuYgXaf8KysZh/dXApItot6ca4+5aGdqgJ6znZ3+jvg==

JOSE ALEJANDRO HERNANDEZ HERNANDEZ | Fecha:2024-06-06 13:13:22 | FIRMANTE

c0DZ+z+AUvHhpXFek3C2hxN/6Zgk6bo7F0zZ4J/OtOKCxCgIAiw1VgkHMZhl1aBMrcVmyJfRfcfczJQ4hO8p3uU1OPQgM1qOjEzHi3n+qtVH+ZEkiP9v/MoA7MDtqzC8/RIY0yM6qnZMmsg7M1DpFC/pirK6kC0bA9J/0PXckCEIUhVsSudNO+CyknmjQ/qQaurKyH5Y0Z0k0V0s3CFQR2l2fwkIOv9n9OtBWzWmfthL8bf2Y6swN1fMdv58l6ASfeWXqWfJP8ZHsf2GSecTtQPTXVgUvMvv77EYorlxZ+AAZI+K60+wAXfKj+PyraQvYlo4qDu8npwSceIgzQ



Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:

Hc0xdm2r

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/DXz51gdLduaJbWoomgwak3RFTIUGfe6z>



UAEM
RECTORÍA
2023-2029