

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE CIENCIAS



**“Síntesis y caracterización de electrodos basados en fibras de carbón
modificadas con polipirrol para su aplicación en dispositivos de
almacenamiento de energía”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
LICENCIADO EN QUÍMICA

ELABORADO POR:

Ofelia Marilú Arias Pinedo

 [0000-0002-9422-9716](https://orcid.org/0000-0002-9422-9716)

ASESORA:

Dra. Angélica María Baena Moncada

 [0000-0002-2896-4392](https://orcid.org/0000-0002-2896-4392)

LIMA – PERÚ

2023

Citar /How to cite	Arias Pinedo [1]
Referencia/Reference	[1] O. M. Arias Pinedo, <i>Síntesis y caracterización de electrodos basados en fibras de carbón modificadas con polipirrol para su aplicación en dispositivos de almacenamiento de energía</i> .
Estilo/Style: IEEE	[Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2023.

Citar /How to cite	(Arias, 2023)
Referencia/Reference	Arias, O. (2023). <i>Síntesis y caracterización de electrodos basados en fibras de carbón modificadas con polipirrol para su aplicación en dispositivos de almacenamiento de energía</i> .
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	[Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional UNI.

Dedicatoria

A Juan y Belmira

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a Dios porque a pesar de los obstáculos me dio la fortaleza de seguir adelante. A Andrés por ser un gran soporte en mi vida, a mis amigos y familiares que me dieron aliento a lo largo de mi carrera. Sobre todo, a mis amigos que conocí a lo largo de esta carrera del GIEA y GISMA, que siempre estuvieron apoyándome de diversas formas en el desarrollo de este trabajo.

Mi profundo agradecimiento a todos los profesores que me ayudaron y brindaron su conocimiento desde mi ingreso hasta ahora, Juan Asmat, Hugo Alarcón, Adolfo La Rosa Toro, Juan Carlos Morales, Ulises Quiroz, José Ruiz, Juan C. Calderón e Ivonne Monje. Así como también a los diversos colaboradores que me brindaron su apoyo en las pasantías, a Rusbel Coneo y Gabriel Planes de la Universidad Nacional de Río Cuarto, Alexandre Mello y Elvis López del Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas. Y sobre todo a mi asesora Angélica Baena por brindarme la confianza, el apoyo, conocimiento, paciencia y esfuerzo para sacar adelante este trabajo como líder del proyecto.

Finalmente, a mis amados padres Juan y Belmira por el gran esfuerzo que hicieron para brindarme educación y siempre inculcarme a salir adelante a pesar de las circunstancias.

La presente investigación fue financiada por CONCYTEC-FONDECYT Contrato N°C.401-2019/401 y el apoyo del Vicerrectorado de Investigación (VRI) de la Universidad Nacional de Ingeniería mediante “Concurso de Subvención a estudiantes para trabajos de Investigación conducente a su tesis 2022”.

Toda la vida es sueño, y los sueños, sueños son.

P. Calderón de la Barca.

Resumen

En el siguiente trabajo, se desarrolló electrodos para supercapacitores basados en de carbón obtenidas a partir de fibras de algodón (FC) y su modificación con óxido de grafeno reducido (rGO) y polipirrol (PPy). Los electrodos fueron analizados por microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopía Raman, espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y análisis de adsorción/desorción de N₂. Las FC están constituidas de fibras de carbón de apariencia lisa con un área superficial despreciable, cuando son modificadas con rGO se observa rugosidad en las fibras y un aumento del área superficial de 607 m² g⁻¹, de la modificación con PPy se obtuvo películas con una morfología tipo coliflor.

Se obtuvieron valores de capacitancia específica mediante el análisis de voltamperometría cíclica utilizando una celda de tres electrodos. Para ello, se varió la velocidad de barrido en un rango de 5-250 mV s⁻¹, en electrolito 1,0 mol L⁻¹ H₂SO₄ obteniéndose valores de 153 y 320 F g⁻¹ a 5 mV s⁻¹ para los FC y FC-rGO, respectivamente. Este aumento en la capacitancia se debe a la mejora en las propiedades conductoras del material carbonoso al impregnarlas con rGO, la cual incrementa el área superficial. Al modificarlo con PPy a las FC-rGO incrementó aún más la capacitancia específica a 743 F g⁻¹ a 5 mV s⁻¹ gracias a la contribución pseudocapacitiva del PPy. Estos resultados sugieren que los materiales sintetizados son una alternativa interesante como electrodos para aplicaciones en supercapacitores.

Palabras clave: Supercapacitores, fibras de algodón, óxido de grafeno reducido, polipirrol.

Abstract

In this study, electrodes for supercapacitors were developed based on carbon obtained from cotton fibers (FC) and modified with reduced graphene oxide (rGO) and polypyrrole (PPy). The electrodes were characterized using scanning electron microscopy (SEM), Raman spectroscopy, Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), and N₂ adsorption/desorption analysis. The FC exhibited smooth carbon fiber morphology with negligible surface area. However, after modification with rGO, the fibers showed increased roughness and a significantly enhanced surface area of 607 m² g⁻¹. The modification with PPy resulted in cauliflower-like morphology films.

Specific capacitance values were obtained through the analysis of cyclic voltammetry using a three-electrode cell. The scan rate was varied in the range of 5-250 mV s⁻¹, in a 1.0 mol L⁻¹ H₂SO₄ electrolyte, resulting in values of 153 and 320 F g⁻¹ at 5 mV s⁻¹ for FC and FC-rGO, respectively. This increase in capacitance is attributed to the improved conductive properties of the carbonaceous material when impregnated with rGO, which enhances the surface area. Further modification with PPy in FC-rGO significantly increased the specific capacitance to 743 F g⁻¹ at 5 mV s⁻¹, owing to the pseudocapacitive contribution of PPy. These results suggest that the synthesized materials are an interesting alternative as electrodes for supercapacitor applications.

Keywords: Supercapacitors, cotton fibers, reduced graphene oxide, polypyrrole.

Prólogo

En la actualidad se está generando un cambio en la matriz energética que consiste en migrar hacia energías alternativas por ser amigables con el ambiente, siendo la mayoría de estas renovables. Dado su carácter intermitente determinado por las condiciones climáticas, es imperativo el uso de dispositivos de almacenamiento de energía, como las baterías y los supercapacitores, por sus características particulares estos sistemas se pueden emplear de forma separada o en sistemas híbridos que permita un empleo eficiente de ambos sistemas y el incremento de su vida útil. Las baterías se caracterizan por una elevada densidad de energía y una baja densidad de potencia, así como un ciclo de vida más corto (aproximadamente 10000 ciclos), mientras que los supercapacitores presentan una baja densidad de energía y una elevada densidad de potencia, con un ciclo de vida más largo (1000000 ciclos). En este trabajo de investigación se eligió trabajar con supercapacitores, con la idea de mejorar los electrodos que existen actualmente los cuales se basan en carbono. Estos materiales se tratan de mejorar constantemente, en el caso de los materiales carbonosos, se buscan nuevas fuentes de obtención utilizando residuos sólidos como los residuos biomásicos, además también se estudia sus modificaciones con polímeros conductores y óxidos metálicos con la finalidad de aumentar su capacidad de almacenamiento de energía y durabilidad. En este trabajo de investigación se desarrolló materiales híbridos de carbón a partir de biomasa (algodón) y polímeros conductores (polipirrol).

Los electrodos de fibras de carbón fueron preparados a partir de almohadillas de algodón, estas al ser impregnadas con rGO mostraron un incremento en la capacitancia y de la

misma manera al utilizar PPy. El tipo de estudio realizado en este trabajo puede ser de utilidad para futuros investigadores que requieran trabajar con materiales similares.

Durante el desarrollo de este trabajo de investigación para la presente tesis se logró participar con trabajos en diversos congresos nacionales e internacionales y pasantías en la Universidad Nacional de Rio Cuarto – Argentina y el Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – Brasil.

La presente tesis se divide en los siguientes puntos: la introducción donde se podrá ver la descripción del problema, el estado del arte, la justificación y los objetivos; el marco teórico en el cual se da el alcance de algunas definiciones importantes; el desarrollo experimental se muestra los procedimientos para realizar la síntesis de los materiales carbonosos con rGO y PPy; en los resultados y discusiones se muestran las caracterizaciones morfológicas, fisicoquímicas y electroquímicas así como el análisis de estos; finalmente en la última parte se encuentran las conclusiones, recomendaciones y referencias.

Índice de contenido

	Página
Agradecimientos	iv
Resumen	vi
Abstract	vii
Prólogo	viii
Capitulo I. Parte introductoria del trabajo.....	1
1.1. Descripción del problema.....	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. Objetivo general.....	3
1.3.2. Objetivos específicos.....	3
1.4. Estado del arte.....	3
Capitulo II. Marco teórico.....	10
2.1. Cambio climático.....	10
2.1.1. Efecto invernadero.....	10
2.1.2. Energías Renovables (ER).....	12
2.1.3. Dispositivos de almacenamiento de energía.....	13
2.1.4. Supercapacitores.....	15
2.2. Carbono.....	17
2.2.1. Alótropos del carbono.....	18
2.2.2. Grafeno.....	18
2.2.3. Materiales de carbono para electrodos de supercapacitores.....	21
2.3. Polímeros conductores.....	22
2.3.1. Pirrol y polipirrol (PPy)	23
2.4. Caracterizaciones electroquímicas y fisicoquímicas.....	26
2.4.1. Voltamperometría cíclica (VC).....	26
2.4.2. Evaluación de almacenamiento de energía para el capacitor.....	27
2.4.3. Adsorción de N ₂ y modelo de BET.....	29

2.4.4. Microscopia Electrónica de Barrido (SEM).....	30
2.4.5. Espectroscopía infrarroja (IR).....	31
2.4.6. Espectroscopía Raman.....	32
Capitulo III. Desarrollo del trabajo de Investigación.....	34
3.1. Materiales	34
3.1.1. Equipos	34
3.1.2. Reactivos	35
3.2. Procedimiento experimental	35
3.2.1. Síntesis del óxido de grafeno (GO)	35
3.2.2. Obtención de los materiales de carbón a partir de fibras de algodón modificados con rGO.....	36
3.2.3. Preparación de los electrodos de trabajo.....	38
3.2.4. Electropolimerización de pirrol.....	39
3.2.5. Caracterizaciones morfológicas, fisicoquímicas de los materiales FC, FC-rGO, FC-PPy y FC-rGO-PPy.....	40
3.2.6. Caracterizaciones electroquímicas	40
Capitulo IV. Análisis y Discusión de Resultados.....	42
4.1. Obtención de los materiales carbonosos.....	42
4.1.1. Caracterizaciones morfológicas y fisicoquímicas de los materiales carbonosos.....	42
4.1.2. Evaluaciones electroquímicas para FC y FC-rGO.....	47
4.2. Modificación de FC y FC-rGO con PPy.....	50
4.2.1. Caracterizaciones morfológicas y fisicoquímicas de los materiales FC-PPy y FC-rGO-PPy.....	52
4.2.2. Caracterizaciones electroquímicas	54
Conclusiones	61
Recomendaciones	63
Referencias	64
Anexos.....	78

Índice de Tablas

	Página
Tabla 1: Resumen de las propiedades de los materiales carbonosos utilizados en supercapacitores.....	9
Tabla 2: Tendencia de los GEI en la superficie en el 2020.....	11
Tabla 3: Información general del C.....	18
Tabla 4: Descripción de los equipos utilizados en el desarrollo de la síntesis y caracterización.....	34
Tabla 5: Reactivos utilizados en el desarrollo del trabajo experimental.	35
Tabla 6: Parámetros para las evaluaciones electroquímicas.....	41
Tabla 7: Valores obtenidos de la adsorción/desorción de N ₂ utilizando BET.....	45
Tabla 8: Grupos funcionales obtenidos por espectroscopía IR para FC y FC-rGO.....	46
Tabla 9: Valores de capacitancia al modificar FC con PPy.....	55
Tabla 10: Valores de la capacitancia específica para los materiales de FC-rGO modificadas con PPy.....	58

Índice de figuras

	Página
Figura 1: Fuentes de energías renovables, a) energía eólica, b) energía solar y c) energía mareomotriz.....	12
Figura 2: Diagrama de Ragone para varios dispositivos de almacenamiento de energía.....	13
Figura 3: Esquema de un capacitor básico y su símbolo.....	14
Figura 4: Esquema de un supercapacitor, con electrodos de carbono poroso.....	16
Figura 5: Clasificación de los supercapacitores según los materiales empleados en los electrodos.....	17
Figura 6: Estructura de los diferentes alótopos del carbono, a) diamante y grafito, b) grafeno, c) nanotubos, d) fullereno.....	19
Figura 7: Estructura de los átomos de carbono del grafeno, mostrando la interacción entre su orbitales al enlazarse.....	20
Figura 8: Estructura de materiales basados en grafeno. (a) Grafeno, (b) óxido de grafeno (GO), (c) óxido de grafeno reducido (rGO).....	21
Figura 9: Modelo de una muestra de carbón con los diversos tipos de poro.....	22
Figura 10: Estructura del pirrol 2D y 3D. Tiene 1 par de e- no enlazados.....	23
Figura 11: Diferentes etapas del inicio del mecanismo de la electropolimerización del pirrol.....	24
Figura 12: Formación de la cadena polimérica.....	26
Figura 13: Forma de onda para la voltametría cíclica.....	27
Figura 14: Sistema de carga/descarga de un capacitor.....	28
Figura 15: Tipos de isothermas de adsorción según la IUPAC.....	29
Figura 16: Esquema de un SEM.....	31
Figura 17: Vibraciones moleculares a) vibraciones de tensión y b) vibraciones de flexión.....	32

Figura 18:	Ilustración de la dispersión Raman y Rayleigh.....	33
Figura 19:	Síntesis del óxido de grafeno (GO).....	37
Figura 20:	Obtención de las fibras de carbón a base de algodón.....	37
Figura 21:	Preparación del electrodo de trabajo a partir de los materiales carbonosos.....	38
Figura 22:	Electropolimerización del pirrol a X: 10, 25 y 50 mV s ⁻¹ en 0,5 mol L ⁻¹ H ₂ SO ₄	39
Figura 23:	Celda de trabajo para el análisis electroquímico.....	41
Figura 24:	Imágenes de: a) fibras de algodón (FA), b) al impregnarlas con GO (FA-GO) y c) luego de carbonizarla (FC-rGO).....	42
Figura 25:	Imagen SEM de los carbonos de telas de algodón, FC (a, b, c) y FC-rGO (d, e, f).....	43
Figura 26:	Adsorción/desorción de N ₂ para FC y FC-rGO.....	44
Figura 27:	Espectroscopías a) Raman y b) IR para FC y FC-rGO.....	46
Figura 28:	VC para FC-rGO a) variando la concentración del electrolito H ₂ SO ₄ , b) variando la ventana de potencial de trabajo en H ₂ SO ₄ 1,0 mol L ⁻¹	48
Figura 29:	VC de a) FC y b)FC-rGO , en H ₂ SO ₄ 1,0 mol L ⁻¹ para v: 5-250 mV s ⁻¹	49
Figura 30:	Relación de a) la capacitancia específica y b) comparación de la voltamperometría cíclica a 25 m V s ⁻¹ para FC y FC-rGO en H ₂ SO ₄ 1,0 mol L ⁻¹	50
Figura 31:	VC de la electrodeposición de pirrol, a) 10 mV s ⁻¹ , b) 25 mV s ⁻¹ y c) 50 mV s ⁻¹	51
Figura 32:	Imágenes SEM de la superficie de los electrodos después de la polimerización de Py a), b), c) para FC-PPy 3,2,1 y d), e), f) para FC-rGO-PPy 3,2,1 respectivamente.....	52
Figura 33:	Imágenes SEM-EDS para FC-PPy.....	53
Figura 34:	a)Espectro RAMAN y b) FTIR para FC-PPy3 y FC-rGO-PPy3...	54

Figura 35:	a), b), c) VC de pirrol sobre FC a 10, 25 50 mV s ⁻¹ de velocidad de depósito respectivamente.....	56
Figura 36:	a), b), c) VC de pirrol sobre FC-rGO a 10, 25 y 50 mV s ⁻¹ de velocidad de depósito respectivamente.....	57
Figura 37:	a)VC de comparación al modificar las FC con rGO y PPy, b) comparación de la capacitancia a una velocidad de barrido de 50 mV s ⁻¹ para todos los materiales.....	59
Figura 38:	Muestra a) Curvas de Carga y descarga para los materiales FC y sus modificaciones y b) estabilidad de FC-rGO-PPy2.....	60

Abreviaturas

Abreviación	Significado
ATR:	Reflexión total atenuada
BET:	Brunauer-Emmett-Teller
CNFs:	Nanofibras de carbono
Cs:	Capacitancia específica
EEG:	Grafeno exfoliado electroquímico
ER:	Energías renovables
FCC:	Carbón de algodón funcionalizado
GEI:	Gases de efecto invernadero
GO:	Óxido de grafeno
Gr:	Grafeno
HPGCF:	Fibras de carbono grafitico jerárquico
IR:	Espectroscopía infrarroja
Na-CMC:	Carboximetil celulosa
NHPC:	Carbono jerarquizado dopado con nitrógeno
P₀:	Presión de saturación
PPy:	Polipirrol
PGM:	polipirrol en capas / óxido de grafeno / nanotubos de carbono de paredes múltiples
PMnO₂:	Polipirrol/ óxido de manganeso
rGO:	Óxido de grafeno reducido
SEM:	Microscopio electrónico de Barrido
SC:	Supercapacitores de fibra
SSA:	Área superficial específica
TGA:	Análisis termogravimétrico
V_m:	Volumen de la monocapa
YPON:	Carbón comercial activado con nitrógeno y oxígeno

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

El objetivo de este trabajo es la desarrollar electrodos de fibras de carbón a partir de algodón modificadas con óxido de grafeno reducido y polipirrol para su uso en dispositivos de almacenamiento de energía, las cuales muestran buenas respuestas electroquímicas para su uso como electrodos en supercapacitores.

En esta sección se realizará la descripción del problema, estado del arte, justificación y objetivos.

1.1. Descripción del problema

El grafeno, es un excelente material, presenta una elevada conductividad, área superficial, dureza y resistencia, aunque su producción a gran escala y con alta pureza es complicada y costosa (Lemine et al., 2018; Shao et al., 2015). Por otro lado, hay gran interés sobre materiales poliméricos conductores como el polipirrol, la polianilina, etc., debido a que son flexibles, maleables y buenos conductores. No obstante, estos materiales dejan gran cantidad de residuos al obtenerlos a partir de sus monómeros por lo que es mejor utilizar métodos electroquímicos para su síntesis (Huang et al., 2016; Shao et al., 2015; Z. Wang et al., 2020).

Los materiales carbonosos a partir de biomasa, como las fibras de algodón, son de fácil obtención debido a que en gran porcentaje está compuesto de celulosa y es de muy bajo costo (W. Li et al., 2018). Además, presentan buena conductividad eléctrica y abundante porosidad, aunque son ineficientes para su uso en supercapacitores debido a su poca resistencia mecánica y flexibilidad (Ferrero et al., 2017; Nomura et al., 2019). Una manera de mejorar sus características eléctricas y mecánicas es su modificación con óxido de grafeno reducido y polipirrol. Por tanto, se plantea la siguiente interrogante: ¿En qué medida la

modificación superficial de materiales de carbonos obtenidos a partir de fibras de algodón con óxido de grafeno reducido y polipirrol tendrá un efecto en la capacitancia?

1.2. Justificación

Un gran problema ambiental que se presenta en la actualidad es el efecto invernadero producido en su mayoría por el incremento de CO₂ en la atmósfera debido a la quema de combustibles fósiles, según el registro de CO₂ de Mauna Loa este año se incrementó en casi 4,0 ppm con respecto al año 2022 (*Earth's CO2 Home Page*, s/f; EPA, 2017b; Keeling, 2020). Esta problemática, impulsa a migrar hacia las energías renovables y alternativas con la finalidad de reducir las emisiones de gas de efecto invernadero, sin embargo, estas energías en su mayoría son de tipo intermitentes, por lo que requiere ser almacenadas para su posterior uso (Lukatskaya et al., 2016; Moriarty & Honnery, 2016; Moriarty & Wang, 2015).

En la búsqueda de materiales alternativos para el almacenamiento de energías, existen muchas expectativas en el estudio de materiales carbonosos sobre todo obtenidos a partir de biomasa como el algodón debido a su reducido precio en el mercado y su gran producción (Jiang et al., 2019). Además, esta biomasa se cultiva en nuestro país principalmente en Ica, Lima, Lambayeque y Piura siendo un producto importante para nuestra economía y puede ser aprovechado como material precursor para electrodos de supercapacitores (Escobar, 2021; Zubrik et al., 2017). No obstante, estos materiales al ser usados sin modificación tienen poca área superficial, son frágiles y presentan poca resistencia mecánica (Ferrero et al., 2017; Nomura et al., 2019). Por lo tanto, surge la necesidad de modificar estos materiales carbonosos para mejorar sus propiedades capacitivas, conductoras y mecánicas (Kulandaivalu et al., 2020).

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

- Desarrollar electrodos de fibras de carbón a partir de algodón modificados con óxido de grafeno reducido y polipirrol y evaluar su capacidad para el almacenamiento de energía.

1.3.2. Objetivos Específicos

- ❖ Sintetizar materiales carbonosos a partir de algodón impregnados con óxido de grafeno.
- ❖ Electrodepositar polipirrol sobre los materiales carbonosos mediante voltamperometría cíclica.
- ❖ Caracterizar los materiales carbonosos desarrollados mediante técnicas de adsorción/desorción de nitrógeno (método BET), microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopía Raman y espectroscopía infrarroja (IR).
- ❖ Evaluar la capacidad para almacenar carga en un sistema de dos y tres electrodos para los materiales carbonosos mediante técnicas electroquímicas, como: voltamperometría cíclica y curvas de carga y descarga.

1.4. Estado del arte

En la actualidad el cambio climático es un tema preocupante a nivel mundial. Según un informe del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (por sus siglas en inglés IPCC), las temperaturas globales actuales son las más altas que se han experimentado desde 1885 (Ahmed et al., 2018). Debido al calentamiento global se espera que la temperatura global aumente 6,4 °C entre los años 2007 y 2100, a causa de acumulación de los gases de efecto invernadero (CO₂: 82 %, metano: 10 %, otros: 8 %; EPA-2017) provocada por la combustión de fuentes de energía fósiles (carbón, petróleo, etc.), trayendo

como consecuencia graves daños ambientales (Ahmed et al., 2018; Perera, 2017; J. Wang et al., 2017).

Considerando el mencionado hecho, surge la necesidad de buscar fuentes de energías seguras, sostenibles y/o renovables. En este sentido las energías renovables (ER) poseen muchas ventajas como: capacidad técnica adecuada para satisfacer la demanda necesaria, mínimos efectos ambientales en el uso diario y desplegarse ampliamente a corto tiempo, ya que está limitado por el cambio climático. Por ello, ofrece mejores perspectivas para reemplazar a los combustibles fósiles, se pronostica que para el año 2024 representará al menos 30% de la energía producida mundialmente (Agencia Internacional de Energía) a medida que disminuya los costos de su implementación. Una gran diferencia con los combustibles fósiles es que las ER son intermitentes (Lukatskaya et al., 2016; Moriarty & Honnery, 2016; Moriarty & Wang, 2015).

Dada las diferentes necesidades, se necesita trabajar en sistemas que sirvan para el almacenamiento de energía, de forma rápida y con ciclos de vida largo. En el ámbito tecnológico sobre almacenamiento de energía existen tecnologías muy variadas, dentro de las cuales se encuentran los supercapacitores (J. Fernández & Álvaro, 2019).

Los supercapacitores son sistemas de almacenamiento muy prometedores, debido a su alta densidad de potencia, larga vida útil en comparación con las baterías y mayor densidad de energía en comparación con los capacitores dieléctricos y electrolíticos (Zhong et al., 2016). Los materiales de los electrodos son un punto clave para los supercapacitores, ya que determinan el rendimiento de la celda (Yan, Li, Lan, Wu, & Lee, 2020). Por ejemplo, los supercapacitores (SC) de fibras de carbón tienen excelente flexibilidad, alta capacitancia y densidad de potencia, los materiales que componen los electrodos activos son a base de carbono, óxidos metálicos y compuestos híbridos (D. Chen et al., 2020).

Los materiales de carbón activado son los más utilizados en el estudio de supercapacitores debido a que el proceso de obtención es fácil, presentan buena conductividad eléctrica y abundante porosidad (Herou et al., 2018; Yao et al., 2023). El carbón activado comercial dopado con oxígeno y nitrógeno (YPON) presenta un área BET de $2220 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ y una capacitancia específica de hasta $22,4 \text{ F g}^{-1}$ a $0,1 \text{ A g}^{-1}$, estables para 1000 ciclos carga y descarga (Yang et al., 2020). Para fibras de carbón activado obtenidas por electro-spinning (BSACFs) se tiene valores de área BET de $1412 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, y una capacitancia de hasta 130 F g^{-1} a $0,1 \text{ A g}^{-1}$ con un 93 % de retención de la capacitancia después de 4000 ciclos (Zhan et al., 2020). Otro estudio muestra que el carbón poroso a partir de resorcinol-formaldehído da una capacitancia de hasta 121 F g^{-1} y además tiene un área específica de $1895 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ en TEABF_4 $1,0 \text{ mol L}^{-1}$, pero en el capacitor solo se aprovecha un 20,8 % del área superficial (Abbas et al., 2020). También, papeles de fibra de carbón activado (ACFP) a base de celulosa, muestran alta área superficial ($808\text{-}1106 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) y una capacitancia de hasta 165 F g^{-1} en KOH 6 mol L^{-1} (J. Chen et al., 2022).

Existe un creciente interés por la obtención de materiales carbonosos a partir de biomasa para su uso en supercapacitores, debido a su estructura natural meso-microporosa, alta área superficial específica y buenas propiedades electroquímicas (Zubrik et al., 2017). Estudios muestran el uso de carbón activado a partir de residuos de poda de olivo (Ponce et al., 2022), residuos de cuero (El-Hout et al., 2022) o carbón obtenidos a partir de algodón (Ren et al., 2023), entre otros. En este sentido, los materiales carbonosos en base a telas de algodón son una excelente estrategia para valorizar estos residuos, el dopaje con nitrógeno (NOC) permite obtener valores de capacitancia de 180 F g^{-1} a una densidad de corriente de $0,5 \text{ A g}^{-1}$ con una superficie BET de $617 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ utilizando como electrolito KOH 6 mol L^{-1} (L. Chen et al., 2017). Además, la activación de las telas de algodón con KOH permiten la

obtención de fibras de carbono grafitico jerarquizado (HPGCF) con un incremento del área superficial de hasta $1716 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, las cuales generan capacitancias de alrededor de 96 F g^{-1} cuando se utiliza una densidad de corriente de 20 A g^{-1} en H_2SO_4 1 mol L^{-1} , además se obtiene un 89 % de retención de la capacitancia después de 5000 ciclos (H. Wang et al., 2015). También, muestran tela de algodón carbonizadas con nanocompuestos de polianilina que exhiben una capacitancia de $350,8 \text{ F g}^{-1}$ ($1859,2 \text{ mF cm}^{-2}$) a 1 Ag^{-1} y alta retención de capacitancia del 90,8 % durante 10000 ciclos en $1 \text{ mol L}^{-1} \text{ H}_2\text{SO}_4$ (Hong et al., 2021).

Por otro lado, el grafeno es un material muy interesante para el uso en SC ya que posee buenas propiedades conductoras, movilidad de carga eléctrica ($230\,000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$) y conductividad térmica (3000 W mK^{-1}) y gran área superficial de $2600 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ (Lemine et al., 2018; Tan & Lee, 2013). Estudios muestran, carbones activados a base de grafeno y fibras de algodón (ACC-rGO), que generan capacitancias de hasta 310 F g^{-1} en KOH 6 mol L^{-1} (Song et al., 2017). También, se muestran fibras de algodón comercial impregnadas con óxido de grafeno reducido (FAC/rGO) con capacitancias de hasta 198 F g^{-1} a 60 mA^{-1} en H_2SO_4 $1,0 \text{ mol L}^{-1}$, 1000 ciclos con 97,7% de retención de la capacitancia y además tiene área superficial específica de hasta $1458 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ (Bazán et al., 2020). Por otro lado, se muestran carbón de hilos de algodón decorados con óxido de grafeno reducido que puede alcanzar una capacitancia de $13,31 \text{ mF cm}^{-1}$ a $0,1 \text{ mA cm}^{-1}$ como supercondensadores sólidos (L. Li et al., 2023).

El uso de polímeros conductores es una buena y novedosa alternativa en el diseño de los supercapacitores, pero se requiere que sean robustos y duraderos bajo las deformaciones mecánicas (Z. Wang et al., 2020). El polipirrol (PPy) cuenta con estas propiedades, por lo que se ha convertido en un material prometedor en la modificación de materiales para supercapacitores (Huang et al., 2016).

Existen investigaciones donde se emplean películas de de grafeno y polipirrol (HHG-PPy-20) libre de aglutinantes, con capacitancias de hasta 416 F g^{-1} (Fan et al., 2017) y películas delgadas de un complejo de cobalto y polipirrol ($\text{CoN}_4\text{-PPy film}$), con capacitancias de $721,9 \text{ F g}^{-1}$ a $0,5 \text{ A g}^{-1}$ en HClO_4 $0,1 \text{ mol L}^{-1}$, con un 93 % de retención de la capacitancia después de 500 ciclos además de proporcionar una excelente estabilidad electroquímica (Parnell et al., 2019), estos resultados muestran que es posible aumentar la capacitancia de los materiales carbonosos modificándolos con polímeros conductores y grafeno (Kulandaivalu et al., 2020). Mientras que en electrodos de carbón jerárquico decorado con polipirrol procedente de madera licuada, en un sistema de tres electrodos, exhibe un excelente rendimiento capacitivo de $421,45 \text{ F g}^{-1}$ y una estabilidad de ciclado del 82,9 % después de 5000 ciclos (Lv et al., 2023), incluso PPy sobre carbón activado derivado de cabello humano (HHAC/PPy) muestra una capacitancia de 358 F g^{-1} en 1 mol L^{-1} de H_2SO_4 (Dubey et al., 2022).

En electrodos para supercapacitores basados en PPy y grafeno exfoliado electroquímicamente (EEG), se tiene una capacitancia de hasta $348,8 \text{ F g}^{-1}$ a $0,5 \text{ mA g}^{-1}$ en $\text{H}_2\text{SO}_{4(\text{ac})}$, con un 94,3 % de retención de la capacitancia después de 5000 ciclos (Ji et al., 2020). Se ha encontrado valores de capacitancia máxima hasta de 405 F g^{-1} a $0,25 \text{ mA g}^{-1}$, con un 95 % de retención de la capacitancia después de 2000 ciclos en electrodos de aerogeles de nanofibras de celulosa/rGO/PPy (CNFs/rGO/PPy) (Y. Zhang et al., 2019), en materiales híbridos de PPy combinados con carbono poroso obtenidos a partir de celulosa presenta una capacitancia de $387,6 \text{ F g}^{-1}$ ($2,5 \text{ A g}^{-1}$ en H_2SO_4 $1,0 \text{ g mol}^{-1}$, con un 92,6 % de retención de la capacitancia después de 10 000 ciclos) (Zhuo et al., 2019).

En la Tabla 1 se muestra un resumen de las capacitancias y área BET de los materiales estudiados por diferentes autores.

En este trabajo se obtiene un electrodo para supercapacitores usando fibras de carbono modificadas con óxido de grafeno reducido (rGO) y PPy (polimerización en $0,5 \text{ mol L}^{-1} \text{ H}_2\text{SO}_4$).

Tabla 1

Resumen de las propiedades de los materiales carbonosos utilizados en supercapacitores.

Material	Capacitancia (F g⁻¹)	% de retención de C - ciclos	Electrolito	Área BET (m² g⁻¹)	Referencia
YPON	22,4	89,6 % - 10 000	TEABF ₄ /ACN	2220	(Yang et al., 2020)
BSACFs	130	93 % - 4 000	LiPF ₆	1412	(Zhan et al., 2020)
Carbón activado	121	-	TEABF ₄	1895	(Abbas et al., 2020)
Gr	100-205	-	-	2600	(Lemine et al., 2018)
NOC	180	95 % - 5000	KOH 6 mol L ⁻¹	617	(L. Chen et al., 2017)
HPGCF	96	89 % - 5000	H ₂ SO ₄ 1 mol L ⁻¹	1716	(H. Wang et al., 2015)
ACC-rGO	310	95% - 10 000	KOH 6 mol L ⁻¹	-	(Song et al., 2017)
FAC/rGO	198	97,7 %-1000	H ₂ SO ₄ 1mol L ⁻¹	1458	(Bazán et al., 2020)
HHG-PPy-20	328	82,4 % - 2 000	KOH 6 mol L ⁻¹	312	(Fan et al., 2017)
CoN ₄ -PPy films	721,9	93 % - 500	HClO ₄ 0,1 mol L ⁻¹	-	(Parnell et al., 2019)
PPy/EEG	348,8	93,4 % - 5 000	KCl 1 mol L ⁻¹	-	(Ji et al., 2020)
CNFs/rGO/PPy	405	95 % - 5 000	-	-	(Y. Zhang et al., 2019)

Nota . YPON (carbón activado comercial dopado con oxígeno y nitrógeno), BSACFs (carbón activado obtenidas por electro-spinning), Gr (grafeno), NOC (carbón de telas de algodón dopadas con nitrógeno), HPGCF (fibras de carbono grafitico jerarquizado), ACC-rGO (carbones activados a base de grafeno y fibras de algodón), FAC/rGO (fibras de algodón comercial impregnadas con óxido de grafeno reducido) HHG-PPy-20 (películas de grafeno y polipirrol) , CoN₄-PPy (películas delgadas de un complejo de cobalto y polipirrol), PPy/EEG (polipirrol y grafeno exfoliado electroquímicamente), CNFs/rGO/PPy aerogeles de nanofibras de celulosa/rGO/PPy

Capítulo II. Marco Teórico

2.1. Cambio climático

La temperatura promedio del planeta está experimentando grandes cambios debido al calentamiento global. Estos cambios se reflejan en el incremento del nivel del mar, el deshielo de los glaciares y la intensificación de los fenómenos meteorológicos. Esto influye en la salud humana al alterar la estacionalidad de enfermedades infecciosas, el ámbito geográfico y ecosistemas terrestres y marinos. Mayormente este cambio se da en los últimos 50 años debido al consumo de los combustibles fósiles, que al ser quemados producen una serie de gases que generan el efecto invernadero (OMS, 2018; UNESCO, 2017).

2.1.1. *Efecto invernadero*

El efecto invernadero, es causado por gases atmosféricos que capturan la radiación infrarroja emitida por la superficie de la tierra, pero estos permiten que la radiación solar siga pasando. Este fenómeno es similar a lo que ocurre en un invernadero debido a los cristales utilizados, que dejan pasar la luz, pero retiene el calor. Sin este efecto invernadero la temperatura media en la Tierra sería $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. La producción natural de estos gases de efecto invernadero (GEI) ha existido siempre producto de los seres vivos, pero eran absorbidos en su mayoría por los océanos y cubierta vegetal lográndose un equilibrio. Sin embargo, en los últimos 70 años el ritmo de emisión de los GEI se incrementó debido a la actividad del hombre, dificultando la absorción natural, dando lugar al aumento de la temperatura terrestre. Siendo los principales GEI: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), gases fluorados y $\text{H}_2\text{O}_{(v)}$ (Garea Moreda et al., 2014).

Debido a la quema de combustibles fósiles, el incremento de CO_2 en la atmósfera, es el exceso no absorbido por las plantas en su ciclo biológico. De esta misma manera y sumado a actividades agrícolas e industriales se libera el N_2O , mientras que el CH_4 se emite debido de carbón, gas natural y petróleo durante la producción y transporte. También por prácticas

agrícolas y ganaderas, aunque en menor cantidad. Por otro lado, los gases fluorados (hidrofluorocarbonos, clorofluorocarbonados, y halones) son causados por la industria y son causantes de la destrucción de la capa de ozono de la estratósfera lo cual nos protege de los ratos UV (EPA, 2017a).

La información del promedio anual de la variación de los GEI realizados por WMO (del inglés World Meteorological Organization), en el 2020 se muestra en la Tabla 2 , esta información es con un nivel de confianza del 68 % según indica los autores (WMO, 2021).

Tabla 2

Tendencia de los GEI en la superficie en el 2020.

	CO₂	CH₄	N₂O
Abundancia media global 2020	413,2 ± 0,2 ppm	1889 ± 2 ppb	333,2 ± 0,1 ppb
Aumento absoluto 2019-20	2,5 ppm	11 ppb	1,2 ppb
Aumento relativo 2019-20	0,61 %	0,59 %	0,36 %
Aumento absoluto anual medio en los últimos 10 años	2,40 ppm año ⁻¹	8,0 ppb año ⁻¹	0,99 ppb año ⁻¹
Abundancia de 2020 en relación con 1750	149 %	262 %	123 %

Nota. En esta tabla se muestra la abundancia media mundial anual en la superficie en el 2020 de los GEI. Tabla tomada de (WMO, 2021).

2.1.2. Energías Renovables (ER)

La energía renovable es aquella energía que se obtiene en el mundo natural que se restablece inmediatamente luego de ser utilizada (González Velasco, 2012). Estas pueden ser obtenidas de fuentes naturales como: la luz solar, viento, agua, desechos orgánicos, etc. Estas fuentes tienen la capacidad de regenerarse naturalmente por lo que son inagotables. Algunas de estas ER son las energías: hidráulicas, eólicas, solares, mareomotriz etc., Figura 1. Las energías renovables tienen muchos beneficios para el ambiente, ya que su uso produce mucho menos emisiones de GEI, la contaminación de agua superficial y subsuelo, además de ser eficiente, sustentable y económica en comparación con los combustibles fósiles. Pero, este tipo de energía son de tipo intermitentes, las cuales requieren ser almacenadas para su constante uso (Energy X, s/f; Gross et al., 2003; Twidell, 2021; United Nations, s/f).

Figura 1

Fuentes de energías renovables, a) energía eólica, b) energía solar y c) energía mareomotriz.



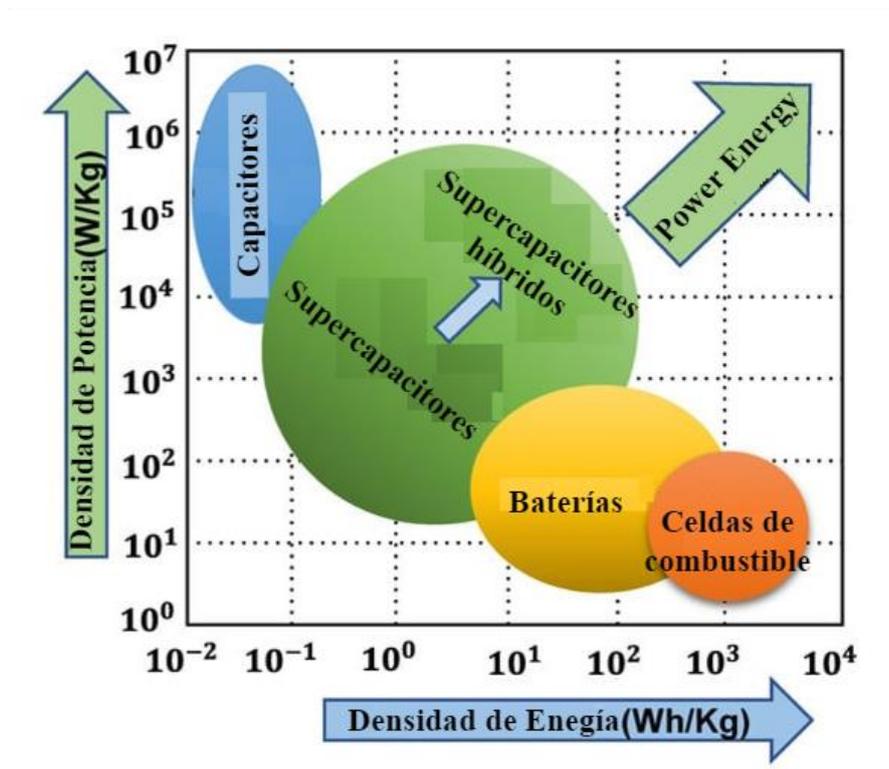
Fuente: a)(Martín, 2021), b)(Factorenergia, 2023) y c)(Fairley & Moya, 2011).

2.1.3. Dispositivos de almacenamiento de energía

Existen diversos dispositivos que almacenan energía tales como: las baterías, capacitores electroquímicos, supercapacitores etc. Estos dispositivos almacenan energía que difieren entre sí, una manera de simplificar estas características es con el gráfico de Ragone como se muestra Figura 2. Este gráfico nos muestra la relación entre la densidad de almacenamiento de energía (expresado en Wh/ kg) y la densidad de potencia (expresado en W/kg) (Calvo et al., 2009; Guacaneme et al., 2014; Kosky et al., 2021). Las baterías almacenan energía en gran cantidad en masa y volumen pequeños, pero su entrega de energía es muy lenta, esto dificultada su utilidad en sistemas donde se necesita un almacenamiento rápido con alta potencia, también tiene muy poca vida útil y los materiales usados en su

Figura 2

Diagrama de Ragone para varios dispositivos de almacenamiento de energía.



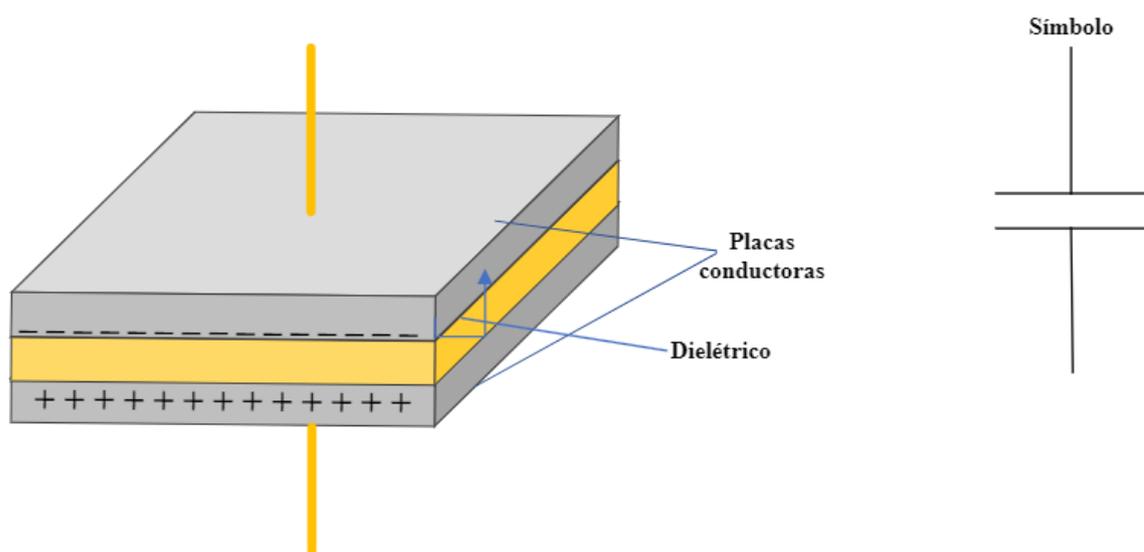
Nota. Comparación de densidad de potencia vs densidad de energía de dispositivos para almacenamiento de energía eléctrica. Modificado de: (Wayu et al., 2021)

fabricación no son amigables con el ambiente en su mayoría. Sin embargo, los Supercapacitores son de gran interés ya que tienen mayor densidad de potencia, excelente durabilidad y rápidos procesos de carga y descarga, como una alternativa o complemento a las baterías en los sistemas de almacenamiento de energía (Guacaneme et al., 2014; Wayu et al., 2021).

Los capacitores son acumuladores de energía en forma de carga eléctrica a través de sus placas, a diferencia de las baterías. El formato básico de este tipo de dispositivos es dos placas paralelas conductoras (carbón activado), separadas de un dieléctrico (aislante), un esquema general se muestra en la Figura 3. La unidad del SI para medir la capacidad (C) de este dispositivo es el Faradio (F), que es una relación entre la carga y diferencia de potencial. Cuanto mayor sea la capacidad mayor será la energía almacenada (Barrera Doblado & Ros Marín, 2017; Young & Freedman, 2018).

Figura 3

Esquema de un capacitor básico y su símbolo.



2.1.4. Supercapacitores

Los supercapacitores (SC), tienen características tanto de capacitores y baterías, sin que ocurra reacciones electroquímicas, por lo que el número de ciclos para carga y descarga son mucho mayores que estas. Su estructura está dada por dos electrodos paralelos separados por un dieléctrico similar a los capacitores. No obstante, su capacidad es miles de veces mayores que los capacitores convencionales, presenta alta eficiencia energética de hasta 98%, además de cargarse y descargarse en periodos de tiempos breves (Guacaneme et al., 2014; Wayu et al., 2021).

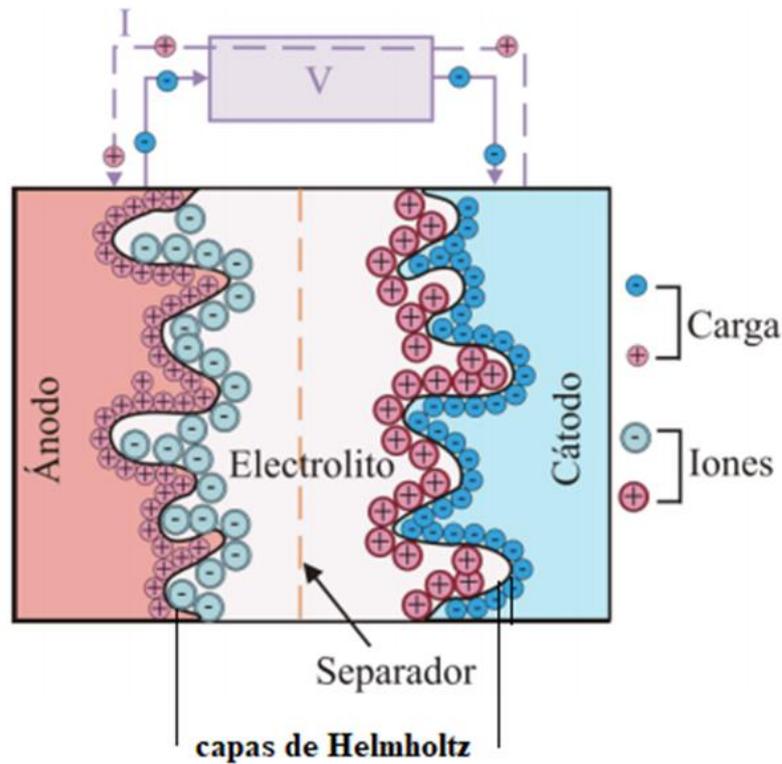
Los materiales más comunes usados en los SC son a base de carbono, aprovechando la abundancia de este material y sus diferentes conformaciones (grafeno, fibras de carbono, nanotubos de carbono, carbono de materias primas, etc.), por lo que hace que estos dispositivos sean más amigables con el ambiente (McFadden, 2020) . Además, los SC pueden utilizarse en diversos sectores incluso sería una buena alternativa para suplantar a las baterías. Su ventaja es que esta hecho de materiales de baja toxicidad, fácil de reciclar y tienen la capacidad de carga y descarga rápida que los hace ideal para resistir altas subidas de tensión (Twenergy, 2019).

El esquema de un supercapacitor de carbono poroso se muestra en la Figura 4. Entre electrodo y electrolito se forma la doble capa eléctrica (Wayu et al., 2021). Para poder explicar la formación y comportamiento de esta doble capa en los SC, se proponen diferentes modelos teóricos, como el modelo de Gouy-Chapman-Stern que permite entender y describir cómo se distribuyen y comportan los iones y las cargas en la doble capa. Según este modelo, los iones presentes en la doble capa se consideran como cargas puntuales, y las interacciones predominantes son las electrostática de Coulomb. También, se asume que la permitividad eléctrica en el interior de la doble capa es constante y se considera que el solvente es uniforme y constante a nivel atómico. Además, esta capa es muy delgada (< 1

nm), y el carbono al tener grandes áreas superficiales hacen que tenga gran capacitancia en relación con el volumen empleado, por tanto se busca tener electrodos de carbono de gran área superficial (Calvo et al., 2009; Rodriguez, 2013).

Figura 4

Esquema de un supercapacitor, con electrodos de carbono poroso.

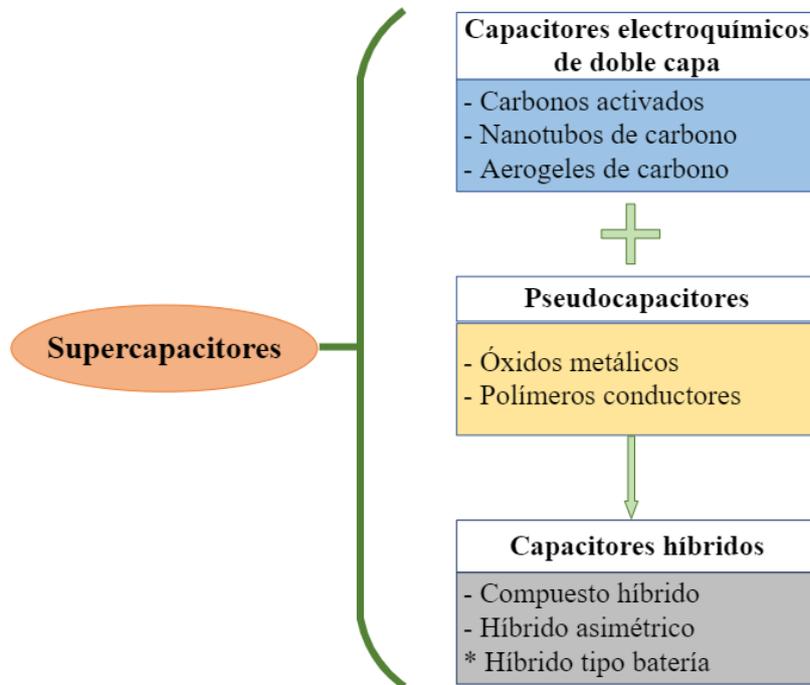


Fuente: Modificado de: (Baas, 2015).

A su vez existen diversos tipos de supercapacitores, los cuales difieren según la composición de sus electrodos (Figura 5), estos tendrán diversos mecanismos. Estos son: los Faradaicos o pseudocapacitores que implican transferencia de carga entre electrodo electrolito, no Faradaicos o de doble capa eléctrica el cual se distribuye mediante procesos físicos sin formación o ruptura de enlaces químicos, y una combinación de los dos (Halper & Ellenbogen, 2006).

Figura 5

Clasificación de los supercapacitores según los materiales empleados en los electrodos.



Fuente: Modificado de:(Halper & Ellenbogen, 2006)

2.2. Carbono

Es un elemento químico, que se encuentra en el grupo IVA del segundo periodo, tiene número atómico 6 y símbolo **C**, otros datos importantes se muestran en la Tabla 3. Como elemento se encuentra en nuestra vida diaria, ya que, está presente en compuestos orgánicos (biomasa, petróleo, gas natural, etc.) e inorgánicos (CO, CO₂, etc.) debido a que puede adoptar diferente hibridación sp, sp², sp³. Sin embargo, cuando forman enlaces entre C-C puros, forman diferentes estructuras alotrópicas (grafito, diamante fullerenos, nanotubos, grafeno, nanofibras, etc.) ya sea de manera natural o hechas en el laboratorio, los cuales a temperatura ambiente son sólidos y presentan diversas propiedades físicas y químicas, debido a esto tiene un gran uso en la ciencia e industria. (Buckley & Edie, 1993; Quan et al., 2023).

Tabla 3*Información general del C.*

Elemento	Carbono
Peso atómico	12,011
Valencia	II, IV
Configuración electrónica	$1s^2 2s^2 2p_x^1 2p_y^1 2p_z$

Fuente: (IUPAC, 2022)

2.2.1. Alótropos del carbono

Los alótropos son las diferentes formas físicas en los que se puede ordenar los átomos de un elemento químico. Como es el caso del carbono elemental; sin embargo, esto muestra un comportamiento inusual, debido a que forma una serie de estructuras con características diferentes y especiales, molecular y estructuralmente. De estos alótropos, los más conocidos son el grafito y diamante (3D), también hay otros como: nanotubos (1D), fullerenos (OD), grafeno (2D), etc., los cuales se muestran en la Figura 6, este último es el más interesante en la actualidad debido a sus propiedades conductoras, alta área superficial, entre otras (Katsnelson, 2007).

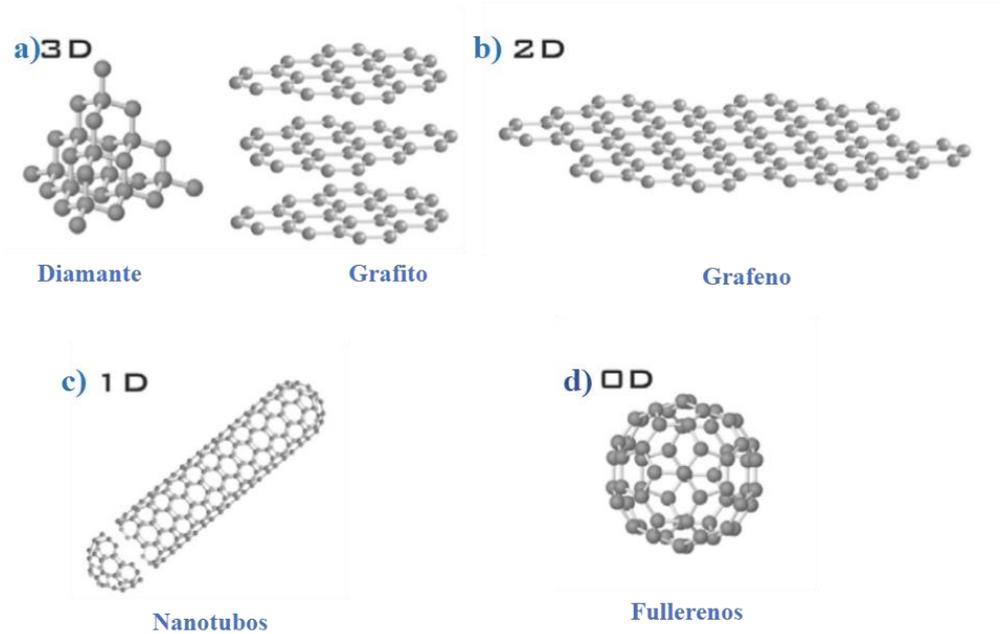
2.2.2. Grafeno

Los científicos Andre Geim y Konstantín Novoselov consiguieron aislar el grafeno a temperatura ambiente en el 2004, obtuvieron premio Nobel de Física en 2010 (Gerstner, 2010). con el cual este material ha sido de gran estudio en los últimos años, debido a que presenta características muy especiales, en comparación con sus alótropos. Ya que, tiene una estructura 2D con hibridación sp^2 del carbono en una red hexagonal que permite expansiones térmicas, también tiene orbitales $2p_z$ que son perpendiculares al plano atómico, el cual es

una característica de materiales 3D, por lo que puede resistir compresiones en direcciones perpendiculares a la red (Figura 7).

Figura 6

Estructura de los diferentes alótropos del carbono, a) diamante y grafito, b) grafeno, c) nanotubos, d) fullerenos.



Fuente: Modificado de Katsnelson (2007).

una característica de materiales 3D, por lo que puede resistir compresiones en direcciones perpendiculares a la red (Figura 7).

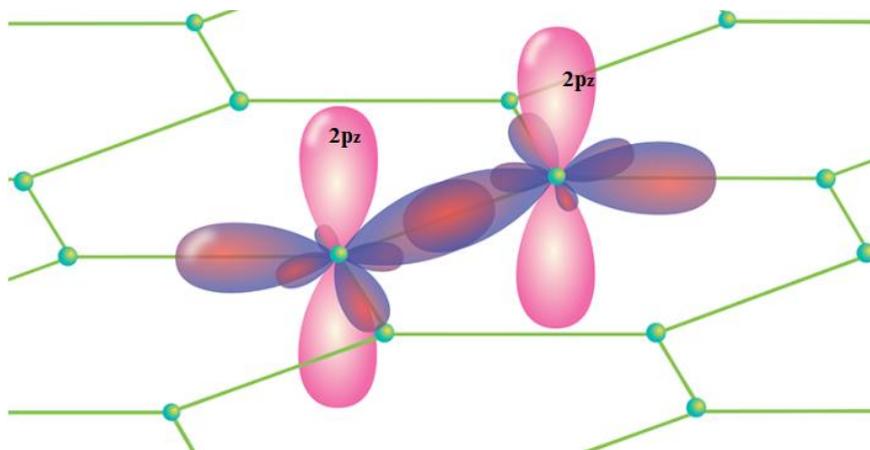
Lo interesante de este material es su gran área superficial, conductividad y capacidad para transferir electrones. También tiene otras características especiales, por ejemplo: la movilidad de electrones en la capa de grafeno es 100 veces mayor que la del silicio, la fuerza física es 100 veces mayor que la del hierro y tolera densidades de corriente mejor que el cobre (Bolotin et al., 2008; De la Fuente, s/f; Geim, 2009; D. Li et al., 2019; Proctor, 2019).

Debido a esto, este material tiene creciente interés para modificar electrodos de supercapacitores. Pero, no existe un método sencillo y barato para poder obtener en cantidad

el material puro; por lo tanto, se están optando por buscar familias que tengan características similares, o a partir de ellas llegar a producir el compuesto puro.

Figura 7

Estructura de los átomos de carbono del grafeno, mostrando la interacción entre su orbitales al enlazarse.

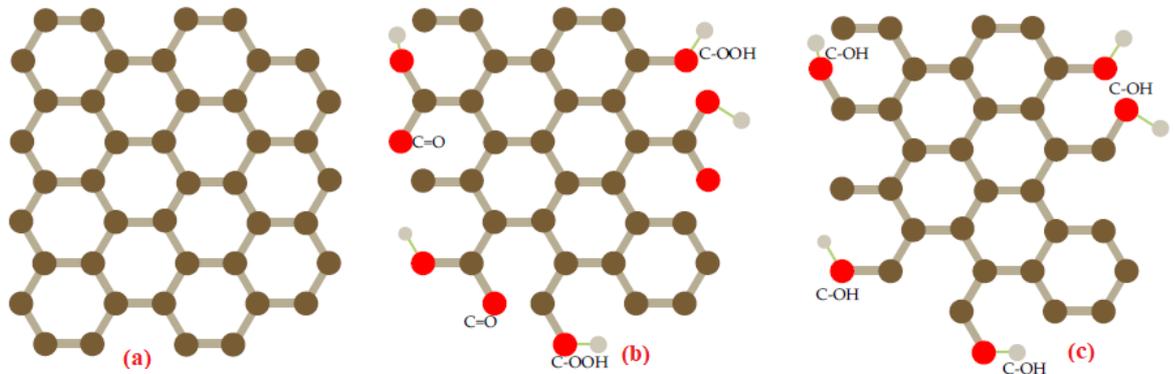


Fuente: Imagen modificada de (Proctor, 2019).

De estas familias del grafeno, los que tienen importantes utilidades son el óxido de grafeno (GO) y óxido de grafeno reducido (rGO). Estos son obtenidos a partir de exfoliación química o física de polvo de grafito (Figura 8a), por el método de Hummers que realiza la síntesis del GO (Figura 8b) el cual es rico en grupos oxigenados, este material es hidrofílico, eléctricamente aislante y mecánicamente más pobre que el grafeno, además su composición varía según la fuente de grafito utilizado. Sin embargo, al realizarle una reducción química a este óxido, se eliminan los grupos funcionales, se tiene un material que es intermedio entre el grafeno y su óxido que es el rGO (Figura 8c), el cual posee propiedades de ambos materiales y es conductor (D. Li et al., 2019; F. Liu et al., 2019; Reina et al., 2017).

Figura 8

Estructura de materiales basados en grafeno. (a) Grafeno, (b) óxido de grafeno (OG), (c) óxido de grafeno reducido (rGO).



Fuente: Imagen tomada de (Li, D.,2019).

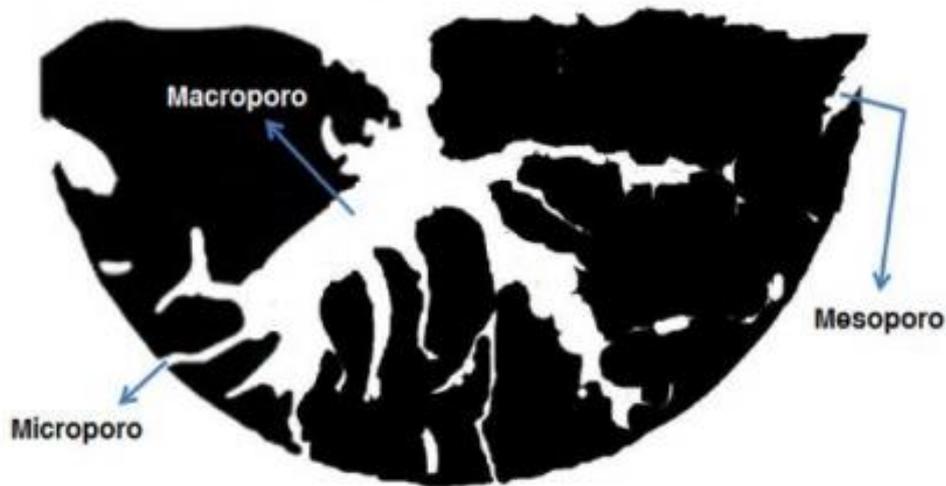
2.2.3. Materiales de carbono para electrodos de supercapacitores

Al tener una gran diversidad tanto de fuentes de obtención y formas alotrópicas, el carbono, es un material atractivo para aplicaciones en electrodos de supercapacitores. En particular, los carbones obtenidos a partir de biomasa están siendo los más estudiados, debido a su bajo costo y gran variedad. Además, a estos materiales se les puede aplicar diversos métodos físicos y químicos al momento de hacer su síntesis para poder controlar su área superficial y porosidad. Uno de los materiales más utilizados para estos fines es el carbono activado, el cual se obtiene al someter la biomasa (por ejemplo: fibra de algodón, cascara de coco, pajas de trigo, etc.), que se activa sea con ácido, base u otro agente, a un proceso térmico (pirólisis) en atmósfera inerte. De esto, su área superficial varía según el método de oxidación parcial sea físico (entre 700 °C a 1200°C) o químico (entre 400°C y 700 °C), que utiliza como activantes: ácido fosfórico, hidróxido de sodio, etc. Como resultado, la activación crea una red de poros en la superficie del carbono, las cuales pueden

ser: microporos (< 2nm), mesoporos (entre 2 y 50 nm) y macroporos (> 50 nm), los cuales se visualizan en la Figura 9 (Lee et al., 2017; L. Zhang & Zhao, 2009).

Figura 9

Modelo de una muestra de carbón con los diversos tipos de poro.



Fuente: (Modificado de: Lee (2017)).

2.3. Polímeros conductores

Estos polímeros tienen la propiedad de ser conductores de corriente eléctrica, debido a propiedades intrínsecas que poseen. Esta conductividad eléctrica se debe a la existencia de una conjugación extendida de electrones π a lo largo de la cadena polimérica. Por ejemplo, en los polímeros conductores como: polipirrol, poliacetileno, polianilina y politiofeno, contienen en su cadena principal carbonos sp^2 . Esta hibridación permite la formación de enlaces σ covalentes entre los carbonos tanto en la cadena principal como en la cadena ramificada. La hibridación sp^2 deja un orbital p no enlazado (p_z generalmente); este orbital no enlazado se solapa con otro orbital de su misma clase generando un enlace π con una distribución de dobles enlaces C=C alternándose con enlaces C-C simples a lo largo de la cadena (Arias, 2007).

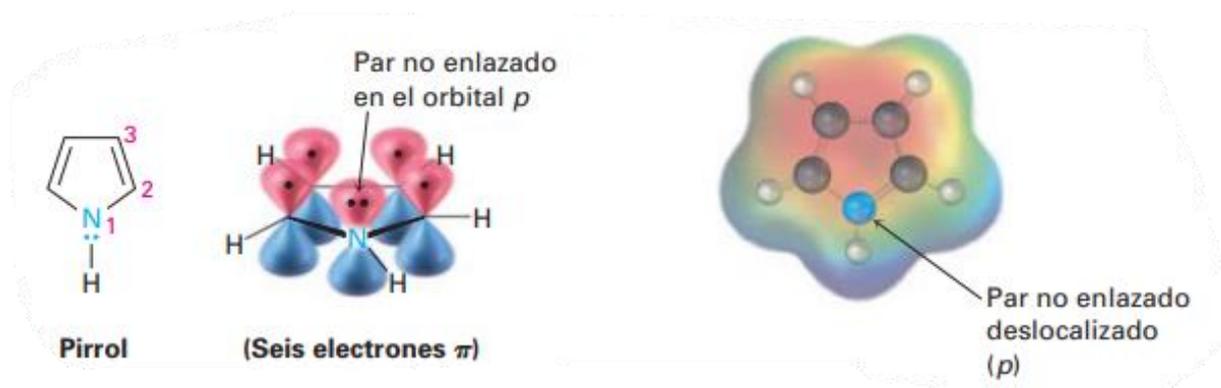
En este trabajo se hará énfasis en el polipirrol, debido a que es el polímero conductor que se utilizará.

2.3.1. Pirrol y polipirrol (PPy)

El pirrol (Py) es un heterociclo aromático de 5 miembros, que tiene en su anillo un nitrógeno (N), y cada uno de los 4 carbonos tiene hibridación sp^2 , cada uno de los carbonos contribuyen con un electrón π , y el nitrógeno con hibridación sp^2 contribuye con dos de su par no enlazado, el cual ocupa un orbital p (Figura 10). Este compuesto no tiene propiedades conductoras (Mcmurry, 2008).

Figura 10

Estructura del pirrol 2D y 3D. Tiene 1 par de e- no enlazados. Fuente:



Fuente: (Mcmurry, 2008)

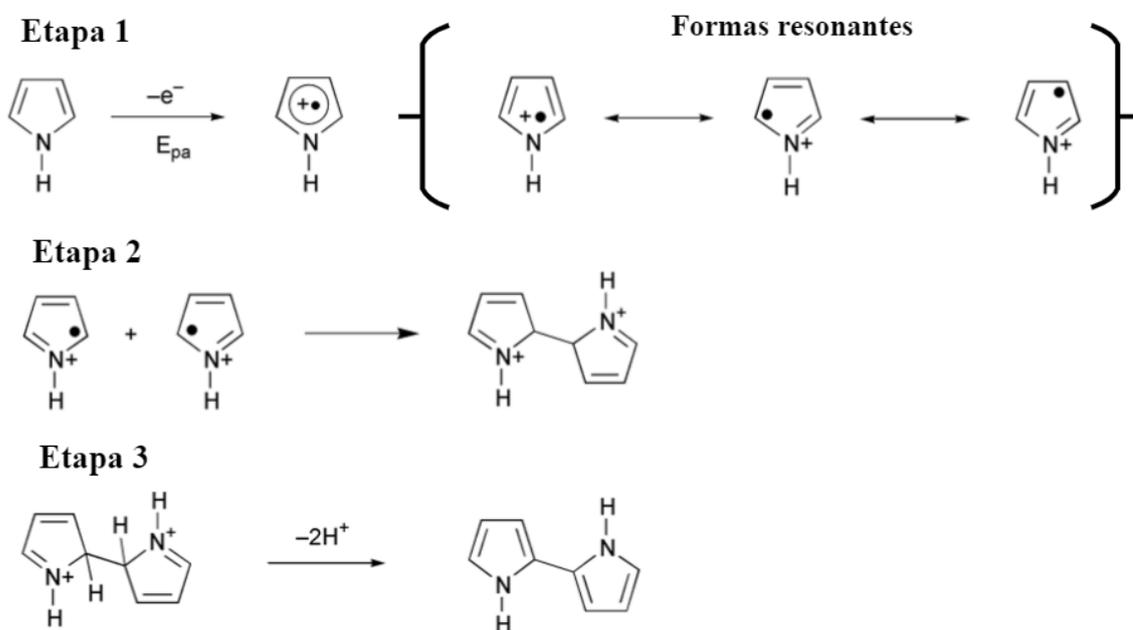
Sin embargo, al oxidar este monómero Py, se polimeriza formando así polipirrol (PPy), que presenta propiedades conductoras y tiene comportamiento redox. También, propiedades combinadas de metales y plásticos. La estructura de este polímero posee enlaces simples y dobles, lo cual, al tener una cadena larga carbonada existen orbitales electrónicos con un electrón muy deslocalizado y con gran libertad de movimiento, que hace posible la conducción eléctrica. Una manera de realizar este proceso de oxidación es mediante electropolimerización, esto consiste en dar un potencial anódico externo sobre un electrodo

que tenga un sustrato conductor sumergido en una disolución electrolítica apropiada que contenga el monómero. De esta manera, se produce el polímero en forma de películas sobre el electrodo de trabajo. Por otro lado, si se requiere formar el polímero tipo polvo, se hace la síntesis por polimerización química, lo cual requiere el uso de un oxidante químico (Bermudez et al., 2016; T. Fernández, 2003).

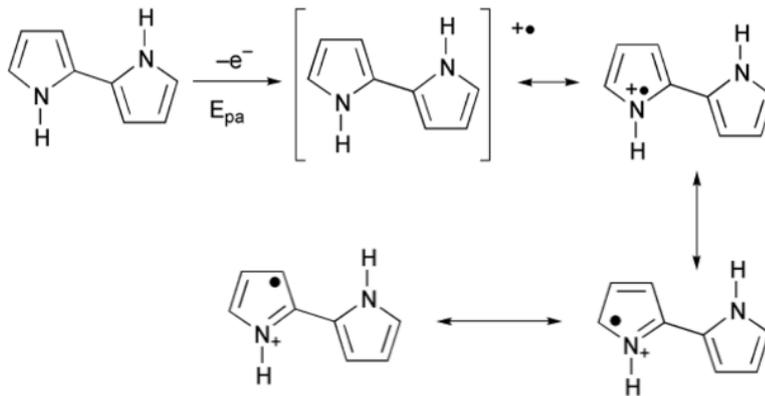
No obstante, es de gran importancia el uso del electrolito y solvente a elegir. Esto debido a que deben tener estabilidad en el potencial de oxidación del Py y ser un conductor iónico. Lo interesante de este polímero, es que debido a que el Py tiene bajo potencial de oxidación, la electropolimerización puede darse en electrolitos acuosos. En la Figura 11, se muestra el mecanismo de Diaz, que ocurre durante la formación del polímero en medio ácido.

Figura 11

Diferentes etapas del inicio del mecanismo de la electropolimerización del pirrol.



Etapa 4

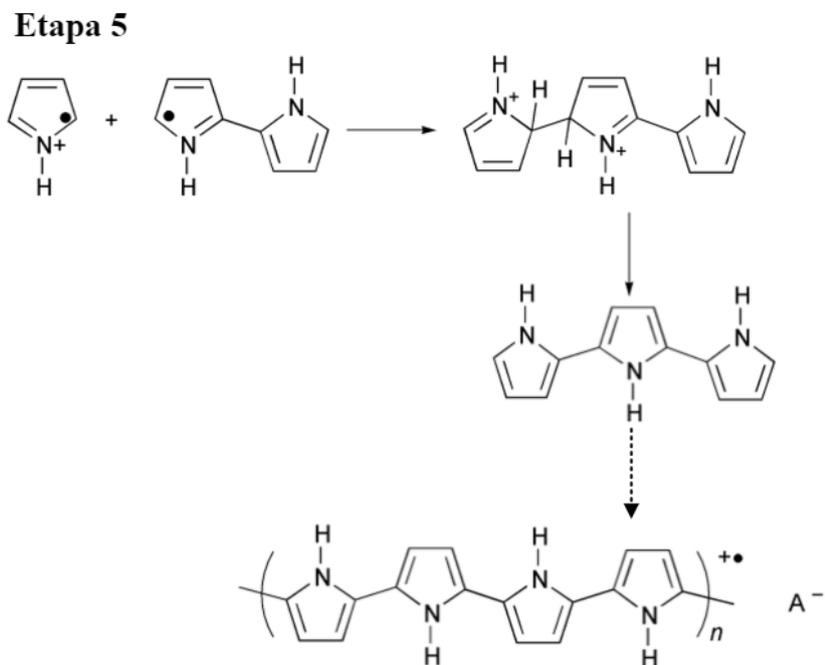


Fuente: (Bermudez et al., 2016; Sadki, Schottland, Brodie, Sabouraud, et al., 2000).

En primer lugar, se da la etapa 1 ocurre la oxidación en la superficie del electrodo para formar el catión radical $R^{+\bullet}$, además se muestra las diferentes formas resonantes de este catión. A continuación, la etapa 2, donde se da el acoplamiento radical-radical, ósea se dimeriza a través de una de sus formas resonantes como se muestra. Sin embargo, debe perder 2 protones (deshidrogenación) y ocurre una re-aromatización que se muestra en la etapa 3. Seguidamente, en el dímero ocurre nuevamente la oxidación con diferentes formas resonantes como se muestra en la etapa 4, pero a diferencia del monómero el electrón desapareado está deslocalizado sobre los dos anillos haciendo que el potencial de oxidación sea menor. Entonces, este dímero vuelve a reaccionar con el monómero $R^{+\bullet}$, en la etapa 5, formando así un trímero con dos cationes, este se desprotona para neutralizarse. Estas etapas se repiten una y otra vez hasta obtener la cadena polimérica, como se ve en el final de la Figura 12 (Sadki, Schottland, Brodie, & Sabouraud, 2000).

Figura 12

Formación de la cadena polimérica.



Fuente: (Sadki, Schottland, Brodie, & Sabouraud, 2000)

2.4. Caracterizaciones electroquímicas y fisicoquímicas

Existen diferentes técnicas para saber la conformación tanto física, química y como es el comportamiento del material. Entre las cuales se encuentran las electroquímicas como: voltamperometría cíclica (VC), espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS), curvas de carga y descarga (CC/CD), y las fisicoquímicas como: Adsorción/desorción de N_2 para conocer el área superficial de materiales porosos (Carbonos), SEM, Raman y FTIR.

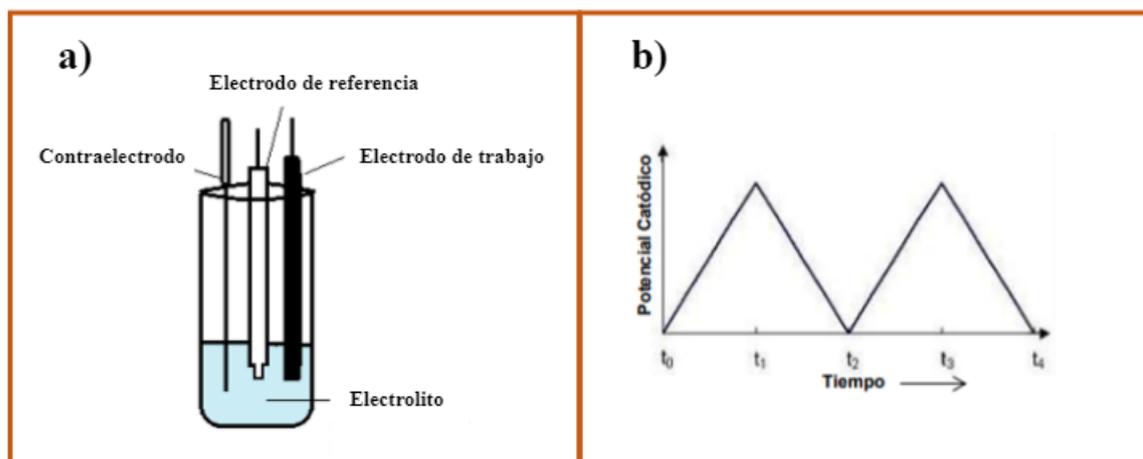
2.4.1. Voltamperometría cíclica (VC)

Esta técnica proporciona información de las propiedades electroquímicas del sistema redox, además muestra voltamperogramas característicos de cada material. Para realizar estos ensayos se arma un sistema de tres electrodos (Figura 13a): uno de trabajo (carbón vítreo, platino, grafito, etc.), de referencia (Ag/AgCl, de H_2 , calomel) y un contra electrodo

(grafito, Platino, Carbón vítreo, etc.) que tenga mayor área de contacto que el de trabajo. De esta conformación se obtendrá la respuesta de la corriente-potencial del electrodo de trabajo al cual se le aplica una onda triangular, Figura 13b, esto se da cuando se aplica una rampa lineal entre un tiempo t_0 a t_1 , luego se invierte el sentido hasta un t_2 para volver a su potencial inicial, de esta manera se tendrá un ciclo de VC, la cual se puede repetir las veces requeridas (n ciclos) (Bermudez et al., 2016; Ortíz et al., 2006).

Figura 13

Forma de onda para la voltamperometría cíclica.



Fuente: (Bermudez et al., 2016).

Por consiguiente, la VC da información muy valiosa de las características de los carbones y el polímero, así como nos brinda una información sobre la electroactividad y las posibles aplicaciones de acumulación de energía eléctrica. Por otro lado, se puede utilizar para electropolimerizar ya que se puede controlar el crecimiento de la película polimérica, además el material presentará mayor uniformidad estructural y menor dispersión molecular en comparación con otras técnicas (Choy, s/f; Gutiérrez et al., 2019).

2.4.2. Evaluación de almacenamiento de energía para el capacitor.

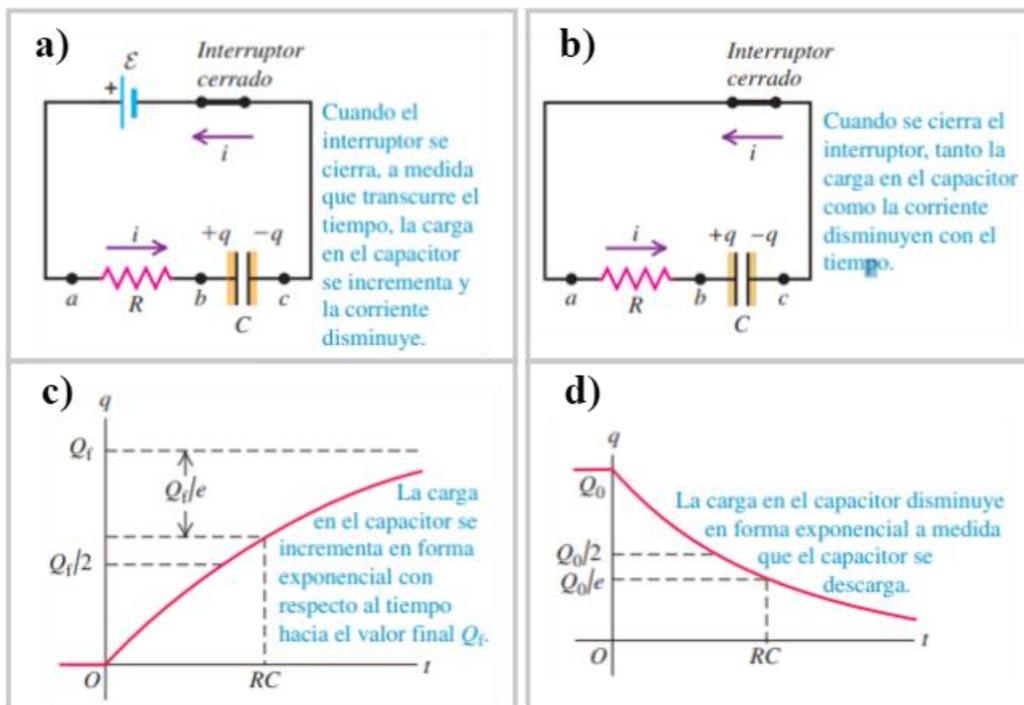
Un arreglo simple para cargar y descargar un capacitor se muestra en la Figura 15. Para esto, se necesita corriente eléctrica para dar carga (q) al capacitor, para esto se cierra el

interruptor (Figura 15a) lo cual causa que a medida avanza el tiempo aumentará el voltaje V del capacitor, por lo que se observará el crecimiento de la curva V vs tiempo (t). En cambio, la diferencia de potencia en la resistencia v_{ab} disminuye para que \mathcal{E} (Fuerza electromotriz) se mantenga constante. Cuando esté cargado el capacitor, la corriente se vuelve cero.

En cambio, la descarga se realiza quitando la fuente de corriente Figura 15b. Este disminuye su potencial con el tiempo hasta quedarse sin carga. Las gráficas más representativas de este ensayo son en forma exponencial y se muestran en la Figura 14c, d. Por otro lado, se puede definir la vida útil del supercapacitor como el tiempo o número de ciclos de carga/descarga transcurridos cuando la capacidad de esta cae por debajo del 80 % de su valor original. Esto debido, a los esfuerzos mecánicos, químicos y el estrés que se somete lo cual causa deterioro a la celda (Freedman, 2009).

Figura 14

Sistema de carga/descarga de un capacitor.



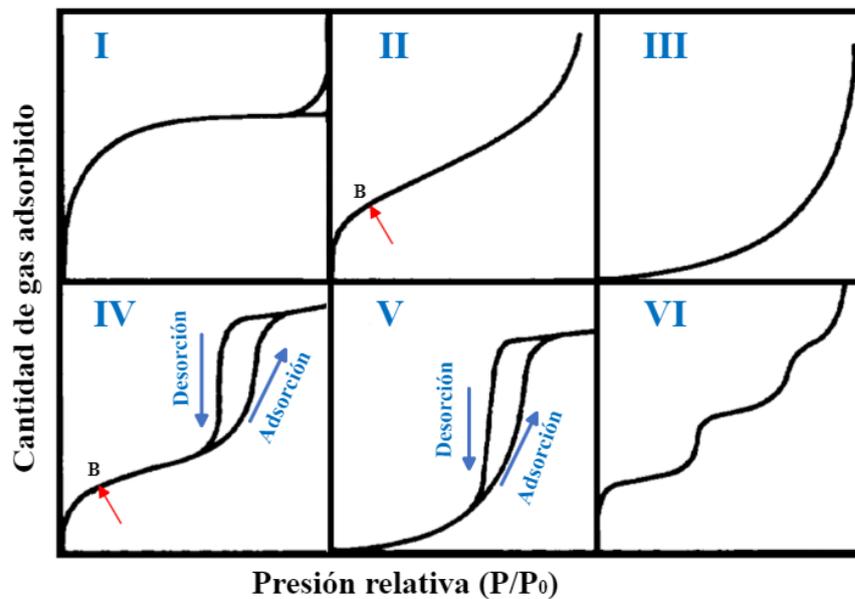
Fuente: (Freedman, 2009).

2.4.3. Adsorción de N₂ y modelo de BET

La adsorción de N₂ se utiliza para determinar propiedades de textura de un sólido. En este proceso los átomos del gas son retenidos en la superficie de un material donde se forman capas según sea el tipo de superficie. La cantidad de gas adsorbido depende de la presión del gas al estar en equilibrio con la muestra, la temperatura y es proporcional a la masa de la muestra. Al los valores obtenidos por el equipo del tratamiento de las muestras se llama isothermas de adsorción (Figura 15), los cuales varían según el material y la IUPAC los clasifica en 6 tipos (Gregg, 1982; Martín Martínez, 1990).

Figura 15

Tipos de isothermas de adsorción según la IUPAC.



Modificado de: (Gregg, 1982)

Para determinar el valor numérico de la superficie, el método más usado es el desarrollado por Brauer, Emmett y Teller (BET). Esta teoría postula que las responsables de la energía de enlace en la adsorción multimoleculares son las fuerzas atractivas presentes en la condensación de gases, ósea considera que las fuerzas de atracción de van der Waals son

las únicas fuerzas involucradas en el proceso de adsorción. Estas fuerzas, de naturaleza física, son las que permiten que la ecuación BET solo sea aplicable exclusivamente a fenómenos de adsorción física. Para esto se considera que se tiene una superficie homogénea, y no existen interacciones entre moléculas adsorbidas. Además, cuando alcanzan el equilibrio son iguales las velocidades de adsorción-desorción.

Este modelo toma en cuenta la multicapa que se puede formar en la adsorción del gas (Giraldo et al., 2007; Gregg, 1982; Martín Martínez, 1990). Se resume este modelo en la ecuación 1.

$$\frac{P/P_0}{V(1-P/P_0)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{C-1}{V_m C} \cdot (P/P_0) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

V= volumen adsorbido a la presión P

P₀= presión de vapor de saturación del líquido a la temperatura (T) de trabajo.

C= diferencia de energía entre las moléculas adsorbidas en la primera capa y en las capas siguientes.

V_m= Capacidad de adsorción en la primera capa.

2.4.4. Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

El SEM es un tipo de microscopio electrónico, ya que forma imágenes de los materiales a partir de electrones, que sirve para visualizar la morfología de muestras sólidas. En sí esta técnica utiliza un haz de electrones, el cuál al ser acelerado poseen gran cantidad de energía cinética que se disipa generando señales que son producidas por la interacción con la muestra. Estas imágenes SEM son producto de los electrones secundarios, en la Figura 16 se muestra lo que ocurre con la muestra al ser incidida por un haz de electrones. También, hay equipos que vienen acoplado a un EDS (del inglés Energy-Dispersive X-Ray

Spectroscopy), el cuál es útil para determinar % de la composición elemental del material por zonas ya sea puntual, o un área superficial con excepción de Hidrógeno y Helio (Goodge, 2017; Swapp, 2017).

Figura 16

Esquema de un SEM.



Fuente: Adaptado de (Pardue University, 2019).

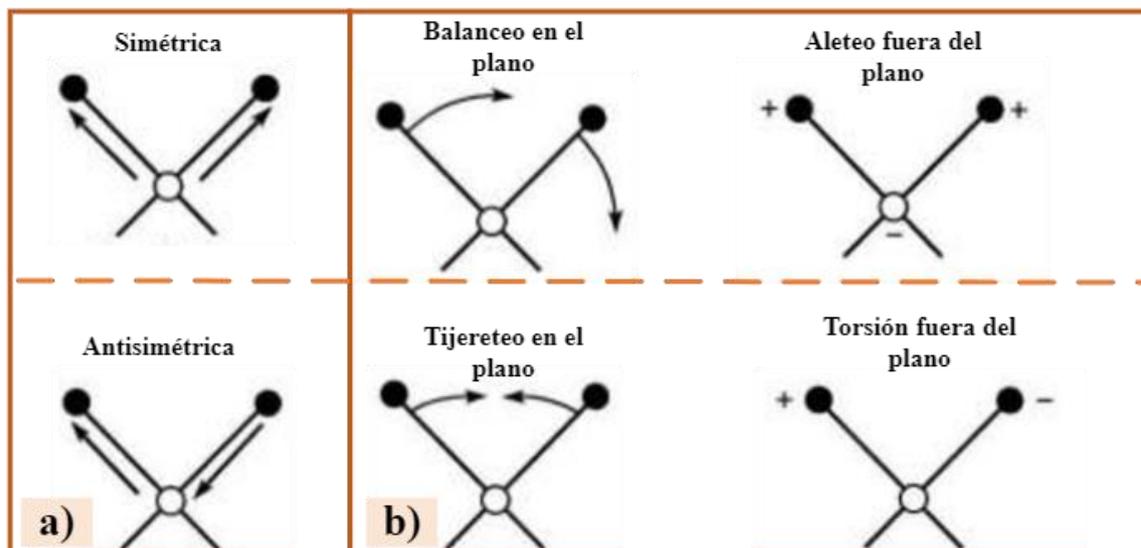
2.4.5. Espectroscopía infrarroja (IR)

La Espectroscopía de Infrarrojo, se basa en la absorción de la radiación infrarroja. Esta energía incidente es necesaria para que ocurra una transición vibracional de la molécula, la cual vibrará de una determinada manera como se muestra en la Figura 17. Con esto, se permite la identificación de los grupos funcionales en compuesto orgánico, ya que el espectro IR que forme es una propiedad física única de estos compuestos. Para realizar las medidas se usa un espectrómetro infrarrojo, la cual tiene diferentes variaciones para realizar las medidas. Por ejemplo, la técnica de muestreo por ATR (Attenuated Total Reflection) que se utiliza en espectroscopía IR, se da cuando la IR pasa por un cristal ATR que actúa como un medio transmisor con un alto índice de refracción. El cristal está diseñado de manera que se produce una reflexión interna total, lo que genera una onda evanescente en la superficie

del cristal. Esta onda se extiende a la muestra la cual está en contacto directo con el cristal, registrándose el espectro de infrarrojo del analito, la ventaja es que se puede medir muestras sólidas, líquidas o películas de polímeros directamente (Cruz, 2019; Skoog et al., 2001; Tyner, 2017).

Figura 17

Vibraciones moleculares a) vibraciones de tensión y b) vibraciones de flexión.



Fuente: Tomado de: (Skoog et al., 2001).

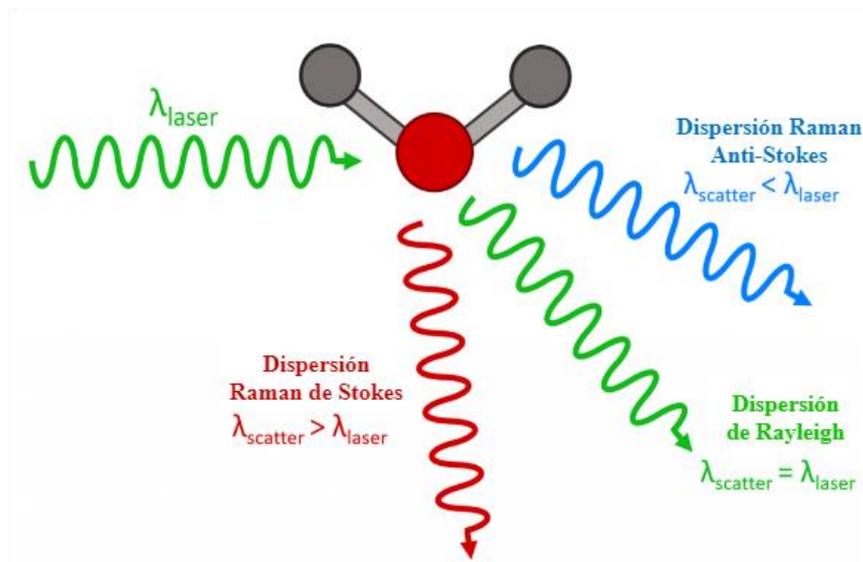
2.4.6. Espectroscopía Raman

Esta técnica da información química y estructural, debido a la interacción de la luz con los enlaces químicos del material que se quiere analizar. Se basa principalmente en que una molécula dispersa la luz incidente de una fuente láser ($\lambda_{\text{láser}}$) de gran intensidad como se muestra en la figura 18. Se distingue tres tipos de dispersiones: Raman de Stokes esto se da cuando en el proceso de dispersión hay una pérdida de energía fotónica, de Rayleigh que es una dispersión elástica y Raman anti-Stokes que corresponde a una ganancia de energía fotónica. De esto, el desplazamiento de Stokes es el que domina la dispersión Raman debido

a que las moléculas se encuentran en estado fundamental electrónico y vibratorio por la distribución de Boltzmann a temperatura ambiente. Los picos característicos formados por las señales del Raman dependen de la estructura química del material. Además, cada pico de intensidad que se muestre es específicamente de cada enlace (Lin et al., 2021; Smith & Dent, 2004).

Figura 18

Ilustración de la dispersión Raman y Rayleigh.



Fuente: *Modificado de* (Lin et al., 2021).

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de Investigación

3.1. Materiales

En este apartado se describen los equipos utilizados en el desarrollo del trabajo de investigación y su ubicación (Tabla 4), y los reactivos empleados (sección 3.1.2).

3.1.1. Equipos

Los equipos utilizados en el desarrollo de investigación se encuentran ubicados en el Grupo de Investigación de Electroquímica Aplicada (GIEA) en el Grupo de Investigación en Síntesis de Materiales Avanzados (GISMA) ambos de la Facultad de Ciencias y en el Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas en Brasil (CBPF), de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla 4

Descripción de los equipos utilizados en el desarrollo de la síntesis y caracterización

Equipo	Marca	Lugar
Balanza analítica de 5 decimales	Discovery OHAUS	Laboratorio GIEA/ Facultad Ciencias / UNI
Horno tubular	Nabertherm R120/500/13	Laboratorio GIEA/ Facultad Ciencias / UNI
Ultrasonido	DAIHAN Scientific	Laboratorio GIEA/ Facultad Ciencias / UNI
Sistema de purificación de agua	Simplicity de MERCK	Laboratorio GIEA/ Facultad Ciencias / UNI
Potenciostato/galvanostato	Autolab PGSTAT30	Laboratorio GIEA/ Facultad Ciencias / UNI
Potenciostato/galvanostato	Zive SP2	Laboratorio GIEA/ Facultad Ciencias / UNI
Raman Scientific Xplora	Horiba ($\lambda = 532$ nm)	Laboratorio GIEA/ Facultad Ciencias / UNI
SEM-EDS	Tescan Lyra3 FIB-SEM	CBPF/Brasil

IR	IRPrestige-21 SHIMADZU	Laboratorio GISMA/ Facultad de Ciencia /UNI
Equipo de fisisorción de N₂	Micromeritics ChemiSorb 2720	CBPF/Brasil

3.1.2. Reactivos

En este trabajo se utilizó diferentes reactivos tanto en la síntesis de óxido de grafeno, la obtención del polímero, y las medidas electroquímicas. Esto se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5

Reactivos utilizados en el desarrollo del trabajo experimental.

Nombre	Pureza	Marca
ácido sulfúrico al (H₂SO₄)	96 %	Sigma-Aldrich
permanganato de potasio al (KMnO₄)	97 %	Sigma-Aldrich
peróxido de hidrogeno al (H₂O₂)	30%	Sigma-Aldrich
ácido clorhídrico al (HCl)	37 %	Sigma-Aldrich
NafionTM 117	-	Sigma-Aldrich
Pirrol	98 %	Sigma-Aldrich
grafito en polvo < 20µm		Sigma-Aldrich

3.2. Procedimiento Experimental

3.2.1. Síntesis del óxido de grafeno (GO)

Para la síntesis del GO se empleó el método modificado de Hummers (Hummers & Offeman, 1958). Para ello, a 1,00 g de polvo de grafito se le añadieron 0,50 g de NaNO₃. La mezcla se colocó sobre un baño de hielo y se agregaron 40 mL de H₂SO₄, agitándose durante

30 min. Después, se añadió 3,00 g de KMnO_4 , y se mantuvo la agitación durante otras 2 h. Luego, se agregaron lentamente 100 mL de agua ultrapura y se calentó la mezcla a una temperatura de 100 °C durante 30 min, siempre manteniendo la agitación. A continuación, se incorporaron 10 mL de H_2O_2 , y se dejó agitando durante 12 h. Después de eso, se realizó un lavado con HCl al 5 % v/v, seguido de reposo de 48 h. La suspensión obtenida se lavó con agua ultrapura hasta alcanzar un pH de 6 y se dejó secar a una temperatura aproximada de 25 °C. Finalmente, se tomó una muestra de 0,5 g del sólido y se dispersó en 250 mL de agua ultrapura, obteniendo el GO a una concentración de 2 mg mL⁻¹. Esta descripción se encuentra resumida en la Figura 19.

3.2.2. Obtención de los materiales de carbón a partir de fibras de algodón modificados con rGO

Los materiales carbonosos, se prepararon a partir de fibras de algodón en forma de discos de la marca Cottonpads (100 % algodón según el fabricante CKF industrial S.A. ubicado en Ica -producto peruano) los cuales fueron adquiridos en el supermercado Plaza Vea. Las fibras de algodón (FA) secas, se modificaron con rGO, para esto se impregnó discos de FA con 6 mL de la solución de 2 mg mL⁻¹ GO por cada disco de FA en placas Petri, luego de 30 min se retiró el exceso de agua y se secó a temperatura ambiente. Una vez secas, se llevaron a carbonizar en el horno tubular (Nabertherm, tubo de cuarzo) a 800 °C, rampa de 5 °C min⁻¹, por 3 h (Flujo de N_2 20 L h⁻¹) obteniéndose así las fibras de carbón de algodón con rGO (FC-rGO), ver figura 20. Por otro lado, se carbonizó las FA sin modificar y a estos materiales se les denominó FC.

Figura 19

Síntesis del óxido de grafeno (GO).

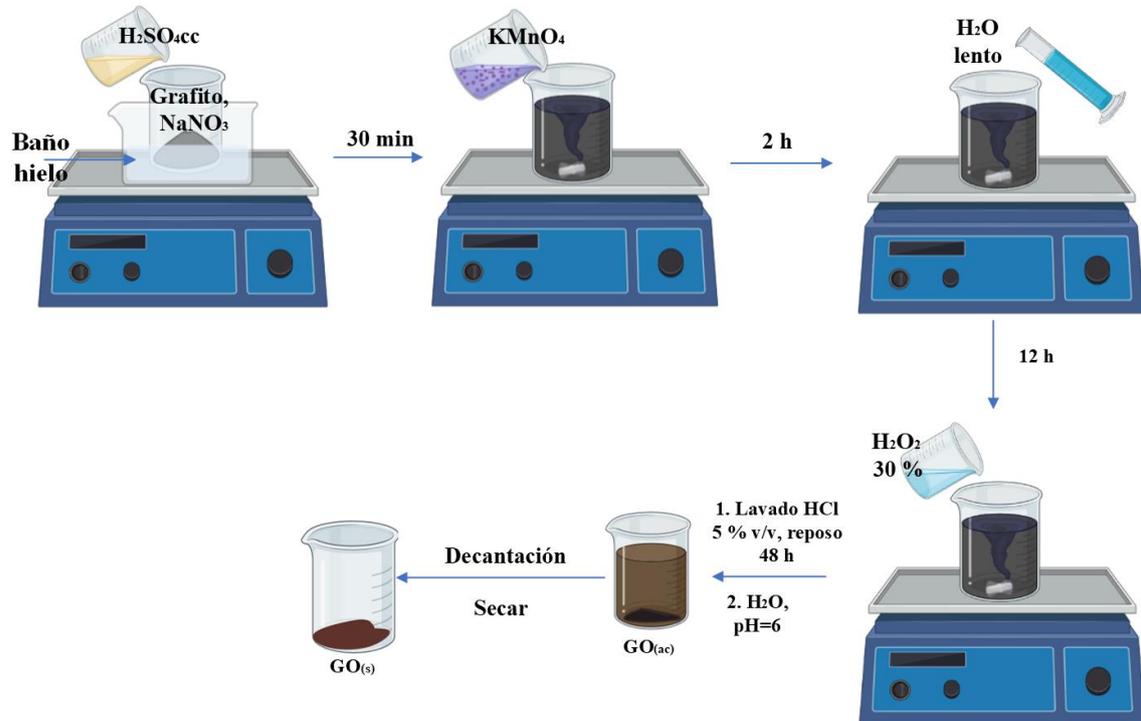


Figura 20

Obtención de las fibras de carbón a base de algodón.



3.2.3. Preparación de los electrodos de trabajo

Se pulverizó las FC en un mortero de ágata y se pesó 2 mg de polvo en un Eppendorf TM. Luego, se agregó 450 μL de H_2O , 50 μL de alcohol isopropílico y 20 μL de Nafion® y se sonicó por 30 min para poder dispersar el carbón. Posteriormente, en un electrodo de carbón vítreo se depositó con una micropipeta 10 μL de esta muestra, y se secó con una lámpara IR (Figura 21). Este electrodo fue el electrodo de trabajo (FC), siguiendo el mismo proceso se obtuvo el electrodo de CF-rGO.

Figura 21

Preparación del electrodo de trabajo a partir de los materiales carbonosos.

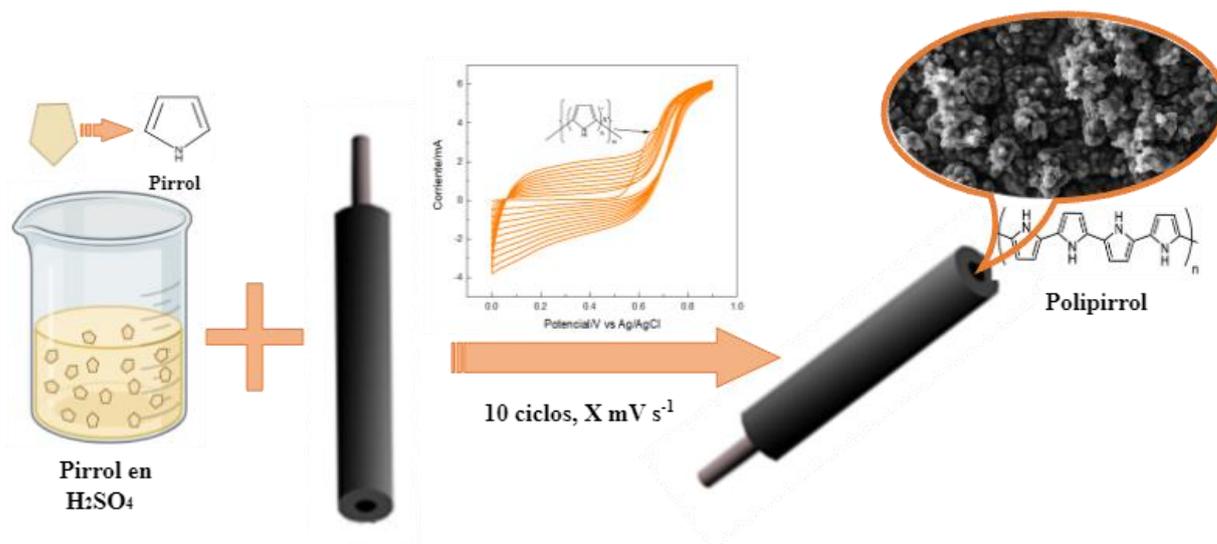


3.2.4. Electropolimerización de pirrol

Previo a la electropolimerización del Py, se realizó una destilación simple entre 129-131 °C de 50 mL, siendo este almacenado en un frasco ámbar a una temperatura entre 2 y 5 °C. Se preparó la solución electrolítica de 0,1 mol L⁻¹ pirrol en 0,5 mol L⁻¹ H₂SO₄, y se colocó 80 mL de solución en una celda de tres electrodos. Luego, se burbujeó con N₂ para quitar el oxígeno por aproximadamente 10 min, este mismo proceso se realizó para todas las pruebas electroquímicas. Sobre electrodos de FC y FC-rGO, se electrodepositó pirrol mediante 10 ciclos por VC en una ventana de 0,0 V a +0,9 V y a diferentes velocidades de barrido (10, 25 y 50 mV s⁻¹), ver Figura 22. Luego se enjuagó con agua ultrapura el electrodo de trabajo para su posterior uso. A estos electrodos se les denominó FC-PPy y FC-rGO-PPy, respectivamente.

Figura 22

Electropolimerización del pirrol a X: 10, 25 y 50 mV s⁻¹ en 0,5 mol L⁻¹ H₂SO₄.



3.2.5. Caracterizaciones morfológicas, fisicoquímicas de los materiales FC, FC-rGO, FC-PPy y FC-rGO-PPy

Las caracterizaciones se realizaron a los carbones de FC, FC-rGO, FC-PPy y FC-rGO-PPy con el fin de determinar su morfología, textura y comportamiento. Para visualizar la morfología del material se utilizó el análisis SEM-EDS con el microscopio electrónico de barrido de alta resolución TESCAN Lyra3 FIB-SEM, las medidas fueron realizadas a un voltaje de 15 kV con aumentos variados entre 200 – 4 500 veces y una distancia de trabajo de 8 – 13 mm, aproximadamente. Las condiciones de medidas del EDS fueron ajustadas para el aumento máximo permitido de 800, esto para estimar la composición % de elementos presentes. La adsorción/desorción de N₂ se realizó con el equipo Micromeritics ChemiSorb 2720, para poder hacer un estudio del área superficial del material carbonoso, tipo y tamaño de poro.

Las medidas Raman fueron con el espectrómetro Raman *Scientific Xplora* de la marca Horiba con un láser de 532 nm, esto para ver la relación de intensidad entre el trastorno inducido de la banda D y la banda G (ID / IG) además se podrá indicar la relación atómica de carbonos sp² / sp³ que mide el grado de desorden en el grafito. Mientras que medidas analíticas a partir de la vibración de los grupos funcionales principales fueron realizados usando espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) utilizando un equipo de la marca de la Shimadzu modelo IR-Prestige 21. Las condiciones de medidas del equipamiento fueron: rango de longitud de onda entre 500 – 4000 cm⁻¹.

3.2.6. Caracterizaciones electroquímicas

El análisis por voltamperometría cíclica (VC) se realizó con el potenciostato ZIVE-SP2, mientras que el análisis de Carga/Descarga (CC/CD) en el potenciostato galvanostato Autolab. Las condiciones usadas se muestran en la Tabla 6. Estos análisis fueron realizados en H₂SO₄ 1,0 mol L⁻¹ utilizando una celda de 5 bocas (Figura 23), y los electrodos fueron:

de trabajo (FC, FC-rGO, FC-PPy y FC-rGO-PPy), contraelectrodo de grafito, y electrodo de referencia Ag/AgCl (3,5 mol L⁻¹).

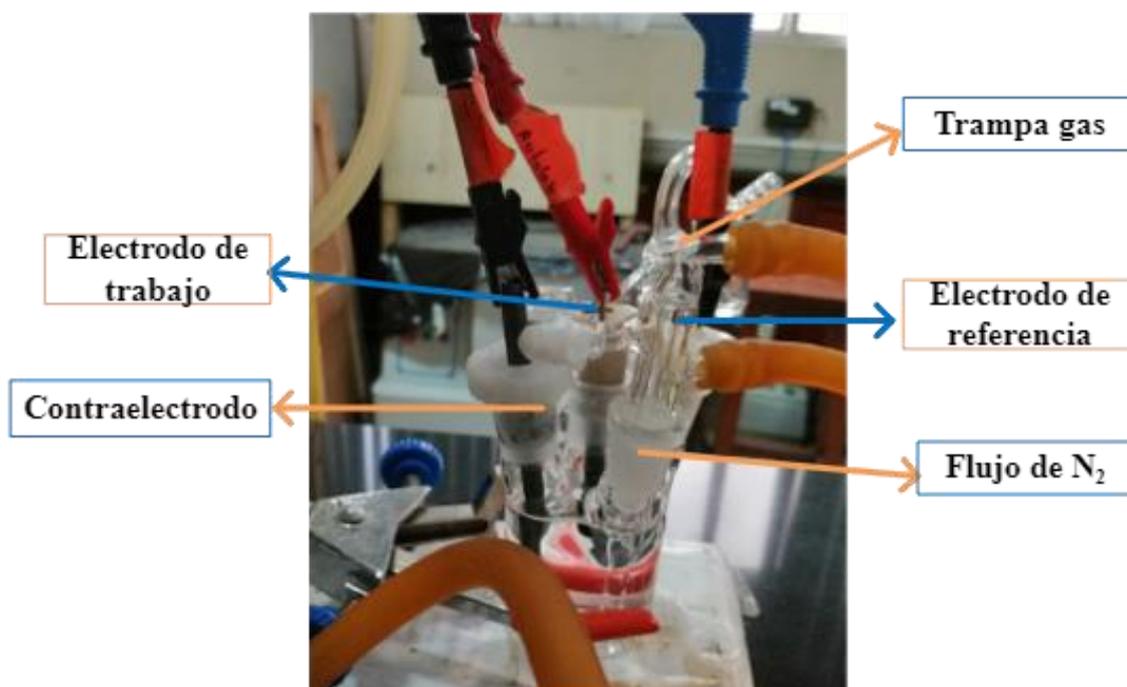
Tabla 6.

Parámetros para las evaluaciones electroquímicas.

Técnica	Parámetros
VC	Rango: -0,4 V a 0,6 V, Velocidades: 5-250 mV s ⁻¹
CC/CD	Densidad de corriente: 1,0, 2,5, 10,0 A g ⁻¹ Rango: -0,4 a 0,6 V, 10 ciclos

Figura 23

Celda de trabajo para el análisis electroquímico.



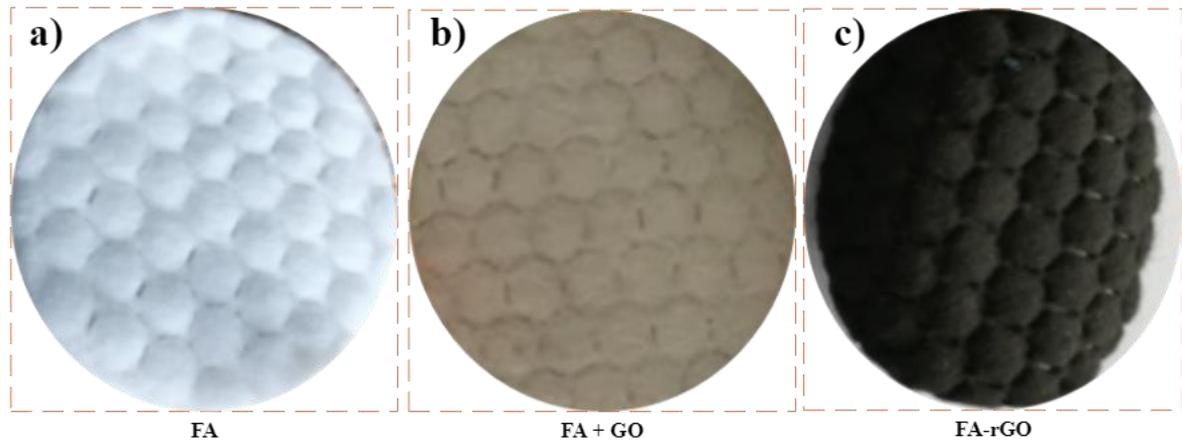
Capítulo IV. Análisis y Discusión de Resultados

4.1. Obtención de los materiales carbonosos

Las CF fueron obtenidas por carbonización directa de los discos de algodón, mientras que para la obtención de FC-rGO, los discos de algodón fueron impregnados con una dispersión de GO, la reducción del GO se promueve durante la carbonización del algodón debido a las altas temperaturas y la atmósfera inerte empleada (Bazán et al., 2020). En la Figura 24 se puede observar el algodón utilizado, cuando es impregnado con GO, cuyo color es parduzco y el material resultante, siendo 11,8% el rendimiento del proceso de síntesis. El rendimiento del proceso de síntesis para la preparación de las FC fue de 14,2 % .

Figura 24

Imágenes de: a) fibras de algodón (FA), b) al impregnarlas con GO (FA-GO) y c) luego de carbonizarla (FC-rGO)



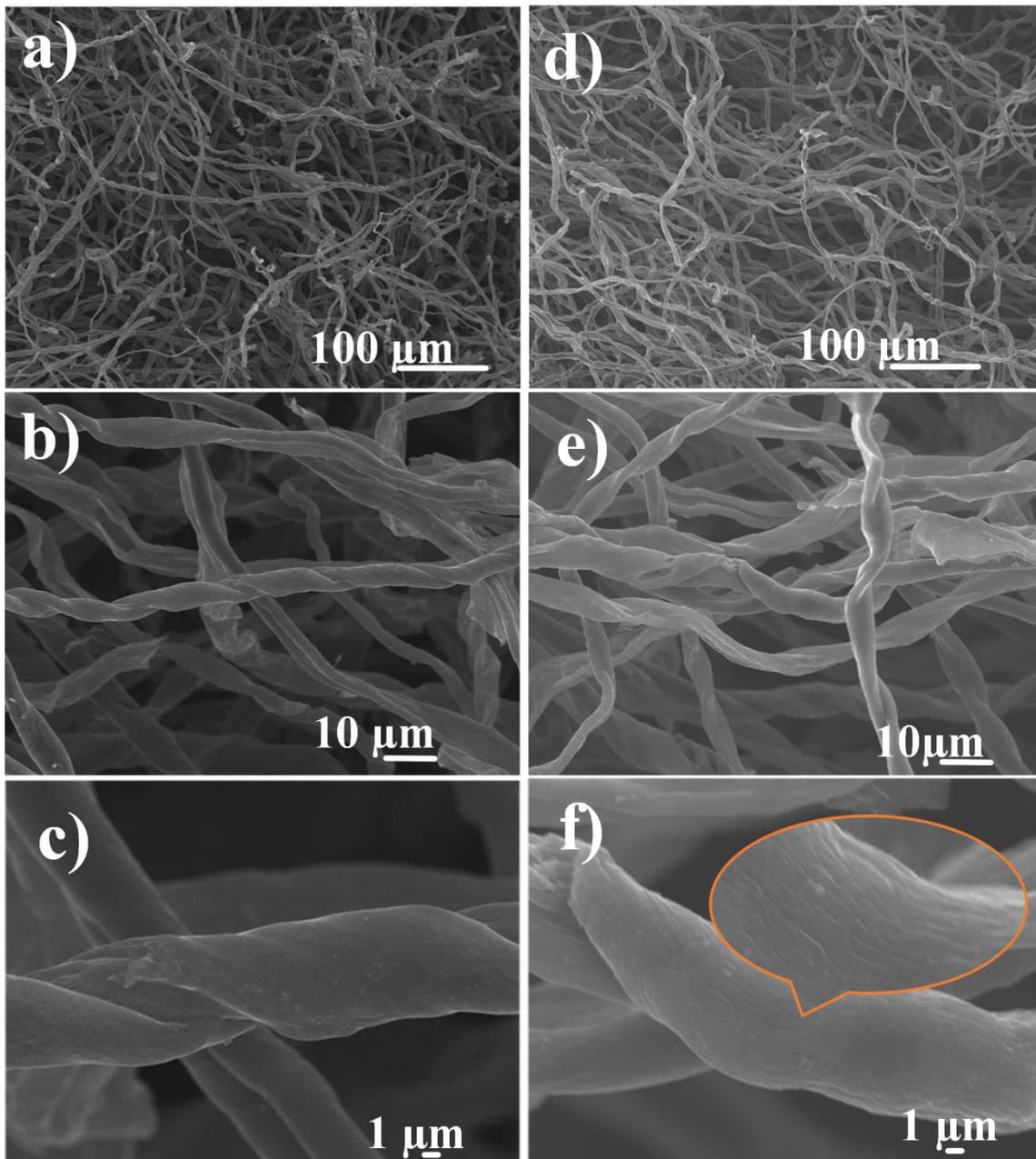
4.1.1. Caracterizaciones morfológicas y fisicoquímicas de los materiales carbonosos

La morfología de los materiales carbonosos se pudo observar mediante el análisis de SEM-EDS. En la Figura 26 se muestran las imágenes SEM de las cuales se pueden observar que el material se encuentra en forma de hilos de aproximadamente entre 6 y 7 μm , esto se muestra a diferentes acercamientos, para FC (Figura 25a-c) a 1 μm las fibras tienen superficies lisas sin poros aparentes, mientras que para FC-rGO cambian (Figura 25d-f), se

tiene fibras con superficie rugosa similares a lo reportado por Bazán (2020). De acuerdo al EDS para FC y FC-rGO se tiene 95,9% y 92,3% de C, respectivamente después del tratamiento térmico (Bazán Aguilar et al., 2020; Saleem Hareema et al., 2018).

Figura 25

Imagen SEM de los carbonos de telas de algodón, FC (a, b, c) y FC-rGO (d, e, f).



Con la adsorción-desorción de N_2 mostrado en la Figura 26, se calculó el área superficial utilizando el modelo de Brunauer-Emmett-Teller (S_{BET}). Se obtiene una isoterma del tipo IV y un valor de $607 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ para FC-rGO, este valor concuerda con la rugosidad observada por el SEM, mientras que para CF al ser una fibra lisa se obtuvo un S_{BET} de $\sim 2 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, ver Tabla 7, se puede decir que no tiene área superficial (Bi et al., 2016). El aumento del S_{BET} es debido a la inserción de GO antes de la carbonización, el rGO formado en la superficie del carbón, a pesar de estar reducido cuenta con grupos funcionales oxigenados. Esta cobertura de las fibras de carbón con el rGO genera una superficie rugosa (Park et al., 2019).

Figura 26

Adsorción/desorción de N_2 para FC y FC-rGO.

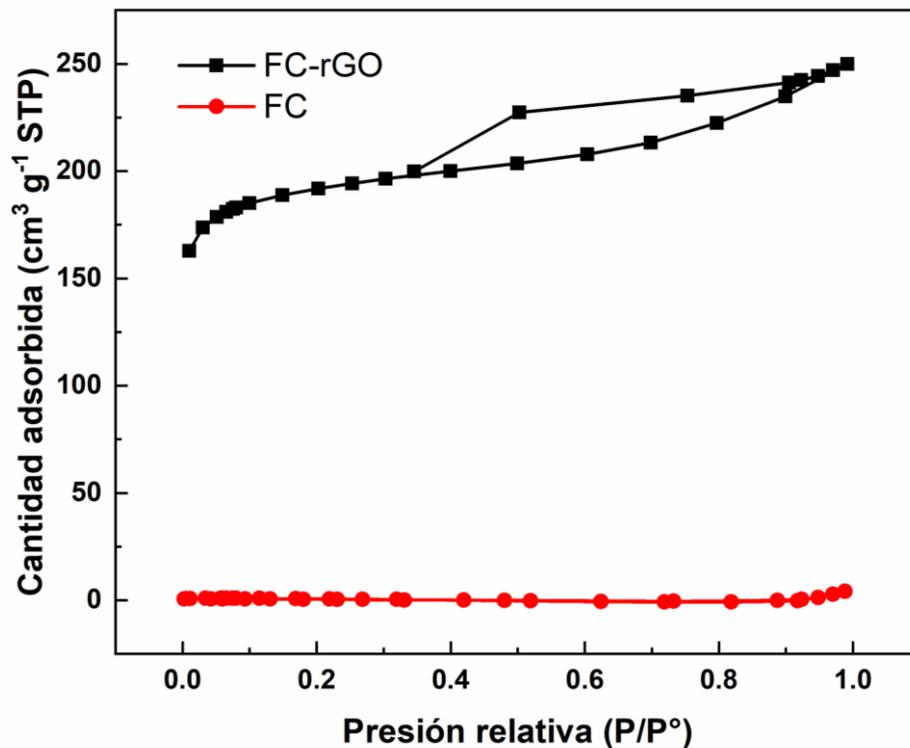


Tabla 7

Valores obtenidos de la adsorción/desorción de N₂ utilizando BET

Muestra	BET m² g⁻¹	Tamaño de poro promedio (nm)
FC	2.76	15.4
FC-rGO	607	2.5

Las interacciones de los grupos funcionales fueron analizadas por espectroscopía Raman e infrarroja, esto se muestra en la Figura 27. La espectroscopía Raman, fue usado para determinar la hibridación de los carbonos en estudio. Según el espectro resultante (Figura 27a), se puede notar que la banda D se encuentra en $\sim 1340 \text{ cm}^{-1}$ mientras que la banda G en $\sim 1600 \text{ cm}^{-1}$ tanto para FC como FC-rGO. Además, la relación de intensidad entre la banda D inducida por el desorden de la red hexagonal y la banda G (I_D / I_G) establece la relación atómica de carbonos sp^2 / sp^3 que mide la extensión del desorden en el grafito, esta relación para la FC es 0,96 y en la FC-rGO es 1,31, este aumento en el grado de desorden del material, se correlaciona con la presencia de rGO en la superficie de FC, los grupos funcionales oxigenados generan defectos en la red hexagonal del grafeno (Bazán et al., 2020; Xu et al., 2016).

En el análisis IR, Figura 27b, se puede apreciar los picos característicos de los FC en 918 cm^{-1} correspondiente al doblamiento del anillo aromático C-H y en 3738 cm^{-1} debido al enlace O-H de la celulosa. Para los FC-rGO el enlace C-C en el anillo se aprecia entre $900\text{-}1000 \text{ cm}^{-1}$, el enlace C=C a 1400 cm^{-1} y también a 3662 cm^{-1} la vibración de los enlaces O-H de la celulosa al igual que CF (Bazán et al., 2020; Gaspar et al., 2014; Krishnamoorthy et al., 2012; Y. Liu et al., 2019; Peets et al., 2017). En el espectro IR se ve la diferencia de los materiales al mostrar diferentes picos, las cuales son resumidas en la Tabla 8.

Figura 27

Espectroscopías a) Raman y b) IR para FC y FC-rGO.

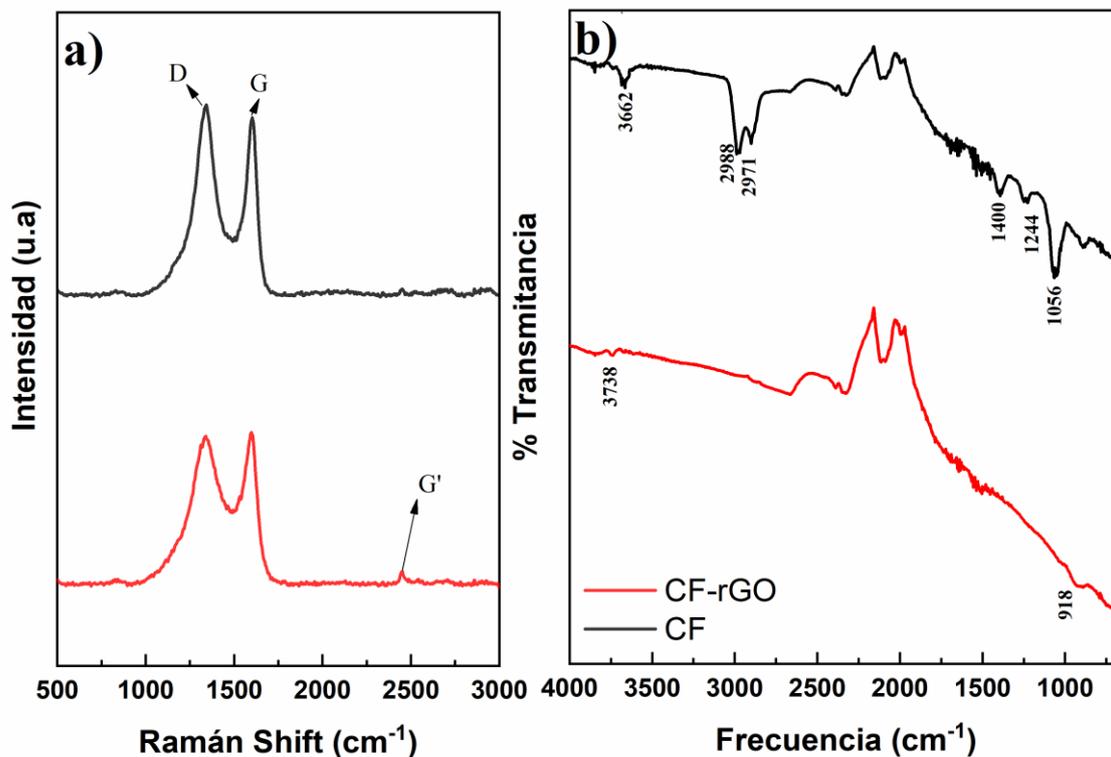


Tabla 8

Grupos funcionales obtenidos por espectroscopía IR para FC y FC-rGO.

Muestra	Frecuencia (cm ⁻¹)	Grupos funcionales
		en este trabajo
FC	3738, 918	Estiramiento C-OH, Doblamiento del anillo aromático C-H (Peets et al., 2017)
FC-rGO	3662, 2988, 2971	Estiramiento C-OH , CH (Gaspar et al., 2014)
	1400, 1244	C=C, C-O-C (Krishnamoorthy et al., 2012)
	1056	Vibración C-O (Y. Liu et al., 2019)

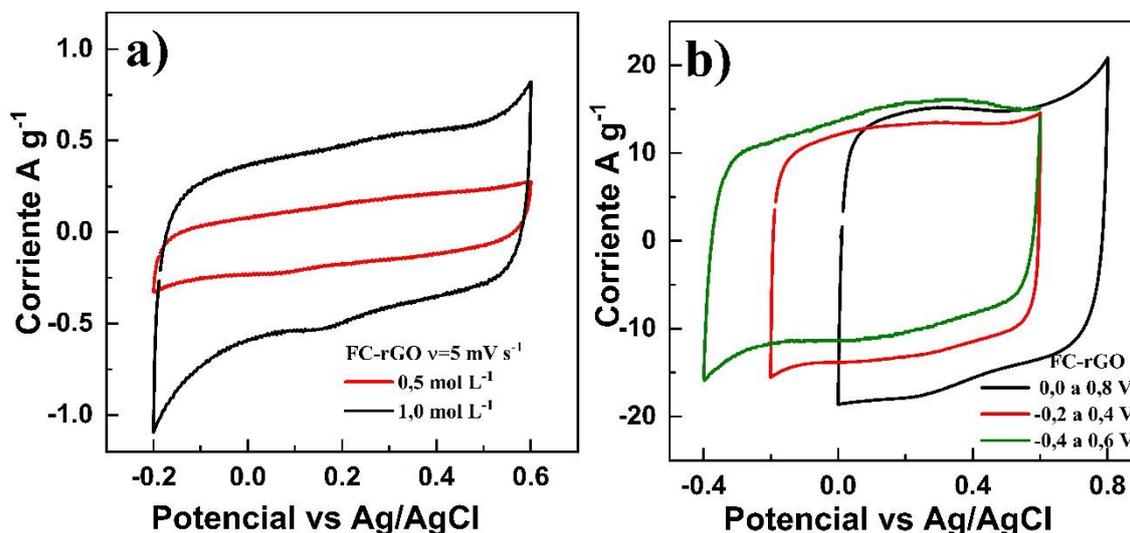
4.1.2. *Evaluaciones electroquímicas para FC y FC-rGO*

En la evaluación de electrodos para supercapacitores es importante definir el electrolito y la ventana de potencial para los análisis ya que se debe lograr la estabilidad electroquímica. Además, para examinar el almacenamiento de carga de estos materiales es importante el análisis de voltamperometría cíclica (VC) en tres electrodos (Sajjad et al., 2021; S. Zhang & Pan, 2015). En vista de esto, se realizó medidas de VC, utilizando como electrodo de referencia Ag/AgCl y contra electrodo de grafito, esto se realizó en una celda hermética bajo atmósfera de N₂. Como pruebas preliminares para FC-rGO, se evaluó en H₂SO₄ 0,5 mol L⁻¹ con el fin de establecer la zona de trabajo que estará limitada por este material; sin embargo, para obtener mejores respuestas de capacitancia por doble capa en las medidas se cambió por una solución más concentrada de H₂SO₄ 1,0 mol L⁻¹ (Soneda et al., 2004) esto se muestra en la Figura 28a, a una velocidad de barrido de 5 mV s⁻¹, ya que a velocidades lentas se puede evaluar mejor la capacitancia. La ventana de trabajo se varió entre -0,4 y +0,8 V con el fin de obtener solamente la medida de doble capa del material, la evaluación se realizó a una velocidad media de 50 mV s⁻¹. Se estableció así la ventana de trabajo entre -0,4 y +0,6 V en H₂SO₄ 1,0 mol L⁻¹ (Figura 28b, VC verde), la VC medida fue de forma rectangular esto debido a que el almacenamiento de carga es debido a la doble capa eléctrica (S. Zhang & Pan, 2015).

Luego de elegir el electrolito y la ventana de trabajo, es necesario conocer variación de corriente respecto a las velocidades de barrido, esto se realizó entre 5-250 mV s⁻¹. En la Figura 29a,b, para las FC y FC-rGO, las VC muestran una relación proporcional entre corriente y velocidad de barrido. En la Figura 30a para FC, se observa que la VC no es en forma rectangular, además que cerca de -0,4 V (+0,6 a -0,4 V) se tiene una mayor respuesta de corriente del material que cerca de +0,6 V (-0,4 V a +0,6 V), esto puede ser debido a la resistencia a la transferencia de carga de la muestra o a la pseudocapacitancia debido a las

Figura 28

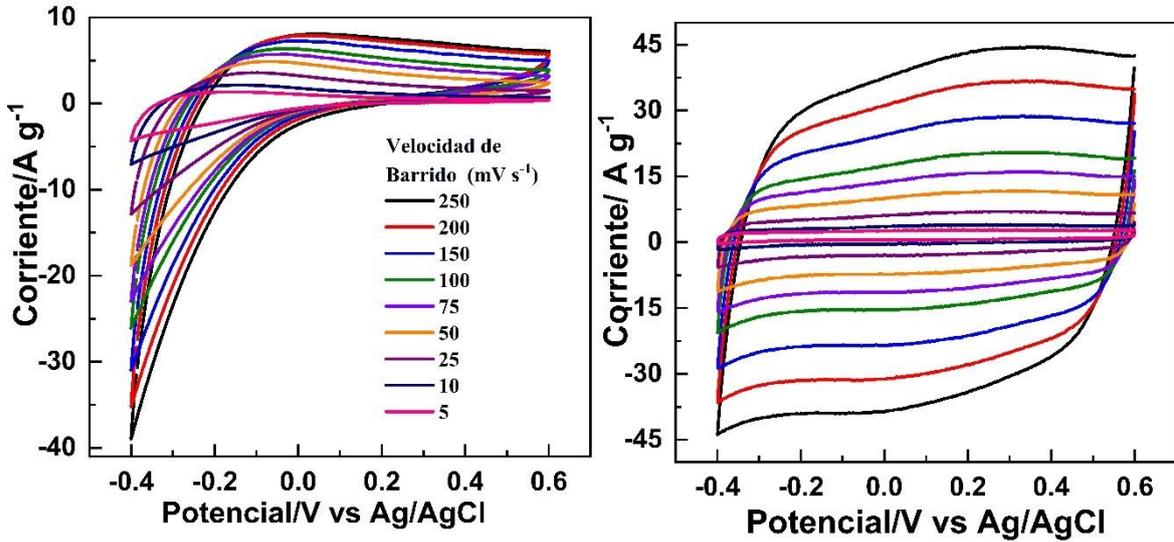
VC para FC-rGO a) variando la concentración del electrolito H_2SO_4 , b) variando la ventana de potencial de trabajo en H_2SO_4 1,0 mol L^{-1} .



reacciones redox Faradaicas reversibles de algunos grupos funcionales que contienen oxígeno (P. Zhang et al., 2018; Zhao et al., 2017). Mientras que, las muestras de FC-rGO muestran un perfil de VC cuasi-rectangulares, debido a la capacitancia por doble capa eléctrica. Además de mostrar una gran mejora en las respuestas electroquímica al incrementar su densidad de corriente, por lo cual se nota una mejora en la zona capacitiva por aumento del área superficial como se observó en el análisis de adsorción/desorción de N_2 en la Figura 26. También se puede observar cierta influencia de los picos rédox faradaicos debido al rGO entre -0,1 a 0,0 V reportados por (Oh et al., 2014) en H_2SO_4 1,0 mol L^{-1} .

Figura 29

VC de a) FC y b) FC-rGO, en H_2SO_4 $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ para v : 5-250 mV s^{-1} .



A velocidades de barrido bajas la carga y descarga es relativamente lenta lo cual permite que los iones del electrolito tengan el tiempo suficiente para poder difundir, esto se ve reflejada en las capacitancias obtenidas que son mayores en comparación a velocidades más rápidas (Gong et al., 2015), Figura 30a. La capacitancia específica fue calculada de acuerdo con la Ecuación 2:

$$C_s = \frac{\int_0^{2V_0/v} |i| dt}{2mV_0} \quad (\text{Ecuación 2})$$

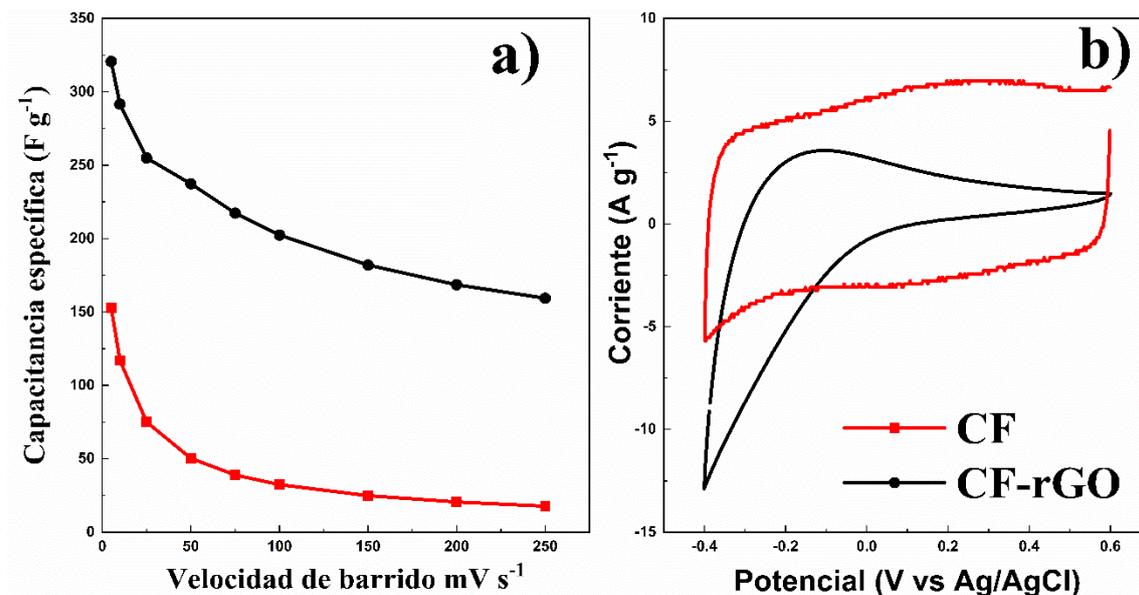
Donde: v es la velocidad de barrido, V_0 es la diferencia de voltaje, i es la corriente y m es la masa del material.

Los valores de capacitancia son mejores para el FC-rGO, a 5 mV s^{-1} se obtiene un valor de $\sim 320 \text{ F g}^{-1}$. Lo cual es casi el doble obtenido por FC que es de 153 F g^{-1} . Estos estudios muestran la importancia de modificar la superficie del material carbonoso, sin usar algún otro agente activante ácido o básico. Además, se puede apreciar las diferencias de

estos materiales al superponer las VC de las FC y FC-rGO a una velocidad de barrido de 25 mV s^{-1} , como se muestra en la Figura 30b.

Figura 30

Relación de a) la capacitancia específica y b) comparación de la voltamperometría cíclica a 25 mV s^{-1} para FC y FC-rGO en H_2SO_4 1,0 mol L^{-1} .



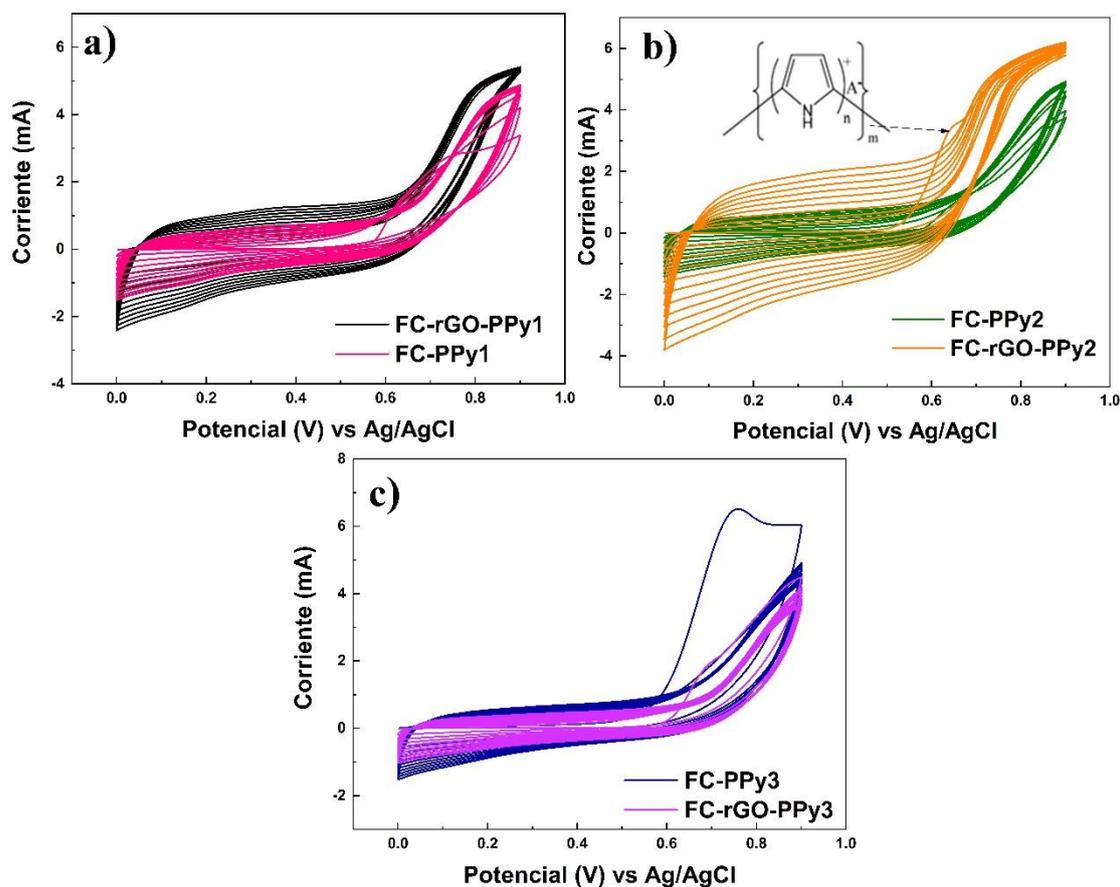
4.2. Modificación de FC y FC-rGO con PPy

Los polímeros conductores tienen propiedades intrínsecas, con características eléctricas similares a las de un metal y buena estabilidad mecánica. No obstante, la manera y condición de síntesis afectan sus propiedades, debido al cambio morfológico que adquieren (Wolfart et al., 2017). Dependiendo de los parámetros de electropolimerización el comportamiento del polímero conductor difiere (Sung & Lin, 2020), para esto se realizó la síntesis in-situ por VC sobre los electrodos FC y FC-rGO. Partiendo del monómero Py disuelto H_2SO_4 0,5 mol L^{-1} se realizó VC en una ventana de 0,0 a +0,9 V por 10 ciclos, variando la velocidad de deposición de 10, 25 y 50 mV s^{-1} , con la finalidad de visualizar si hay influencia en la pseudocapacitancia del PPy respecto a la velocidad de barrido de

electropolimerización. Dependiendo de la característica del carbón hay cierta diferencia en la forma de la voltamperometría cíclica al momento de formarse el polímero, ver Figura 31.

Figura 31

VC de la electrodeposición de pirrol, a) 10 mV s^{-1} , b) 25 mV s^{-1} y c) 50 mV s^{-1}



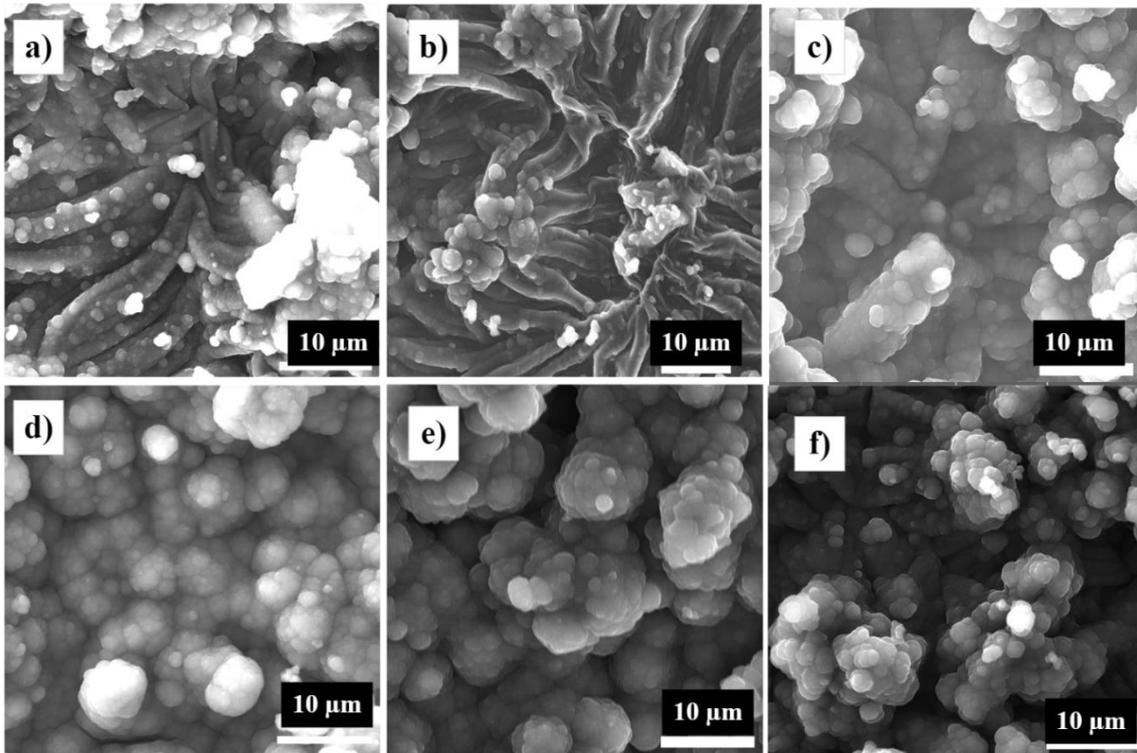
La oxidación del monómero Py y la formación del radical para empezar la formación de la cadena polimérica se encuentra entre +0,6 y +0,8 V, posiblemente se dé la reacción de la etapa 2 de la Figura 11, esto se evidencia con el pico de formación en el primer ciclo de la VC. A los materiales modificados con PPy sobre FC se les da el nombre de FC-PPy1, FC-PPy2 y FC-PPy3 de acuerdo con las velocidades de 10, 25 y 50 mV s^{-1} respectivamente, mientras que para los materiales modificados sobre FC-rGO se les nombrará FC-rGO-PPy1, FC-rGO-PPy2 y FC-rGO-PPy3 según las velocidades ya mencionadas.

4.2.1. Caracterizaciones morfológicas y fisicoquímicas de los materiales FC-PPy y FC-rGO-PPy

Con las caracterizaciones SEM, Raman y FTIR, se puede deducir las características fisicoquímicas de los materiales dándonos una idea de las diferencias entre ellas. Las imágenes SEM para FC-PPy y FC-rGO-PPy 1,2,3 se muestran en la Figura 32, las cuales tiene forma de coliflores característicos de este polímero (G. Liu et al., 2020; Parnell et al., 2019). Esto visualiza que el crecimiento del polímero se ve afectado por la superficie del carbón, obteniéndose un crecimiento más uniforme sobre FC-rGO mientras que en FC el crecimiento es más desordenado. También, el crecimiento depende de la velocidad de

Figura 32

Imágenes SEM de la superficie de los electrodos después de la polimerización de Py a), b), c) para FC-PPy 1,2,3 y d), e), f) para FC-rGO-PPy 1,2,3 respectivamente.



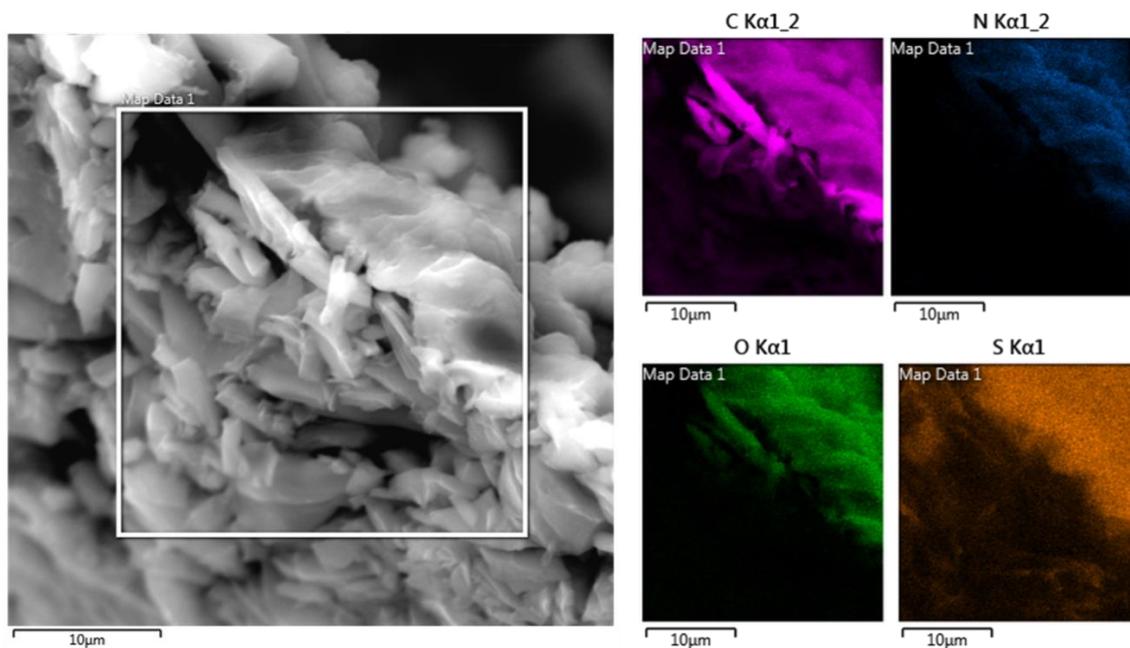
electropolimerización, como se puede apreciar FC-PPy3, FC-rGO-PPy3 la superficie del

polímero tiene mayor abertura entre las coliflores formadas, mientras que a velocidades más lentas estas aberturas se cierran. 10 μm .

Las imágenes del SEM-EDS muestran que el crecimiento del polímero se da sobre la superficie del carbón como se muestra en la Figura 33, esto se puede observar por la presencia de N del PPy (coloración azul) solamente en la sección superficial.

Figura 33

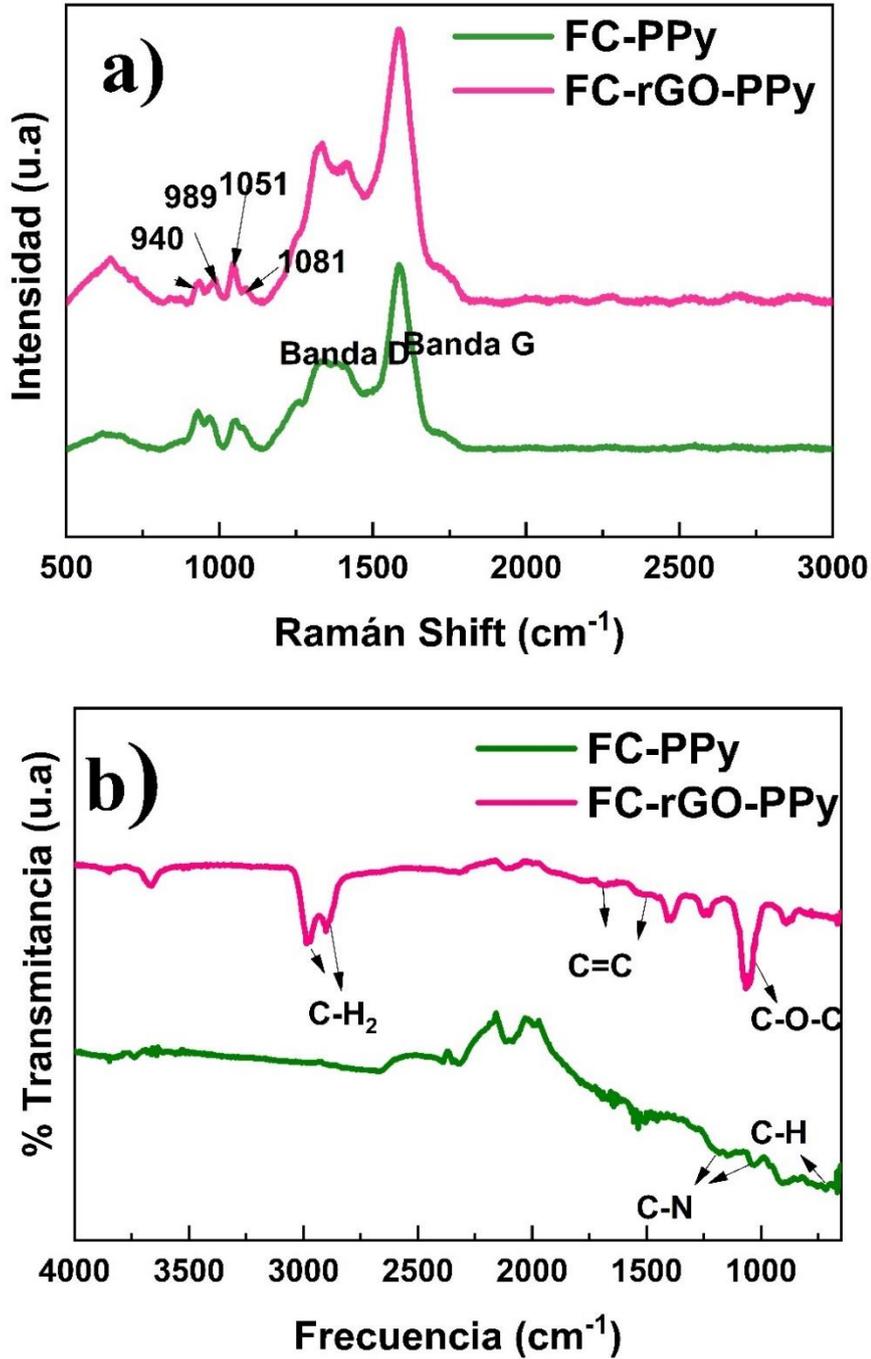
Imágenes SEM-EDS para FC-PPy.



Con las caracterizaciones de Raman se puede observar las bandas características del PPy, en 940, 969, 1051, 1081 cm^{-1} , las cuales están relacionadas con las vibraciones en el plano y fuera del plano de los modos N-H y C-H del PPy, También el FC y FC-rGO influyen en la formación de las bandas D y G (Figura 34a). En el espectro FTIR, Figura 35b, se complementan ambas medidas de FC y FC-rGO para determinar los picos característicos del PPy, esto debido a que algunos picos son interferidos por el rGO, la atribución en 740 cm^{-1} es para C-H del polímero, mientras que entre 1200 y 1140 cm^{-1} se les atribuye a los enlaces C-N y entre 1500-1700 cm^{-1} al enlace C=C (Ibrahim et al., 2013).

Figura 34

a) Espectro Raman y b) FTIR para FC-PPy3 y FC-rGO-PPy3.



4.2.2. Caracterizaciones electroquímicas

Las VC fueron a las mismas condiciones las medidas que se realizó para FC y FC-rGO. La cual se muestra en la Figura 35a, b, c, se puede observar que para diferentes

velocidades de barrido se obtienen perfiles de VC con ciertas distorsiones, además de que a velocidades más lentas (FC-PPy1,2) las corrientes incrementaron en comparación con FC-PPy3. Se calculó la capacitancia específica de los materiales FC-PPy 1,2,3 esto se muestra en la Figura 35d, con lo cual se puede visualizar el cambio de la capacitancia respecto a las velocidades de barrido para los diferentes materiales gracias a la contribución pseudocapacitiva que posee este polímero conductor PPy (Parnell et al., 2019; Sarkar et al., 2019). La Cs aumenta al disminuir la velocidad de polimerización, esto tiene valores similares para FC-PPy1 y FC-PPy2 siendo de 228 y 202 F g⁻¹ a 5 mV s⁻¹, respectivamente. Estos valores de capacitancia se calcularon utilizando la Ecuación 2. Además, los valores de las Cs resultantes se muestran en la Tabla 9.

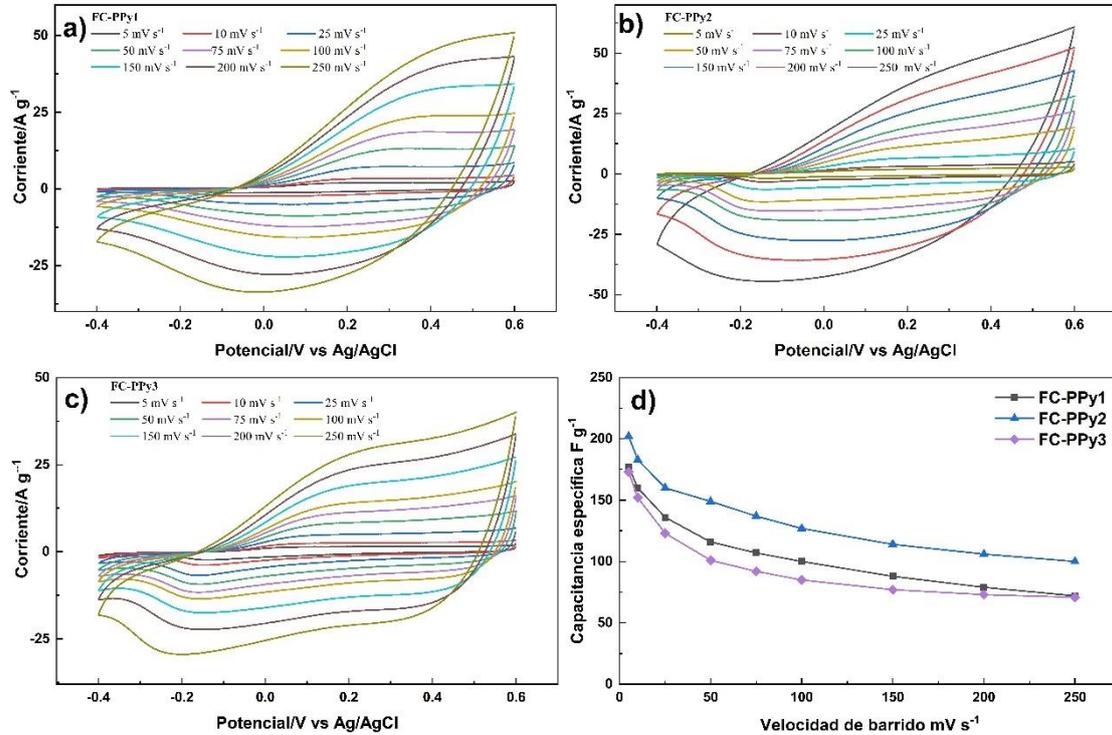
Tabla 9

Valores de capacitancia al modificar FC con PPy.

Velocidad (mV s⁻¹)	Capacitancia específica F g⁻¹			
	FC	FC-PPy1	FC-PPy2	FC-PPy3
5	153	228	202	111
10	117	205	183	98
25	75	175	160	79
50	50	150	149	65
75	39	137	137	59
100	32	129	127	55
150	25	114	114	49
200	21	102	106	47
250	18	93	100	46

Figura 35

a), b), c) VC de pirrol sobre FC a 10, 25 50 mV s^{-1} de velocidad de depósito respectivamente.

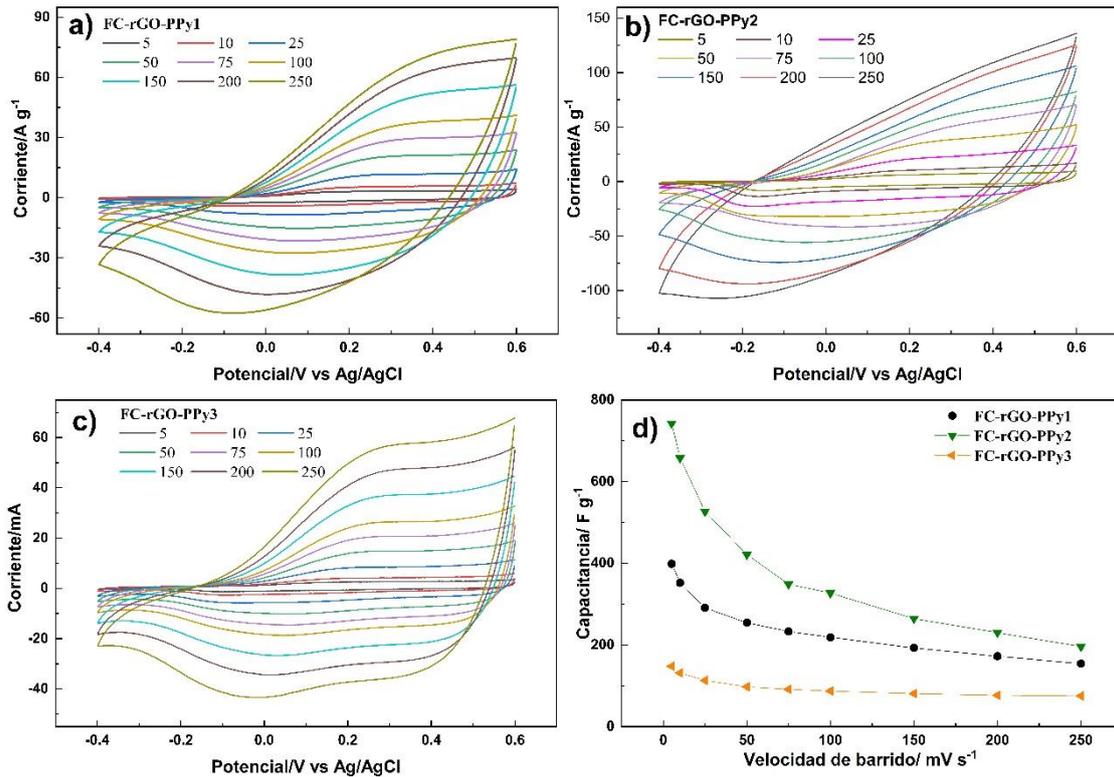


Para los materiales FC-rGO-PPy 1, 2, 3 las VC se muestran en la Figura 36a, b, c, de lo cual se tiene mayores corrientes FC-rGO-PPy en comparación con los otros materiales, no obstante, el perfil voltamperométrico de FC-rGO-PPy3 se acerca más a un rectángulo, similar ocurre para FC-PPy3. También se calculó la C_s , Figura 36d, observando que da mejores resultados de capacitancia el material electrodepositado a 25 mV s^{-1} , estos valores se resumen en la Tabla 10. Se puede observar que para velocidades bajas de electrodeposición FC-rGO-PPy1,2 se da un incremento en la capacitancia mucho mayor que lo obtenido en el material CF con PPy. Además, se obtuvo capacitancias de hasta 743 F g^{-1} para el material modificado con rGO y PPy, en comparación de 153 F g^{-1} de FC. Estos valores de capacitancia de los materiales estudiado en celda de tres electrodos son bastante aceptables para ser utilizados como electrodos en supercapacitores, y el valor obtenido de

FC-rGO-PPy2 es muy aceptable en comparación con por otros autores mostrados en la Tabla 1.

Figura 36

a), b), c) VC de pirrol sobre FC-rGO a 10, 25 y 50 mV s^{-1} de velocidad de depósito respectivamente.



Los materiales carbonosos obtenidos a partir de fibras de algodón van cambiando la superficie, aumentado su área superficial al ser modificado con rGO y sumando pseudocapacitancia al modificarlo con PPy, como se presenta en la Figura 37a, las VC evidencian este cambio en el material logrando incrementar su capacitancia ya sea por doble capa o por contribuciones pseudocapacitivas del polímero, causando un efecto sinérgico en el material. También, es importante aumentar el área superficial del material e impregnarlo con rGO, ya que las fibras solas al modificarlas con el polímero no tienen mucha

significancia en la variación de la capacitancia del material, esto se puede evidenciar con las imágenes SEM en la Figura 32a,b,c, que el polímero crece más desordenado. De estas evaluaciones se ve que mejor material en base a CF para ser empleado como electrodo en supercapacitores es FC-rGO-PP2 que da una capacitancia de hasta 742 F g⁻¹.

Tabla 10

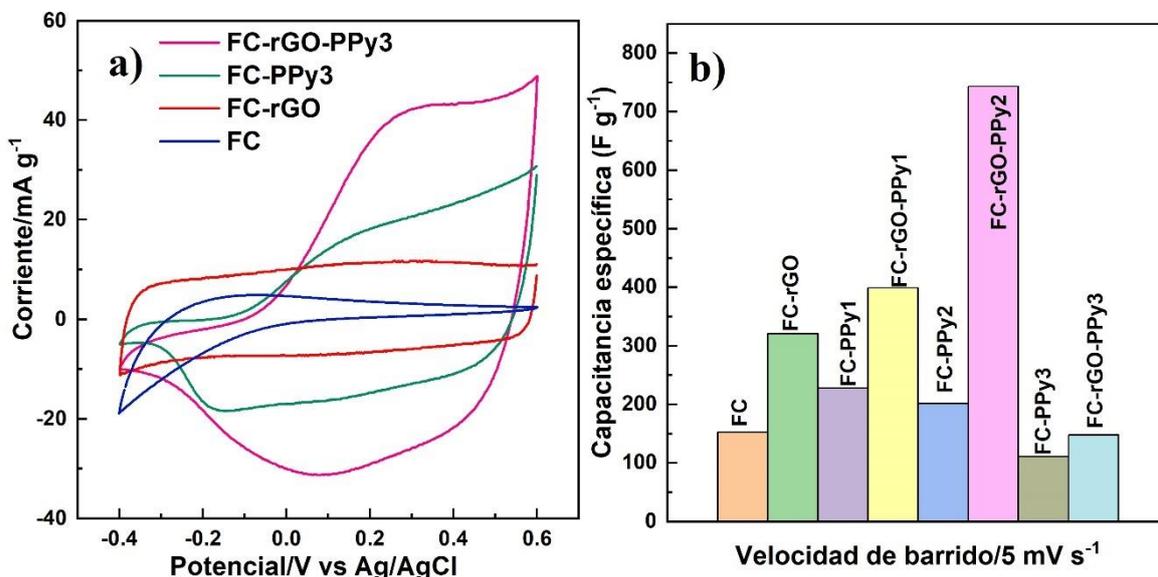
Valores de la capacitancia específica para los materiales de FC-rGO modificadas con PPy.

Velocidad (mV s⁻¹)	Capacitancia específica F g⁻¹			
	FC-rGO	FC-rGO-PPy1	FC-rGO-PPy2	FC-rGO-PPy3
5	321	399	743	148
10	292	352	658	132
25	255	291	527	113
50	237	254	421	98
75	217	233	349	92
100	203	219	327	87
150	182	193	265	81
200	169	173	230	77
250	159	154	196	75

Un mejor panorama de comparación de la capacitancia específica de los materiales estudiados de FC modificados con rGO y PPy, se visualiza en el histograma mostrado en la Figura 37b para una velocidad de barrido de 5 mV s⁻¹, que es la más lenta, de lo cual se puede ver la influencia de las modificaciones de FC en la capacitancia específica siendo el valor mejor el FC-rGO2.

Figura 37

a) VC de comparación al modificar las FC con rGO y PPy, b) comparación de la capacitancia a una velocidad de barrido de 50 mV s^{-1} para todos los materiales.



La capacitancia obtenida hasta ahora de las VC dependía de la velocidad de barrido. Por lo que también se hizo una evaluación para ver su comportamiento de acuerdo con la densidad de corriente, esto por curvas de CC/CD (S. Zhang & Pan, 2015). Para esto solo se realizó el análisis para FC, FC-rGO, FC-PPy2 y FC-rGO-PPy2 a una densidad de corriente de $1,0 \text{ A g}^{-1}$, estas medidas también fueron realizadas en 1 mol L^{-1} de H_2SO_4 utilizando un sistema de tres electrodos, el rango de potencial donde se realizó la medida fue entre $+0,6 \text{ V}$ y $-0,4 \text{ V}$. Las CC/CD obtenidas se muestran en la Figura 38a, donde se puede observar que, para FC-rGO es la CC/CD es más simétrica en comparación con los otros materiales, sin embargo no es el material con mayor tiempo de CC/CD. Por otro lado, los materiales carbonosos con PPy muestran un cambio de pendiente alrededor de $+0,2 \text{ V}$ probablemente esto debido a la pseudocapacitancia del polímero. De estas CC/CD, utilizando la Ecuación 3 se calculó la capacitancia específica obteniendo valores de 228, 363, 286 y 905 F g^{-1} para FC, FC-rGO, FC-PPy2 y FC-rGO-PPy2 respectivamente. Esta tendencia se asemeja a lo

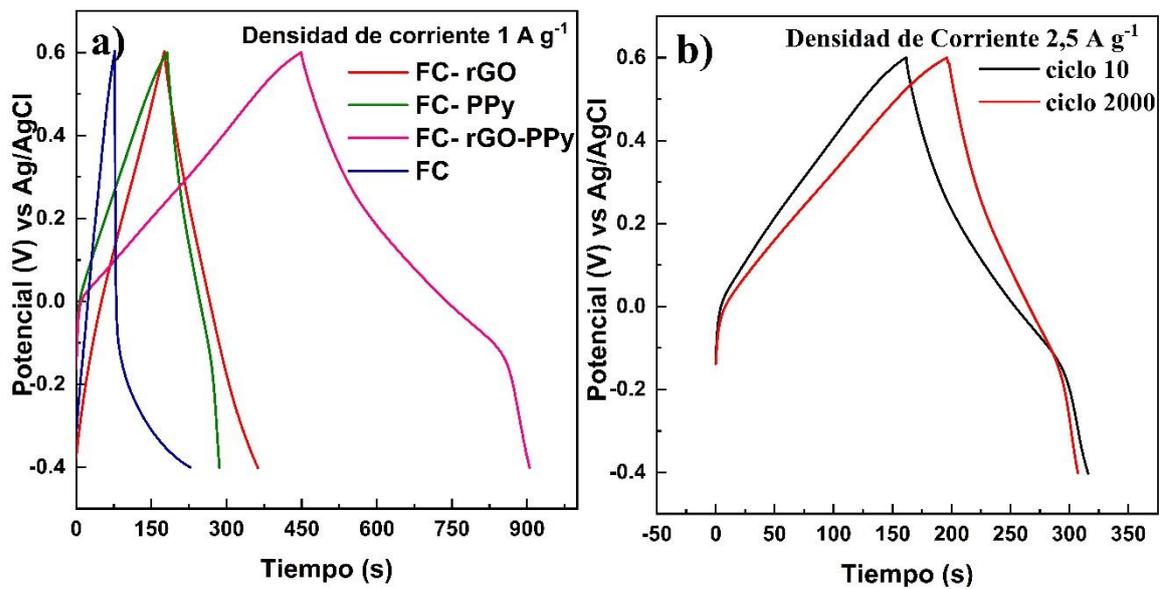
obtenido por VC, con lo cual se puede reafirmar que FC-rGO-PPy2 es el material óptimo . Además, para FC-rGO-PPy2 se realizó pruebas de estabilidad de 2000 ciclos a una densidad de corriente de 2,5 A g⁻¹ obteniendo un rendimiento del 97 % (Figura 38b).

$$C_s = \frac{2i_{CD} \cdot \Delta t}{m \cdot \Delta V} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde: Cs = capacitancia específica (F g⁻¹) i_{CD}: Intensidad de corriente (A), Δt: tiempo de descarga (s), ΔV: ventana de potencial de descarga (V), m: masa de un electrodo de trabajo (g).

Figura 38

Muestra a) Curvas de Carga y descarga para los materiales FC y sus modificaciones y b) estabilidad de FC-rGO-PPy2.



Conclusiones

Se sintetizaron materiales carbonosos a partir de fibras de algodón las cuales fueron impregnación con rGO, estas fueron denominadas FC y FC-rGO, respectivamente.

Se electrodepositó polipirrol (PPy) sobre los materiales carbonosos CF y CF-rGO mediante voltamperometría cíclica, esto se realizó a diferentes velocidades de 10, 25 y 50 mV s^{-1} , y a estos materiales se denominó FC-PPy1,2,3 y FC-rGO-PPy1,2,3, respectivamente.

Se caracterizó los materiales carbonosos con las diversas modificaciones. Los materiales carbonosos CF aumentaron su área superficial hasta $607 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ al ser impregnados con rGO, mostrando así el cambio de su morfología al ser observado mediante imágenes SEM, así como se obtuvo imágenes SEM para los materiales modificados con PPy a diferentes velocidades. Mientras que la espectroscopía Raman y espectroscopía infrarroja (IR) se realizó solamente para los materiales de partida CF, FC-rGO y para los de mejor capacitancia al adicionarlos PPy, estos fueron FC-PPy2 y FC-rGO-PPy2.

Se evaluó las capacitancias por voltamperometría cíclica para los materiales FC, FC-rGO, FC-PPy1, 2, 3 y FC-rGO-PPy1, 2, 3. Se obtuvo capacitancias de 153 y 321 F g^{-1} para FC y FC-rGO, respectivamente. A estos materiales al modificarlos con PPy, se pudo estudiar la influencia de la velocidad de polimerización de 10, 25 y 50 mV s^{-1} en la capacitancia específica para FC-PPy1,2,3 y FC-rGO-PPy1,2,3, obteniendo mejores resultados cuando se electropolimeriza a una velocidad de 25 mV s^{-1} sobre el FC-rGO (FC-rGO-PPy2) con una capacitancia específica de hasta 743 F g^{-1} a 5 mV s^{-1} . Sin embargo, la influencia del polímero en comparación con el rGO sobre las fibras fue menor su contribución en la capacitancia. Se evaluó la capacitancia por curvas de carga y descarga 228, 363, 286 y 905 F g^{-1} para FC, FC-

rGO, FC-PPy2 y FC-rGO-PPy2 a una densidad de corriente de $1,0 \text{ A g}^{-1}$ en un sistema de tres electrodos.

De este estudio se puede concluir que las FC obtenidas de algodón necesariamente deben de ser modificadas para el uso en supercapacitores, una buena opción es impregnarlo con el rGO, sin la necesidad de activarlo por otros medios, pero esto aún se puede mejorar adicionándole PPy obteniéndose así una mejor capacitancia debido a la sinergia de estos materiales.

Recomendaciones

Los materiales para ser usado como electrodos para supercapacitores seguirán siendo objeto de estudio, sobre todo de carbones obtenidos a partir de residuos de biomasa. Tratando de mejorar su capacidad de almacenamiento, su costo, estabilidad y sobre todo que sea amigable con el ambiente. La contribución pseudocapacitiva del PPy es muy importante, sin embargo, requiere mayor exploración en la síntesis por voltamperometría cíclica variando el número de ciclos, además se pueden utilizar técnicas a potencial controlado como la cronoamperometría. También, se debería realizar medidas de XPS para poder visualizar los componentes con mayor precisión de los materiales, así como el comportamiento de los grupos funcionales del polímero. Finalmente, los materiales sintetizados se deben de evaluar en un sistema de 2 electrodos para poder saber la cantidad de potencia necesaria para el uso como dispositivo de almacenamiento de carga.

Referencias

- Abbas, S. A., Forghani, M., Anh, S., Donne, S. W., & Jung, K. D. (2020). Carbon hollow spheres as electrochemical capacitors: Mechanistic insights. *Energy Storage Materials*, 24, 550–556. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.06.034>
- Ahmed, N., Islam Khan, T., & Augustine, A. (2018). Climate change and environmental degradation: a serious threat to global security. *European Journal of Social Sciences Studies*, 3(July), 161–172. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1307227>
- AQUAe. (2021). *8 beneficios de la energía hidráulica*. <https://www.fundacionaquae.org/wiki/ventajas-energia-hidraulica/>
- Arias, J. (2007). *Síntesis y Caracterización de polímeros conductores basados en anilinas sustituidas y su aplicación en electrocatálisis* [Universidad de Alicante]. <https://rua.ua.es/dspace/handle/10045/7706>
- Baas, J. (2015). *Síntesis y caracterización de un material híbrido triple a base de óxido grafeno para su aplicación en capacitores electroquímicos* [Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.]. https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/391/1/PCER_M_Tesis_2015_Baas_Martin.pdf
- Barrera Doblado, O., & Ros Marín, J. A. (2017). *Vehículos eléctricos e híbridos*. Paraninfo. https://books.google.com.pe/books?id=3LwrDwAAQBAJ&pg=PA89&dq=condensadores+electroquímicos&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwihtb_ZiK7rAhUywFkKHfBAD_EQ6AEwBXoECAYQA#v=onepage&q=condensadores electroquímicos&f=false
- Bazán, A., Ponce Vargas, M., Luyo Caycho, C., La Rosa-Toro, A., & Baena Moncada, A. M. (2020). Highly Porous Reduced Graphene Oxide-Coated Carbonized Cotton Fibers as Supercapacitor Electrodes. *ACS Omega*, 5(50), 32149–32159. <https://doi.org/10.1021/ACSOMEGA.0C02370>
- Bermudez, M. C., Universidad, R., Francisco, D., De, J., Facultad, C., Ciencias, D. E., & Educación, Y. (2016). *Síntesis y caracterización de polipirrol dopado con*

poliestireno sulfonato de sodio.

- Bi, H., Liu, Z., Xu, F., Tang, Y., Lin, T., & Huang, F. (2016). Three-dimensional porous graphene-like carbon cloth from cotton as a free-standing lithium-ion battery anode. *Journal of Materials Chemistry A*, 4(30), 11762–11767.
<https://doi.org/10.1039/c6ta04307k>
- Bolotin, K. I., Sikes, K. J., Jiang, Z., Klima, M., Fudenberg, G., Hone, J., Kim, P., & Stormer, H. L. (2008). Ultrahigh electron mobility in suspended graphene. *Solid State Communications*, 146(9–10), 351–355. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2008.02.024>
- Buckley, J. D., & Edie, D. D. (1993). *Carbon-Carbon Materials and Composites*. Noyes Publications .
https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=sqfWSwDdVOMC&oi=fnd&pg=PP1&dq=materials+carbon&ots=R01qucgXtP&sig=sWCG7TiQ1HqYr_x-XcPQ4Y6GOVU#v=onepage&q=materials carbon&f=false
- Calvo, E. G., Arenillas, A., Menéndez, J. A., González, M., & Viera, J. C. (2009). Properties, advantages and disadvantages of materials used in supercapacitors. *Afinidad*, 66(543), 380–387.
- Chen, D., Jiang, K., Huang, T., & Shen, G. (2020). Recent Advances in Fiber Supercapacitors: Materials, Device Configurations, and Applications. En *Advanced Materials* (Vol. 32, Número 5, p. 1901806). Wiley-VCH Verlag.
<https://doi.org/10.1002/adma.201901806>
- Chen, J., Xie, J., Jia, C. Q., Song, C., Hu, J., & Li, H. (2022). Economical preparation of high-performance activated carbon fiber papers as self-supporting supercapacitor electrodes. *Chemical Engineering Journal*, 450, 137938.
<https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2022.137938>
- Chen, L., Ji, T., Mu, L., & Zhu, J. (2017). Cotton fabric derived hierarchically porous carbon and nitrogen doping for sustainable capacitor electrode. *Carbon*, 111, 839–848. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.10.054>
- Choy, M. (s/f). *Polímeros conductores como alternativa tecnológica en la protección de nuestro ambiente.*

- Cruz, L. (2019). *Espectroscopía de Infrarrojo/ATR*. Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable.
http://www.cciqs.uaemex.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=113&Itemid=86
- De la Fuente, J. (s/f). *Graphene - What Is It?* . Graphenea. Recuperado el 25 de agosto de 2020, de <https://www.graphenea.com/pages/graphene#.X0WCJshKi00>
- Dubey, P., Maheshwari, P. H., & Sundriyal, S. (2022). Human Hair-Derived Porous Activated Carbon as an Efficient Matrix for Conductive Polypyrrole for Hybrid Supercapacitors. *Energy and Fuels*, 36(21), 13218–13228.
https://doi.org/10.1021/ACS.ENERGYFUELS.2C01926/SUPPL_FILE/EF2C01926_SI_001.PDF
- Earth's CO2 Home Page*. (s/f). Recuperado el 8 de abril de 2022, de <https://www.co2.earth/>
- El-Hout, S. I., Attia, S. Y., Mohamed, S. G., & Abdelbasir, S. M. (2022). From waste to value-added products: Evaluation of activated carbon generated from leather waste for supercapacitor applications. *Journal of Environmental Management*, 304, 114222.
<https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.114222>
- Energy X. (s/f). *What is “Intermittency” in Renewable Energy?* . Recuperado el 11 de octubre de 2022, de <https://energyx.com/resources/what-is-intermittency-in-renewable-energy/>
- EPA. (2017a). *Descripción general de los gases de efecto invernadero el medioambiente / US EPA*. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos.
<https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/descripcion-general-de-los-gases-de-efecto-invernadero>
- EPA. (2017b). *Global Greenhouse Gas Emissions Data*. Greenhouse Gas Emissions(GHG). <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data#Sector>
- Escobar, M. (2021). Algodón, con el Perú en su ADN. *El Peruano*.
<https://elperuano.pe/noticia/134284-algodon-con-el-peru-en-su-adn>

- Factorenergia. (2023). *Energía solar: todo lo que tienes que saber*.
<https://www.factorenergia.com/es/blog/autoconsumo-electrico/energia-solar/>
- Fairley, P., & Moya, L. (2011). *Siemens apuesta por la energía mareomotriz*.
https://www.ecoticias.com/energias-renovables/57224_noticias-informacion-medio-ambiente-medioambiente-medioambiental-ambiental-ecologia-energias-renovables
- Fan, Z., Zhu, J., Sun, X., Cheng, Z., Liu, Y., & Wang, Y. (2017). High Density of Free-Standing Holey Graphene/PPy Films for Superior Volumetric Capacitance of Supercapacitors. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 9(26), 21763–21772.
<https://doi.org/10.1021/acsami.7b03477>
- Fernández, J., & Álvaro, R. (2019). *El sector del almacenamiento de energía eléctrica en la CAPV*. www.orquestra.deusto.es
- Fernández, T. (2003). Polímeros conductores: Síntesis, propiedades y aplicaciones electroquímicas. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 4.
- Ferrero, G. A., Sevilla, M., & Fuertes, A. B. (2017). Free-standing hybrid films based on graphene and porous carbon particles for flexible supercapacitors. *Sustainable Energy and Fuels*, 1(1), 127–137. <https://doi.org/10.1039/c6se00047a>
- Freedman, Y. (2009). *Física universitaria* (Decimosegu, Vol. 2). Pearson.
- Garea Moreda, B., Pichs Madruga, R., & Gonzáles Espino, Z. (2014). *I. El cambio climático, sus consecuencias e impactos principales*.
<http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Havana/pdf/cap1.pdf>
- Gaspar, D., Fernandes, S. N., De Oliveira, A. G., Fernandes, J. G., Grey, P., Pontes, R. V., Pereira, L., Martins, R., Godinho, M. H., & Fortunato, E. (2014). Nanocrystalline cellulose applied simultaneously as the gate dielectric and the substrate in flexible field effect transistors. *Nanotechnology*, 25(9). <https://doi.org/10.1088/0957-4484/25/9/094008>
- Geim, A. K. (2009). Graphene: Status and prospects. En *Science* (Vol. 324, Número 5934, pp. 1530–1534). American Association for the Advancement of Science.
<https://doi.org/10.1126/science.1158877>
- Gerstner, E. (2010). Nobel Prize 2010: Andre Geim & Konstantin Novoselov. *Nature*

- Physics*, 6(11), 836–836. <https://doi.org/10.1038/nphys1836>
- Giraldo, L., García, V., & Moreno, J. C. (2007). Caracterización superficial en fase gas y líquida de carbones activados . *Scielo Colombia*.
- Gong, Y., Li, D., Fu, Q., & Pan, C. (2015). Influence of graphene microstructures on electrochemical performance for supercapacitors. *Progress in Natural Science: Materials International*, 25(5), 379–385. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2015.10.004>
- González Velasco, J. (2012). *Energías renovables* . Reverté .
https://books.google.com.pe/books?id=09zeDwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=que+son+energías+renovables&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=que+son+energías+renovables&f=false
- Goodge, J. (2017, abril 26). *Energy-dispersive detector (EDS)*. University of Minnesota-Duluth. https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/eds.html
- Gregg, S. J. (1982). *Adsorption, Surface Area and Porosity*. ACADEMIC PRESS INC.
[https://www.eng.uc.edu/~beaucag/Classes/AdvancedMaterialsThermodynamics/Books/S.J.Gregg,KennethS.W.Sing-Adsorption,surfacearea,andporosity-AcademicPress\(1982\).pdf](https://www.eng.uc.edu/~beaucag/Classes/AdvancedMaterialsThermodynamics/Books/S.J.Gregg,KennethS.W.Sing-Adsorption,surfacearea,andporosity-AcademicPress(1982).pdf)
- Gross, R., Leach, M., & Bauen, A. (2003). Progress in renewable energy. *Environment International*, 29(1), 105–122. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00130-7](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00130-7)
- Guacaneme, J. A., Velasco, D., & Trujillo, C. L. (2014). Revisión de las características de sistemas de almacenamiento de energía para aplicaciones en micro redes. *Informacion Tecnologica*, 25(2), 175–188. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000200020>
- Gutiérrez, T. M., Chito Trujillo, D. M., & Cuervo Ochoa, G. (2019). *Polímeros: Generalidades y tendencias de investigación en Colombia*. Universidad del Cauca.
<https://books.google.com.pe/books?id=XoewDwAAQBAJ&pg=PA54&dq=voltamperometría+cíclica&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwiss57Hpfl8AhW4J7kGHb72CjoQ6AF6BAGHEAI#v=onepage&q=voltamperometría+cíclica&f=false>
- Halper, M. S., & Ellenbogen, J. C. (2006). Supercapacitors : A Brief Overview. En *MITRE Nanosystems Group* (Número March).
<http://www.mitre.org/tech/nanotech%0ASponsor>

- Herou, S., Schlee, P., Jorge, A. B., & Titirici, M. (2018). Biomass-derived electrodes for flexible supercapacitors. En *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* (Vol. 9, pp. 18–24). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2017.10.005>
- Hong, X., Fu, J., Liu, Y., Li, S., & Liang, B. (2021). Strawberry-like carbonized cotton Cloth@Polyaniline nanocomposite for high-performance symmetric supercapacitors. *Materials Chemistry and Physics*, 258, 123999. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHEMPHYS.2020.123999>
- Huang, Y., Li, H., Wang, Z., Zhu, M., Pei, Z., Xue, Q., Huang, Y., & Zhi, C. (2016). Nanostructured Polypyrrole as a flexible electrode material of supercapacitor. *Nano Energy*, 22, 422–438. <https://doi.org/10.1016/J.NANOEN.2016.02.047>
- Hummers, W. S., & Offeman, R. E. (1958). Preparation of Graphitic Oxide. *Journal of the American Chemical Society*, 80(6), 1339. https://doi.org/10.1021/JA01539A017/ASSET/JA01539A017.FP.PNG_V03
- Ibrahim, I. M., Yunus, S., & Hashim, M. A. (2013). Relative performance of isoproopylamine, pyrrole and pyridine as corrosion inhibitors for carbon steels in saline water at mildly elevated temperatures. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4(2), 1–12.
- IUPAC. (2022). *Periodic table of elements*. <https://iupac.org/what-we-do/periodic-table-of-elements/#a2>
- Ji, S., Yang, J., Cao, J., Zhao, X., Mohammed, M. A., He, P., Dryfe, R. A. W., & Kinloch, I. A. (2020). A Universal Electrolyte Formulation for the Electrodeposition of Pristine Carbon and Polypyrrole Composites for Supercapacitors. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 12(11), 13386–13399. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c01216>
- Jiang, W., Li, L., Pan, J., Senthil, R. A., Jin, X., Cai, J., Wang, J., & Liu, X. (2019). Hollow-tubular porous carbon derived from cotton with high productivity for enhanced performance supercapacitor. *Journal of Power Sources*, 438(April), 226936. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.226936>
- Katsnelson, M. I. (2007). Graphene: carbon in two dimensions. En *Materials Today* (Vol. 10, Números 1–2, pp. 20–27). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(06\)71788-6](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(06)71788-6)

- Keeling, R. F. (2020). *CO2 Monitoring*. <https://www.co2.earth/co2-monitoring>
- Kosky, P., Balmer, R., Keat, W., & Wise, G. (2021). Electrochemical Engineering. En *Exploring Engineering* (pp. 383–403). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815073-3.00017-X>
- Krishnamoorthy, K., Navaneethaiyer, U., Mohan, R., Lee, J., & Kim, S. J. (2012). Graphene oxide nanostructures modified multifunctional cotton fabrics. *Applied Nanoscience (Switzerland)*, 2(2), 119–126. <https://doi.org/10.1007/s13204-011-0045-9>
- Kulandaivalu, S., Mohd Azahari, M. N., Azman, N. H. N., & Sulaiman, Y. (2020). Ultrahigh specific energy of layer by layer polypyrrole/graphene oxide/multi-walled carbon nanotube| polypyrrole/manganese oxide composite for supercapacitor. *Journal of Energy Storage*, 28, 101219. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101219>
- Lee, J., Kim, K. H., & Kwon, E. E. (2017). Biochar as a Catalyst. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 77, pp. 70–79). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.002>
- Lemine, A. S., Zagho, M. M., Altahtamouni, T. M., & Bensalah, N. (2018). Graphene a promising electrode material for supercapacitors-A review. *International Journal of Energy Research*, 42(14), 4284–4300. <https://doi.org/10.1002/er.4170>
- Li, D., Wang, T., Li, Z., Xu, X., Wang, C., & Duan, Y. (2019). Application of Graphene-Based Materials for Detection of Nitrate and Nitrite in Water—A Review. *Sensors*, 20(1), 54. <https://doi.org/10.3390/s20010054>
- Li, L., Du, D., He, C., Yu, L., Tang, W., Hu, S., Wang, X., Fu, Z., Xia, L., Xu, W., & Kong, L. (2023). Cotton yarns decorated with hydrothermally reduced graphene oxide for flexible supercapacitors. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117547>
- Li, W., Qi, H., Guo, F., Du, Y., Song, N., Liu, Y., & Chen, Y. (2018). Co nanoparticles supported on cotton-based carbon fibers: A novel broadband microwave absorbent. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.09.075>
- Lin, L., Bi, X., Gu, Y., Wang, F., & Ye, J. (2021). Surface-enhanced Raman scattering nanotags for bioimaging. *Journal of Applied Physics*, 129(19), 191101.

<https://doi.org/10.1063/5.0047578/848955>

- Liu, F., Wang, C., Sui, X., Riaz, M. A., Xu, M., Wei, L., & Chen, Y. (2019). Synthesis of graphene materials by electrochemical exfoliation: Recent progress and future potential. *Carbon Energy*, *1*(2), 173–199. <https://doi.org/10.1002/cey2.14>
- Liu, G., Shi, Y., Wang, L., Song, Y., Gao, S., Liu, D., & Fan, L. (2020). Reduced graphene oxide/polypyrrole composite: an advanced electrode for high-performance symmetric/asymmetric supercapacitor. *Carbon Letters*, *30*(4), 389–397. <https://doi.org/10.1007/s42823-019-00108-x>
- Liu, Y., Xia, L., Zhang, Q., Guo, H., Wang, A., Xu, W., & Wang, Y. (2019). Structure and properties of carboxymethyl cotton fabric loaded by reduced graphene oxide. *Carbohydrate Polymers*, *214*(February), 117–123. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.03.028>
- Lukatskaya, M. R., Dunn, B., & Gogotsi, Y. (2016). Multidimensional materials and device architectures for future hybrid energy storage. *Nature Communications*. <https://doi.org/10.1038/ncomms12647>
- Lv, C., Ma, X., Guo, R., Li, D., Hua, X., Jiang, T., Li, H., & Liu, Y. (2023). Polypyrrole-decorated hierarchical carbon aerogel from liquefied wood enabling high energy density and capacitance supercapacitor. *Energy*, *270*, 126830. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2023.126830>
- Martín, E. (2021). *Las energías renovables siguen aumentando a nivel mundial: en 2021 se han instalado hasta 227 GW más de capacidad*. <https://www.motorpasion.com/futuro-movimiento/energias-renovables-siguen-aumentando-a-nivel-mundial-2021-se-han-instalado-227-gw-capacidad>
- Martín Martínez, J. M. (1990). *ADSORCIÓN FÍSICA DE GASES Y VAPORES POR CARBONES*. https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/4291/5/adsorcion_fisica_3.pdf
- McFadden, C. (2020, junio 6). *¿Podrían los ultracondensadores reemplazar las baterías en futuros vehículos eléctricos?* Interesting Engineering. <https://interestingengineering.com/could-ultracapacitors-replace-batteries-in-future-electric-vehicles>

- Mcmurry, J. (2008). *Química Orgánica, 7ma Edición*.
- Moriarty, P., & Honnery, D. (2016). Can renewable energy power the future? *Energy Policy*, 93, 3–7. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.02.051>
- Moriarty, P., & Wang, S. J. (2015). Assessing Global Renewable Energy Forecasts. *Energy Procedia*. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.256>
- Nomura, K., Nishihara, H., Kobayashi, N., Asada, T., & Kyotani, T. (2019). 4.4 v supercapacitors based on super-stable mesoporous carbon sheet made of edge-free graphene walls. *Energy and Environmental Science*, 12(5), 1542–1549. <https://doi.org/10.1039/c8ee03184c>
- Oh, Y. J., Yoo, J. J., Kim, Y. Il, Yoon, J. K., Yoon, H. N., Kim, J. H., & Park, S. Bin. (2014). Oxygen functional groups and electrochemical capacitive behavior of incompletely reduced graphene oxides as a thin-film electrode of supercapacitor. *Electrochimica Acta*, 116, 118–128. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.11.040>
- OMS. (2018). *Cambio climático y salud*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/cambio-climático-y-salud>
- Ortíz, R., Martínez, Y., & Hernández, R. (2006). *Técnicas electroanalíticas: Voltamperometría*.
- Purdue University. (2019). *Scanning Electron Microscope*. [https://www.purdue.edu/epps/rem/laboratory/equipment safety/Research Equipment/sem.html](https://www.purdue.edu/epps/rem/laboratory/equipment%20safety/Research%20Equipment/sem.html)
- Park, H., Lim, S., Du Nguyen, D., & Won Suk, J. (2019). Electrical Measurements of Thermally Reduced Graphene Oxide Powders under Pressure. *nanomaterials*. <https://doi.org/10.3390/nano9101387>
- Parnell, C. M., Chhetri, B. P., Mitchell, T. B., Watanabe, F., Kannarpady, G., RanguMagar, A. B., Zhou, H., Alghazali, K. M., Biris, A. S., & Ghosh, A. (2019). Simultaneous Electrochemical Deposition of Cobalt Complex and Poly(pyrrole) Thin Films for Supercapacitor Electrodes. *Scientific Reports*, 9(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41969-6>
- Peets, P., Leito, I., Pelt, J., & Vahur, S. (2017). Identification and classification of textile

fibres using ATR-FT-IR spectroscopy with chemometric methods. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 173, 175–181.

<https://doi.org/10.1016/j.saa.2016.09.007>

Perera, F. P. (2017). Multiple threats to child health from fossil fuel combustion: Impacts of air pollution and climate change. En *Environmental Health Perspectives* (Vol. 125, Número 2, pp. 141–148). Public Health Services, US Dept of Health and Human Services. <https://doi.org/10.1289/EHP299>

Ponce, M. F., Mamani, A., Jerez, F., Castilla, J., Ramos, P. B., Acosta, G. G., Sardella, M. F., & Bavio, M. A. (2022). Activated carbon from olive tree pruning residue for symmetric solid-state supercapacitor. *Energy*, 260, 125092.

<https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2022.125092>

Proctor, J. (2019). Graphene Is Thin, but Not Infinitely So. *Physics*, 12.

<https://doi.org/10.1103/physics.12.104>

Quan, C., Zhou, Y., Wang, J., Wu, C., & Gao, N. (2023). Biomass-based carbon materials for CO₂ capture: A review. *Journal of CO₂ Utilization*, 68, 102373.

<https://doi.org/10.1016/J.JCOU.2022.102373>

Reina, G., González-Domínguez, J. M., Criado, A., Vázquez, E., Bianco, A., & Prato, M. (2017). Promises, facts and challenges for graphene in biomedical applications. En *Chemical Society Reviews* (Vol. 46, Número 15, pp. 4400–4416). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c7cs00363c>

Ren, B., Zhang, X., An, H., Ding, S., Zhang, H., Zeng, X., Wang, X., Fan, M., & Yang, X. (2023). Hollow cotton carbon based NiCo₂S₄/NiMoO₄ hybrid arrays for high performance supercapacitor. *Journal of Energy Storage*, 59, 106553.

<https://doi.org/10.1016/J.EST.2022.106553>

Rodríguez, A. (2013, junio 27). *Los Supercondensadores y sus beneficios de diseño en aplicaciones esenciales*. Diario electrónico hoy.

<https://www.diarioelectronicohoy.com/los-supercondensadores-y-sus-beneficios-de-diseno-en-aplicaciones-esenciales/>

Sadki, S., Schottland, P., Brodie, N., & Sabouraud, G. (2000). The mechanisms of pyrrole electropolymerization. *Chemical Society Reviews*, 29(5), 283–293.

<https://doi.org/10.1039/A807124A>

Sadki, S., Schottland, P., Brodie, N., Sabouraud, G., Sa'ïd, S., & Dr, S. (2000). The mechanisms of pyrrole electropolymerization. *Chem. Soc. Rev*, 29, 283–293.

<https://doi.org/10.1039/a807124a>

Sajjad, M., Khan, M. I., Cheng, F., & Lu, W. (2021). A review on selection criteria of aqueous electrolytes performance evaluation for advanced asymmetric supercapacitors. *Journal of Energy Storage*, 40(June), 102729.

<https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102729>

Saleem, H., Hanneef, M., & Abbasi, H. (2018). Synthesis route of reduced graphene oxide via thermal reduction of Chemically exfoliated graphene oxide. *Materials Chemistry and Physics*, 204, iii–v. [https://doi.org/10.1016/s0254-0584\(17\)30891-x](https://doi.org/10.1016/s0254-0584(17)30891-x)

Shao, Y., El-Kady, M. F., Wang, L. J., Zhang, Q., Li, Y., Wang, H., Mousavi, M. F., & Kaner, R. B. (2015). Graphene-based materials for flexible supercapacitors. En *Chemical Society Reviews* (Vol. 44, Número 11, pp. 3639–3665). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c4cs00316k>

Skoog, D. A., James Holler, F., & Crouch, S. R. (2001). *Principios de análisis instrumental* (pp. 1–856).

Smith, E., & Dent, G. (2004). Modern raman spectroscopy: A practical approach. En *Modern Raman Spectroscopy: A Practical Approach*. Wiley.

<https://doi.org/10.1002/0470011831>

Soneda, Y., Toyoda, M., Tani, Y., Yamashita, J., Kodama, M., Hatori, H., & Inagaki, M. (2004). Electrochemical behavior of exfoliated carbon fibers in H₂SO₄ electrolyte with different concentrations. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 65(2–3), 219–222. <https://doi.org/10.1016/j.jpics.2003.10.017>

Song, K., Ni, H., & Fan, L. Z. (2017). Flexible Graphene-Based Composite Films for Supercapacitors with Tunable Areal Capacitance. *Electrochimica Acta*, 235, 233–241. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.03.065>

Sung, Y. S., & Lin, L. Y. (2020). Systematic design of polypyrrole/carbon fiber electrodes for efficient flexible fiber-type solid-state supercapacitors. *Nanomaterials*, 10(2).

<https://doi.org/10.3390/nano10020248>

- Swapp, S. (2017, mayo 26). *Scanning Electron Microscopy (SEM)*. University of Wyoming.
https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/SEM.html
- Tan, Y. Bin, & Lee, J. M. (2013). Graphene for supercapacitor applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 1(47), 14814–14843. <https://doi.org/10.1039/C3TA12193C>
- Twenergy. (2019, diciembre 3). *Supercondensadores: ¿qué son y cuáles son sus aplicaciones?* Eficiencia Energética. <https://twenergy.com/eficiencia-energetica/almacenamiento-de-energia/supercondensadores-que-son-aplicaciones/>
- Twidell, J. (2021). Renewable Energy Resources. En *Renewable Energy Resources* (4th ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780429452161>
- Tyner, T. (2017). Infrared Spectroscopy. En *ACS Reagent Chemicals*. American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/ACSREAGENTS.2008>
- UNESCO. (2017). *Cambio climático/WWAP*. Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos. <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/climate-change/>
- United Nations. (s/f). *¿Qué es la energía renovable?* . Recuperado el 10 de octubre de 2022, de <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-renewable-energy>
- Wang, H., Yi, H., Zhu, C., Wang, X., & Jin Fan, H. (2015). Functionalized highly porous graphitic carbon fibers for high-rate supercapacitive electrodes. *Nano Energy*, 13, 658–669. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2015.03.033>
- Wang, J., Feng, L., Tang, X., Bentley, Y., & Höök, M. (2017). The implications of fossil fuel supply constraints on climate change projections: A supply-side analysis. *Futures*, 86, 58–72. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2016.04.007>
- Wang, Z., Zhu, M., Pei, Z., Xue, Q., Li, H., Huang, Y., & Zhi, C. (2020). Polymers for supercapacitors: Boosting the development of the flexible and wearable energy storage. *Materials Science and Engineering R: Reports*, 139, 100520. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2019.100520>

- Wayu, M., Kumar, V., & Chusuei, C. C. (2021). Manganese Oxide Carbon-Based Nanocomposite in Energy Storage Applications. *Solids 2021, Vol. 2, Pages 232-248*, 2(2), 232–248. <https://doi.org/10.3390/SOLIDS2020015>
- WMO. (2021). *The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2020*. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10904
- Wolfart, F., Hryniewicz, B. M., Góes, M. S., Corrêa, C. M., Torresi, R., Minadeo, M. A. O. S., Córdoba de Torresi, S. I., Oliveira, R. D., Marchesi, L. F., & Vidotti, M. (2017). Conducting polymers revisited: applications in energy, electrochromism and molecular recognition. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 21(9), 2489–2515. <https://doi.org/10.1007/s10008-017-3556-9>
- Xu, C., Shi, L., Ji, A., Shi, X., Wang, X., & Wang, X. (2016). Synthesis and characterization of reduced graphene oxide with D-Fructose and D-Galactose as reductants. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 16(9), 9914–9918. <https://doi.org/10.1166/jnn.2016.13075>
- Yang, I., Yoo, J., Kwon, D., Choi, D., Kim, M. S., & Jung, J. C. (2020). Improvement of a commercial activated carbon for organic electric double-layer capacitors using a consecutive doping method. *Carbon*, 160, 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.01.024>
- Yao, Y., Ge, D., Yu, Y., Zhang, Y., Du, C., Ye, H., Wan, L., Chen, J., & Xie, M. (2023). Filling macro/mesoporosity of commercial activated carbon enables superior volumetric supercapacitor performances. *Microporous and Mesoporous Materials*, 350, 112446. <https://doi.org/10.1016/J.MICROMESO.2023.112446>
- Young, H. D., & Freedman, R. A. (2018). Capacitancia y dieléctricos. En R. Fuerte Rivera (Ed.), *Física Universitaria* (12a ed., pp. 816–817). 2009.
- Zhan, C., Song, J., Ren, X., Shen, Y., Wu, H., Kang, F., & Huang, Z. H. (2020). Blow-spun N-doped carbon fiber based high performance flexible lithium ion capacitors. *RSC Advances*, 10(17), 9833–9839. <https://doi.org/10.1039/c9ra10348a>
- Zhang, L., & Zhao, X. S. (2009). Carbon-based materials as supercapacitor electrodes. *Chemical Society Reviews*, 38(9), 2520–2531. <https://doi.org/10.1039/b813846j>

- Zhang, P., Xie, S., Qiu, Y., Jiao, Y., Ji, C., Li, Y., Fan, H., & Lu, X. (2018). Facile preparation of porous carbon nanomaterials for robust supercapacitors. *Journal of Materials Research*, 33(9), 1142–1154. <https://doi.org/10.1557/jmr.2017.447>
- Zhang, S., & Pan, N. (2015). Supercapacitors performance evaluation. *Advanced Energy Materials*, 5(6), 1–19. <https://doi.org/10.1002/aenm.201401401>
- Zhang, Y., Shang, Z., Shen, M., Chowdhury, S. P., Ignaszak, A., Sun, S., & Ni, Y. (2019). Cellulose Nanofibers/Reduced Graphene Oxide/Polypyrrole Aerogel Electrodes for High-Capacitance Flexible All-Solid-State Supercapacitors. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 7(13), 11175–11185. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b00321>
- Zhao, X., Li, P., Yang, S., Zhang, Q., & Luo, H. (2017). Preparation of porous carbon materials via direct carbonization of waste mineral water bottles and their super capacitive properties. *Ionics*, 23(5), 1239–1248. <https://doi.org/10.1007/s11581-016-1941-5>
- Zhong, C., Hu, W., Deng, Y., & Sun, D. (2016). Electrolytes for electrochemical supercapacitors. En *Electrolytes for Electrochemical Supercapacitors*.
- Zhuo, H., Hu, Y., Chen, Z., & Zhong, L. (2019). Cellulose carbon aerogel/PPy composites for high-performance supercapacitor. *Carbohydrate Polymers*, 215, 322–329. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.03.101>
- Zubrik, A., Matik, M., Hredzák, S., Lovás, M., Danková, Z., Kováčová, M., & Briančin, J. (2017). Preparation of chemically activated carbon from waste biomass by single-stage and two-stage pyrolysis. *Journal of Cleaner Production*, 143, 643–653. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.061>

Anexos

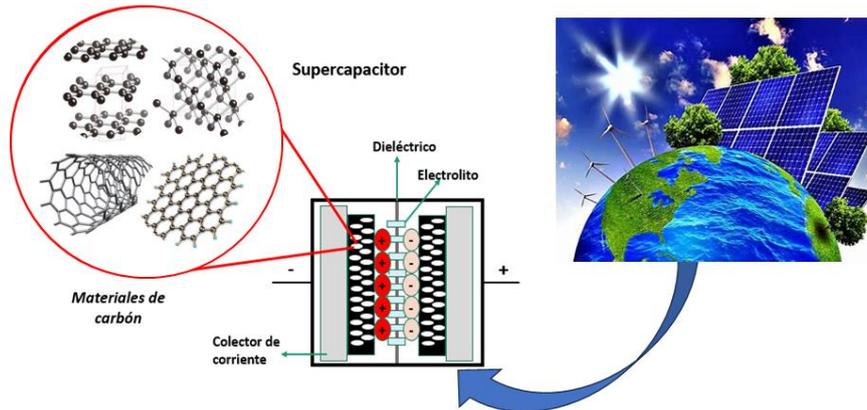
Anexo 1:	Panel Fotográfico de la sustentación.....	1
Anexo 2:	Artículo sometido, congresos y estancias.....	4

Anexo 1: Panel Fotográfico de la sustentación

Introducción

Los supercapacitores (SC), tienen características tanto de capacitores y baterías, sin que ocurra reacciones electroquímicas, por lo que el número de ciclos para carga y descarga son mucho mayores que estas.

Esquema de un supercapacitor, con electrodos de carbono poroso. Modificado de: (Baas Lopez, 2015).



Baas Lopez, J. M. (2015). Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C..

3

Introducción

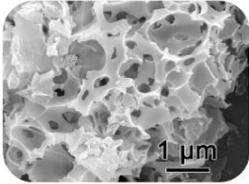


- Los carbones obtenidos a partir de biomasa **tienen bajo costo** y **gran variedad**.
- Se puede controlar su área superficial y porosidad con el método de síntesis.

4

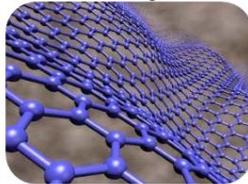
Planteamiento y formulación del problema

Imagen SEM de carbonos porosos



Fuente: Gou, G. Et al. (2020)

Estructura del grafeno

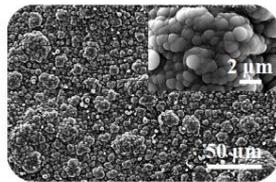


Fuente: García (2015).

+

+

Imagen SEM de ppy



Fuente: Ji, S. Et al. (2020)

¿En qué medida la modificación superficial de materiales de carbonos obtenidos a partir de fibras de algodón con óxido de grafeno reducido y polipirrol tendrá un efecto en la capacitancia?



García (2015). <https://movilidadelectrica.Com/supercondensador-grafeno/>; Gou, G. Et al. (2020). *Renew. Energy*, 149, 208–216; Ji, S. Et al. (2020). *ACS appl. Mater. Interfaces*, 12(11), 13386–13399

5

Justificación

- Se espera que la temperatura global aumente 6.4 °C entre los años 2007 y 2100 (Ahmed et al,2018)



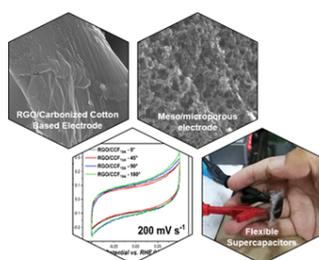
- Este cambio se da en los últimos 50 años debido al consumo de los combustibles fósiles (UNESCO, 2017)

Ahmed et al,(2018), *eur. J. Soc. Sci. Stud.*, 161–172; UNESCO (2017).

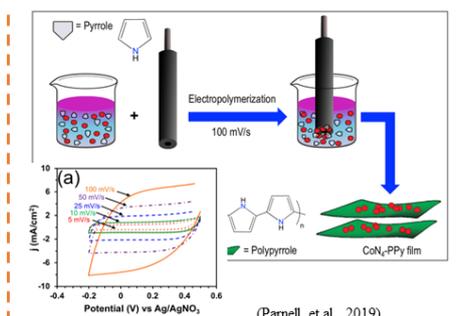
6

Estado del arte

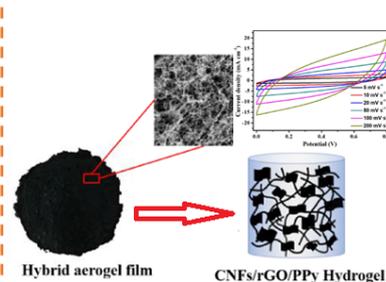
Resumen de las propiedades diversos materiales para supercapacitores.



(Bazán Aguilar et al., 2020)



(Parnell et al., 2019)



(Zhang et al., 2019)

Material	Capacitancia (F g ⁻¹)	% de retención de C - ciclos	Electrolito	Área BET (m ² g ⁻¹)	Referencia
CoN _x -PPy film	721,9	93 % - 500	HClO ₄ 0,1 mol L ⁻¹	-	(Parnell et al., 2019)
CNFs/rGO/PPy	405	95 % - 5 000	-	-	(Zhang et al., 2019)
FAC/rGO	198	97,7 %-1000	H ₂ SO ₄ 1mol L ⁻¹	1458	(Bazán Aguilar et al., 2020)

Bazán, A., (2020). ACS Omega; Parnell, C. M. et al.(2019). Sci. Rep.; Y., G. Zhang et al. (2018). Mater. Res. Bull

7

Conclusiones



23

Anexo 2: Artículo sometido, congresos y estancias

Artículo sometido

Journal of Energy Chemistry
Cotton pads-derived carbon materials/rGO modified with PPy for electrode of supercapacitors
-Manuscript Draft-

Manuscript Number:	
Article Type:	Full length article
Keywords:	Supercapacitors; cotton pads-derived carbon fibers; rGO; PPy; TD-DFT
Corresponding Author:	Angélica María Baena-Moncada, Ph.D. National University of Engineering Lima, Lima PERU
First Author:	Ofelia Arias-Pinedo, Bachelor
Order of Authors:	Ofelia Arias-Pinedo, Bachelor Elvis O. López, Ph.D. Ivonne E. Monje, Ph.D. R. Soria-Martínez, Ph.D. Antony Bazan-Aguilar, Msc. Gabriel Planes, Ph.D. Angélica María Baena-Moncada, Ph.D.
Abstract:	This study investigates the influence of electropolymerization conditions on the deposition of polypyrrole (PPy) onto cotton-derived carbon fiber (CF) modified with reduced graphene oxide (rGO). The surface modification of CF was thoroughly examined through N ₂ adsorption/desorption, SEM-EDS, Raman spectroscopy, and XPS analysis. Composite electrodes comprising CF-rGO-PPy, synthesized via electropolymerization at 25 mV s ⁻¹ , demonstrated a remarkable increase in capacitance, showcasing 732 F g ⁻¹ compared to 153 F g ⁻¹ for CF. The observed disparities in capacitance are attributed to morphological variations and the presence of positively charged nitrogen species such as polaron and bipolaron within PPy. These species significantly impact electrical conductivity, a factor analyzed through the PPy electronic structure using a TD-DFT approach. The higher capacitance observed in CF-rGO-PPy electrodes underscores the influence of morphology and charged nitrogen species on the electrochemical performance of these modified electrodes. Notably, these modified electrodes exhibited exceptional specific capacitance retention of 97% of their initial capacitance after 4000 cycles in a 1.0 mol L ⁻¹ H ₂ SO ₄ electrolyte.



Journal of Energy Chemistry
Supports open access

19.1 CiteScore | 13.1 Impact Factor

24

Congresos y estancias

26