

Estudio de viabilidad técnico-económica para el desarrollo de un dispositivo adsorbente de dióxido de carbono utilizando carbón activado obtenido a partir del desecho agroindustrial del café.

Nicolás Cote Argüello

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Mecánico

Director

Yesid Javier Rueda

Ph.D en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2019

Dedicado a:

Mi madre Claudia, por el amor recibido para avanzar a lo largo de la carrera.

Mi padre Oscar, por el esfuerzo realizado para profesionalizarme.

¡Juntos lo hemos logrado!

Agradecimientos

Al director de esta tesis, profesor Yesid Rueda, por su apoyo, guía y acompañamiento durante todo el proyecto.

A la profesora Debora Nabarlatz, por abrirme las puertas del Grupo de Investigación en Tecnologías de valorización de Residuos y Fuentes Agrícolas e industriales para la sustentabilidad Energética INTERFASE, todos los conocimientos y recursos fueron utilizados adecuadamente.

A Katherine Fernández, del grupo INTERFASE, por su tiempo, conocimiento y paciencia en la instrucción de protocolos, procesos y análisis de carbonos activados.

A Joaquín Candela, por recibirme en su finca, instruirme en los conocimientos del café, y brindarme la materia prima necesaria para este proyecto.

A Franklin, estudiante de maestría de ingeniería mecánica, por el préstamo del motor de combustión utilizado en este proyecto.

Al profesor Jorge Chacón, profesor de ingeniería mecánica y encargado del laboratorio de combustión de la escuela, por el préstamo del analizador de gases utilizado en este proyecto.

A Ferney Gutiérrez, estudiante de ingeniería mecánica, por su acompañamiento e instrucción en el protocolo del montaje experimental de la adsorción de dióxido de carbono.

Sin ustedes este proyecto hubiese sido más difícil de afrontar y concluir.

Contenido

	Pág.
Introducción	16
1. Objetivos	19
1.1 Objetivo General	19
1.2 Objetivos Específicos	19
2. Marco teórico	20
2.1 Adsorción	20
2.1.1 Proceso de adsorción.	21
2.1.2 Tipos de adsorción.	22
2.1.3 Factores que influyen en el proceso de adsorción.	22
2.1.4 Porosidad del adsorbente.	23
2.2 Equilibrio de la adsorción	23
2.2.1 Isotermas de adsorción.	24
2.3 El adsorbente: Carbón activado	27
2.3.1 Estructura física.	27
2.3.2 Estructura Química.	28
2.3.3 Preparación de carbones activados.	29
2.3.4 Tipos de activación.	30
2.3.5 Caracterización del carbón activado.	32

2.4 El adsorbato: dióxido de carbono	33
2.4.1 Generalidades y propiedades del dióxido de carbono.	33
2.4.2 Fuentes de dióxido de carbono.	33
3. Metodología experimental	35
3.1 Precursor	35
3.1.1 Caracterización de la materia prima.	37
3.2 Activación del carbón activado	37
3.2.1 Rendimiento.	40
3.2.2 Caracterización del carbón activado.	40
3.3 Diseño del dispositivo.	41
3.3.1 Formulación del problema y su posible solución.	41
3.3.2 Búsqueda de información, requerimientos y restricciones del problema.	41
3.3.3 Diseño conceptual.	42
3.3.4 Diseño en detalle.	42
3.3.5 Fabricación.	43
3.4 Capacidad de adsorción del dispositivo	43
3.4.1 Selección de variables.	43
3.4.2 Diseño experimental.	43
3.4.3 Capacidad de adsorción de CO ₂ .	44
3.5 Análisis de viabilidad	46
4. Resultados y análisis	47
4.1 Caracterización de la materia prima	47
4.1.1 Análisis próximo del precursor.	47

4.1.2 Análisis de densidades.	47
4.2 Activación del carbón activado	47
4.2.1 Rendimiento.	47
4.2.2 Caracterización del carbón activado.	48
4.2.2.1 Area Superficial BET.....	48
4.2.2.2 Volúmen total de poro.	49
4.2.2.3 Diámetro promedio de poro.	50
4.2.2.4 Isotermas de adsorción.....	52
4.3 Diseño del dispositivo	54
4.3.1 Formulación del problema y su posible solución.	54
4.3.2 Búsqueda de información, requerimientos y restricciones del problema.	54
4.3.3 Diseño conceptual.	56
4.3.3.1 Bosquejos o bocetos.....	56
4.3.3.2 Modelamiento virtual.....	58
4.3.3.3 Toma de decisiones.....	59
4.3.3.4 Propuesta seleccionada.	60
4.3.4 Diseño en detalle.	60
4.3.4.1 Dimensionamiento.	60
4.3.4.2 Materiales de fabricación.....	62
4.3.4.3 Técnicas de maquinado y/o ensamblaje.....	63
4.3.4.4 Planos de detalle.	63
4.3.5 Fabricación.	66
4.4 Capacidad de adsorción del dispositivo	67

4.5 Analisis de viabilidad	68
5. Conclusiones	70
Referencias bibliográficas	71

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Adsorativo, adsorbato y adsorbente.....	20
<i>Figura 2.</i> Etapas del proceso de adsorción.	21
<i>Figura 3.</i> Tipos de isothermas según la IUPAC.	26
<i>Figura 4.</i> Montaje experimental.	40
<i>Figura 5.</i> Área superficial BET vs relación de impregnación.	49
<i>Figura 6.</i> Volúmen total de poro vs relación de impregnación.	50
<i>Figura 7.</i> Diámetro promedio de poro vs Relación de impregnación.	51
<i>Figura 8.</i> Isotherma de adsorción de la relacion 1:1.	52
<i>Figura 9.</i> Isotherma de adsorción de la relacion 1:2.	53
<i>Figura 10.</i> Isotherma de adsorción de la relacion 1:3.	53
<i>Figura 11.</i> Boceto de propuesta 1.....	56
<i>Figura 12.</i> Boceto de propuesta 2.....	57
<i>Figura 13.</i> Boceto de propuesta 3.....	58
<i>Figura 14.</i> Modelado virtual de propuesta 1.	58
<i>Figura 15.</i> Modelado virtual de propuesta 2.	59
<i>Figura 16.</i> Modelado virtual de propuesta 3.	59
<i>Figura 17.</i> Modelado final del apoyo de tubo de escape y salida de gases.	64
<i>Figura 18.</i> Modelado final del tubo de conexión.	64

<i>Figura 19.</i> Modelado final de la jaula del carbón activado.	65
<i>Figura 20.</i> Modelado final del ensamblaje del prototipo.	65
<i>Figura 21.</i> Apoyo del tubo de escape y salida de gases.	66
<i>Figura 22.</i> Tubo de conexión.....	66
<i>Figura 23.</i> Jaula del carbón activado.....	66
<i>Figura 24.</i> Vista lateral e isométrica del prototipo ensamblado.	67

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Experimentos de adsorción de CO₂</i>	44
Tabla 2. <i>Análisis próximo de la pulpa de café</i>	47
Tabla 3. <i>Resultados análisis área superficial BET, volumen total de poro y diámetro promedio de poro</i>	48
Tabla 4. <i>Matriz QFD para selección de propuesta</i>	60
Tabla 5. <i>Resultados de la capacidad de adsorción de CO₂ del prototipo</i>	68
Tabla 6. <i>Lista de precios de los equipos, consumibles cotizaciones e implementos</i>	69

Lista de Apéndices

Los apéndices están adjuntos en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS

Apéndice A. Resultados análisis de área superficial BET, volumen total de poro y diámetro promedio de poro.

Apéndice B. Planos en detalle.

Apéndice C. Resultados del analizador de gases

Resumen

TITULO: Estudio de viabilidad técnico-económica para el desarrollo de un dispositivo adsorbente de dióxido de carbono utilizando carbón activado obtenido a partir del desecho agroindustrial del café*.

AUTOR: Nicolás Cote Arguello**

PALABRAS CLAVE: Adsorción, Carbón Activado, Pulpa De Café, Dióxido De Carbono, Cambio Climático.

DESCRIPCIÓN :

El cambio climático, debido a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), en los que se destaca el dióxido de carbono (CO₂) producto de la combustión interna de motores a gasolina y diésel, puede ser mitigado por medio de la adsorción del CO₂ desde la fuente. Por tal motivo, el presente proyecto estudia la viabilidad técnica y económica de producir carbón activado a partir del desecho agroindustrial del café, conocido como pulpa, y ácido orto-fosfórico (H₃PO₄) como agente activante. Para ello, primero se caracteriza la materia prima mediante un análisis próximo y de densidad, mientras que para el carbón activado producido se caracteriza mediante un análisis de área superficial BET (método BJH), volumen total de poro y diámetro promedio de poro. Posteriormente, se diseña y fabrica un dispositivo para alojar el carbón activado que pueda acoplarse con facilidad al motor de combustión interna seleccionado. Finalmente, se estudia la capacidad de adsorción del dispositivo acoplado al motor seleccionado con un analizador de gases de escape. Los resultados técnicos de la caracterización y el análisis de adsorción de CO₂ son estudiados junto con la contabilidad de los costos incurridos para la producción del dispositivo en donde se determina la viabilidad del proyecto.

* Proyecto de grado

** Facultad de ingenierías físico-mecánicas, escuela de ingeniería mecánica. Director: Ph. D Yesid Javier Rueda

Abstract

TITLE: Study of technical-economic viability for the development of an adsorbent device of carbon dioxide using the activated charcoal obtained from the agro-industrial waste of coffee *

AUTHOR: Nicolás Cote Arguello **

KEYWORDS: Adsorption, Activated Charcoal, Coffe Pulp, Carbon Dioxide, Climate Change.

DESCRIPTION :

Climate change, due to the emission of greenhouse gases (GHG), which highlights carbon dioxide (CO₂) product of the internal combustion of gasoline and diesel engines, can be mitigated by the adsorption of CO₂ from the source. For this reason, this project studies the technical and economic feasibility of producing activated carbon from the agroindustrial waste of coffee, known as pulp of coffe, and ortho-phosphoric acid (H₃PO₄) as an activating agent. For this, first the raw material is characterized by a proximate analysis using standard TAPPI T-15 and density analysis using standard CPDR METH12.00, while for the activated carbon produced is characterized by a BET surface area analysis (BJH method), total pore volume, average pore diameter and its equivalent adsorption-desorption isotherm using nitrogen at 77K (-192°C). Subsequently, a device is designed and manufactured to house the activated carbon that must be easily coupled to the internal combustion engine selected. Finally, the adsorption capacity of the device coupled to the selected engine is studied with an exhaust gas analyzer. The technical results of the characterization and the analysis of CO₂ adsorption are studied together with the accounting of the costs incurred for the production of the device where the project viability is determined.

* Bachelor Thesis

** Physical-mechanical faculty, mechanical engineering school. Director: Ph. D Yesid Javier Rueda

Introducción

El incremento de las emisiones y concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) a nivel global como consecuencia del uso desmedido de combustibles fósiles es uno de los responsables directos del cambio climático.

La Organización de Naciones Unidas en la convención marco de las naciones unidas (ONU, 1992) definió cambio climático como “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables”, también aclaró que las emisiones corresponden a la “liberación de gases de efecto invernadero (GEI) (...) tanto naturales como antropógenos, que absorben y reemiten radiación infrarroja” (p, 6).

Antes de la revolución industrial, la cantidad de CO₂ disuelto en la atmosfera era de aproximadamente 280 partes por millón (ppm), mientras que en los años 2011 y 2014 la cantidad fue de 379 y 400 ppm, respectivamente (Friedli, Moor, Oeschger, Siegenthaler y Stauffer, 1986). Esto significó un aumento del 35,4% en cerca de 270 años, y de un 5,5% en tan solo 2 años.

El 11 de diciembre de 2010, los países que participaron en los Acuerdos de Cancún, durante la conferencia de la ONU sobre el Cambio Climático, acordaron como meta limitar a 2°C el aumento máximo de la temperatura media de la tierra con respecto a la temperatura registrada en la época preindustrial. Sin embargo, en el 2012 la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) pronosticó que para el año 2050 la concentración media de CO₂ en el planeta sería de 81 Giga toneladas o 685 ppm. Si este escenario se consolida, la temperatura media de la tierra aumentaría entre 3 y 6°C para final de siglo, por lo que las decisiones que han

tomado los países participantes serían insuficientes para mitigar las emisiones de GEI si no se toman acciones de choque (OCDE, 2012).

El grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), en su resumen para responsables de políticas, estimó en 2014 que el 65% del CO₂ emitido a la atmósfera por actividades humanas se debe a la combustión de combustibles fósiles (carbón, gas natural y petróleo) y a procesos industriales, en donde se destaca que el transporte (vehículos de combustión interna con gasolina y/o diésel) aporta el 14% de las emisiones globales de CO₂ (IPCC, 2014). Para el caso de vehículos de combustión interna, el CO₂ y otros gases son expulsados al medio ambiente por el sistema de escape del motor y se convierten en GEI.

Como existe una relación directa entre el transporte y las emisiones de CO₂, se puede deducir que el aumento del parque automotor (que utiliza motores de combustión interna) conlleva al aumento de las emisiones de CO₂, por lo que se concluye que este fenómeno fomenta el cambio climático.

Desde hace algunos años se han desarrollado tecnologías que logran capturar GEI como el CO₂ pero estos mecanismos tradicionales suelen ser costosos y normalmente no se encuentran en el mercado nacional. Por este motivo, la tecnología no se ha logrado masificar y permite que los GEI se acumulen progresivamente en la atmósfera.

Además del aumento en la temperatura media de la tierra, el cambio climático es el responsable de alterar los patrones de lluvia, el derretimiento de glaciares que conlleva al aumento en el nivel del mar, el incremento de fenómenos de erosión y salinización en áreas costeras, el aumento en el riesgo de enfermedades respiratorias en la población, entre otros (OCDE, 2012).

Para mitigar los problemas anteriormente mencionados, es necesario capturar y almacenar el CO₂ producido durante la combustión interna en motores Otto (gasolina) y Diésel, antes de que

este ascienda a la atmosfera y se convierta en un GEI. De esta manera, es menester desarrollar un dispositivo que capture y almacene el CO₂ directamente del tubo de escape, y que a su vez sea práctico, eficiente y económico. Para esto se plantea utilizar un mecanismo más accesible y extraordinario, lo cual hace que el proyecto sea viable técnica y económicamente a nivel local.

El dispositivo aprovecha los desechos agroindustriales del café por medio de la carbonización y activación de su carbono. Este proceso convierte al carbón activado en un adsorbente de CO₂ económico, aspecto imprescindible para la masificación del dispositivo y de la solución en la mitigación directa de las emisiones de CO₂ generadas por el transporte.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar la viabilidad técnico-económica del desarrollo de un dispositivo que permita adsorber el dióxido de carbono producido por motores de combustión interna, utilizando carbón activado obtenido a partir del desecho agroindustrial del café.

1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar y activar químicamente el carbón de los desechos agroindustriales del café.
- Diseñar y construir la estructura del dispositivo que aloja el adsorbente de CO₂.
- Medir la cantidad de CO₂ adsorbido por el dispositivo.
- Analizar la viabilidad técnico-económica del dispositivo mediante el estudio de las emisiones de CO₂ absorbidas y los costos de producir el mismo.

2. Marco teórico

2.1 Adsorción

Se denomina adsorción al proceso en el que un elemento en estado gaseoso o líquido se concentra o acumula en la superficie de otro elemento que se encuentra en estado sólido (Acevedo, 2014). El elemento que adsorbe se conoce como adsorbente, mientras que el elemento adsorbido se conoce como adsorbato, a su vez, las moléculas de adsorbato provienen del seno de la mezcla de gases o solución conocida como adsortivo (Álvarez, 2016). En la figura 1 se pueden apreciar las definiciones de adsortivo, adsorbato y adsorbente:

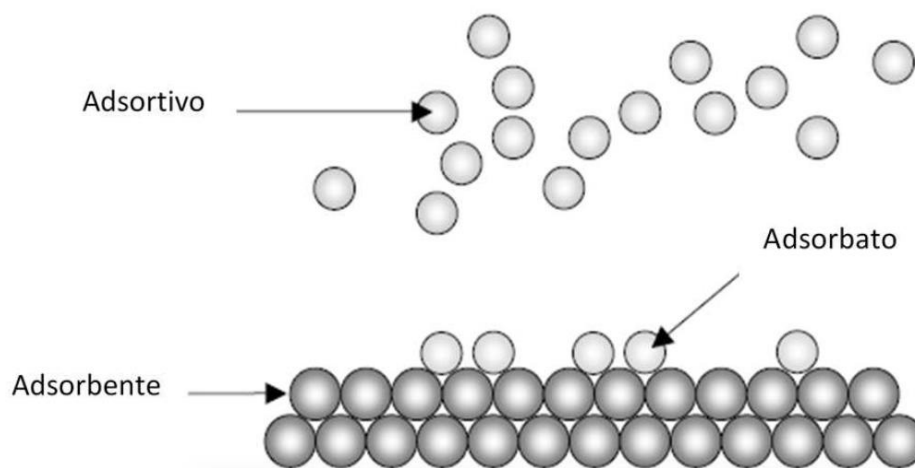


Figura 1. Adsorativo, adsorbato y adsorbente. Adaptado de: Álvarez, N. (2016). Procesos de adsorción para la captura de CO₂ en corrientes de biogás (Tesis doctoral). Recuperado de digital.csic.es/bitstream/10261/137813/1/TD_Alvarez_Noelia.pdf

2.1.1 Proceso de adsorción. Álvarez (2016) menciona que el proceso de adsorción presenta las siguientes etapas globales:

- **Etapas 1 o difusión externa:** Aproximación del adsorbato hacia la superficie externa del sólido; El adsorbato debe vencer la resistencia de la interfaz sólido-fluido y pasa a ser adsorbato.
- **Etapas 2 o difusión interna:** El adsorbato pasa de la superficie del sólido y migra a través de la red porosa del adsorbente.
- **Etapas 3 o adsorción del adsorbato:** El adsorbato se acumula en la superficie interna del adsorbente y allí termina el proceso al formar una o varias capas.

Podemos observar un esquema de las etapas de adsorción en la figura 2.

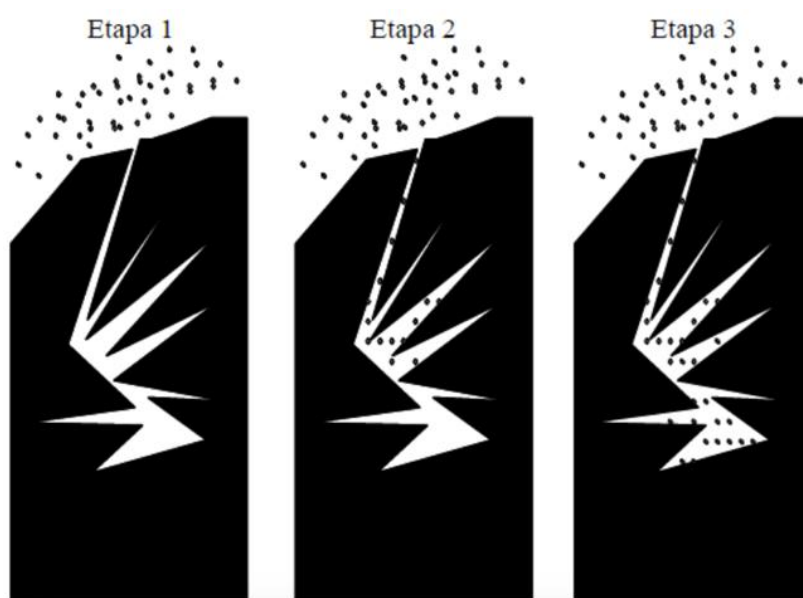


Figura 2. Etapas del proceso de adsorción. Adaptado de Álvarez, N. (2016). Procesos de adsorción para la captura de CO₂ en corrientes de biogás (Tesis doctoral). Recuperado de digital.csic.es/bitstream/10261/137813/1/TD_Alvarez_Noelia.pdf

2.1.2 Tipos de adsorción. Garcés y Coavas (2012) clasifican los tipos de adsorción de acuerdo con las fuerzas de interacción entre las moléculas de adsorbente-adsorbato, por lo que actualmente se aceptan las siguientes categorías:

- **Físicas o de fisisorción:** Cuando las fuerzas son debidas a fuerzas débiles o fuerzas de Van de Waals como interacciones tipo dipolo-dipolo. En este tipo de adsorción la molécula adsorbida no está fija en un lugar específico de la superficie, si no que está libre de trasladarse sobre la interfaz.
- **Químicas o de quimisorción:** Implica reacción química entre adsorbato-adsorbente al formar enlaces covalentes, razón por la cual se evidencia una transferencia de electrones entre ellos. En este tipo de adsorción el adsorbato forma enlaces fuertes en los centros activos del adsorbente.

2.1.3 Factores que influyen en el proceso de adsorción. Húmpola (2013) afirma que los factores que intervienen en la adsorción de gases sobre superficies sólidas son los siguientes.

- **Temperatura:** A presión constante, la adsorción de un gas sobre la superficie de un sólido disminuye con el aumento en la temperatura.
- **Presión:** A temperatura constante, la adsorción de un gas sobre la superficie de un sólido aumenta con el incremento de la presión.
- **Naturaleza y temperatura crítica del adsorbato:** La adsorción de gases distintos en un adsorbente dado se lleva a cabo de diferentes maneras. Se han encontrado que las cantidades adsorbidas son mayores cuando el gas presenta una temperatura crítica superior, lo cual se fundamenta sobre la base de que las fuerzas intermoleculares que influyen en la temperatura crítica del gas, también lo hacen en la adsorción.

- **Naturaleza y área específica de los adsorbentes:** A temperatura y presión constantes, es muy probable que el mismo gas se adsorba diferente en sólidos distintos. Cuanto mayor es el área superficial del adsorbente mayor es la cantidad de gas adsorbido.

2.1.4 Porosidad del adsorbente. La facilidad con que se desarrolle un proceso de adsorción viene dada por el tamaño molecular del adsorbtivo y la textura porosa, o tamaño del poro, del adsorbente. Acevedo (2014) hace énfasis en que el tamaño del poro está determinado por 3 características, la distancia de pared a pared, el método y las condiciones de activación.

Según la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) y como menciona Sing *et al.* (1985) los poros pueden clasificarse en 3 categorías:

- **Microporos:** El ancho de los poros es inferior a 2 nm.
- **Mesoporos:** El rango de esta categoría de poros va desde los 2nm hasta los 50nm.
- **Macroporos:** Son los poros con tamaño superior a 50nm.

Álvarez (2016) resalta que para evaluar la viabilidad de un sólido como adsorbente para una aplicación determinada se debe tener en cuenta estos factores y al mismo tiempo un fundamento termodinámico y cinético del proceso de adsorción.

2.2 Equilibrio de la adsorción

Húmpola (2013) advierte que durante el proceso de adsorción también ocurre otro proceso conocido como desorción, en el cual el adsorbato disminuye su concentración en el adsorbtivo. Por lo tanto, la velocidad de la adsorción disminuirá, mientras que la velocidad de desorción aumentará, esto se lleva a cabo hasta un punto en el que ambas velocidades se igualan, en ese

instante ya no se producirá más acumulación de adsorbato sobre la superficie y ambos procesos habrán terminado, ese momento se conoce como equilibrio de adsorción-desorción, el cual representa un equilibrio dinámico que es característico de cada sistema.

Este proceso suele representarse gráficamente como la cantidad de adsorbato adsorbido por el adsorbente por unidad de masa en función de la concentración de adsorbato en el adsorativo. Cuando el experimento se desarrolla a temperatura constante se conoce como isoterma de adsorción, mientras que si se realiza a presión constante recibe el nombre de isobara de adsorción, y finalmente, si el grado de adsorción permanece constante se llama isocora de adsorción.

En la práctica, y en el presente trabajo, se trabaja mayormente con las isotermas de adsorción, por lo que a continuación se profundiza únicamente en este tipo de representaciones.

2.2.1 Isotermas de adsorción. Acevedo (2014) afirma que la isoterma de adsorción es la relación matemática entre la masa de adsorbato adsorbido y la concentración del adsorbato en el adsorativo una vez se ha alcanzado el equilibrio dinámico a una temperatura constante. Como la temperatura se mantiene constante, la isoterma de adsorción solo depende de la presión, por esto, la representación grafica de la isoterma se interpreta como la cantidad adsorbida frente a la presión.

“Generalmente la presión se expresa en términos de presión relativa (P/P^0), donde P^0 es la presión de vapor del adsorbato a la temperatura de adsorción” (Álvarez, 2016, p. 25). Sin embargo, la forma de la isoterma de adsorción puede variar como consecuencia a la naturaleza del adsorbente (Martín, 1988).

La isoterma obtenido refleja las propiedades o características sobre las interacciones entre el adsorbato y adsorbente. La recomendación de la IUPAC es clasificar a las isotermas según su forma, en 6 categorías, basándose en los estudios de Brunauer, Deming, Deming y Teller (1940).

Se presenta un resumen de las características de cada categoría (como se citó en Acevedo, 2014) gracias a los trabajos presentados por Sing *et al* (1985), Martín (1988), Stoeckli (1990), Bansal y Goyal (2005) y Marsh y Rodriguez (2005) a continuación:

- **Tipo I o isoterma de Langmuir:** Es el caso típico de la mayoría de los carbones microporosos. Es característico de adsorción en monocapa o corresponde al llenado microporos con saturación cuando el volumen de poros disponible esté totalmente lleno. Esta isoterma es debida mayoritariamente a la existencia de quimisorción o a fisisorción si las superficies son muy homogéneas.
- **Tipo II:** Estas isothermas corresponden a procesos de adsorción con formación de una monocapa de adsorbato sobre la superficie cuando las presiones relativas son relativamente bajas. A medida que se incrementa la presión relativa se empiezan a generar multicapas sobre la superficie. Un ejemplo típico pueden ser los grafitos no porosos.
- **Tipo III:** Es característico de sólidos macroporosos o no porosos. Esta isoterma se presenta en procesos en los cuales las interacciones adsorbato-adsorbente son muy débiles y las interacciones adsorbato-adsorbato son relativamente fuertes.
- **Tipo IV:** Es característico de sólidos mesoporosos. Se advierte la presencia de un ciclo de histéresis debido a la condensación capilar de los poros. Su forma general se asemeja mucho a isothermas Tipo II por lo que se atribuye su distribución a procesos de adsorción mono y multicapa. Un ejemplo típico pueden ser los sílices y alúminas.
- **Tipo V:** Al igual que las isothermas de tipo III, se presenta afinidad poca o nula entre el adsorbente y adsorbato. Estos isothermas son poco comunes por lo que la deducción de superficies específicas, así como la determinación de la distribución de tamaño de poro son bastante difíciles.

- **Tipo VI:** Son poco comunes. Son característicos de procesos de adsorción en multicapa de los gases nobles, para este caso en específico la formación de una capa de adsorbato sobre el adsorbente contribuye en la formación de la siguiente capa, por lo que se consideran procesos cooperativos de adsorción.

La figura 3 muestra la clasificación de las isothermas y sus formas correspondientes:

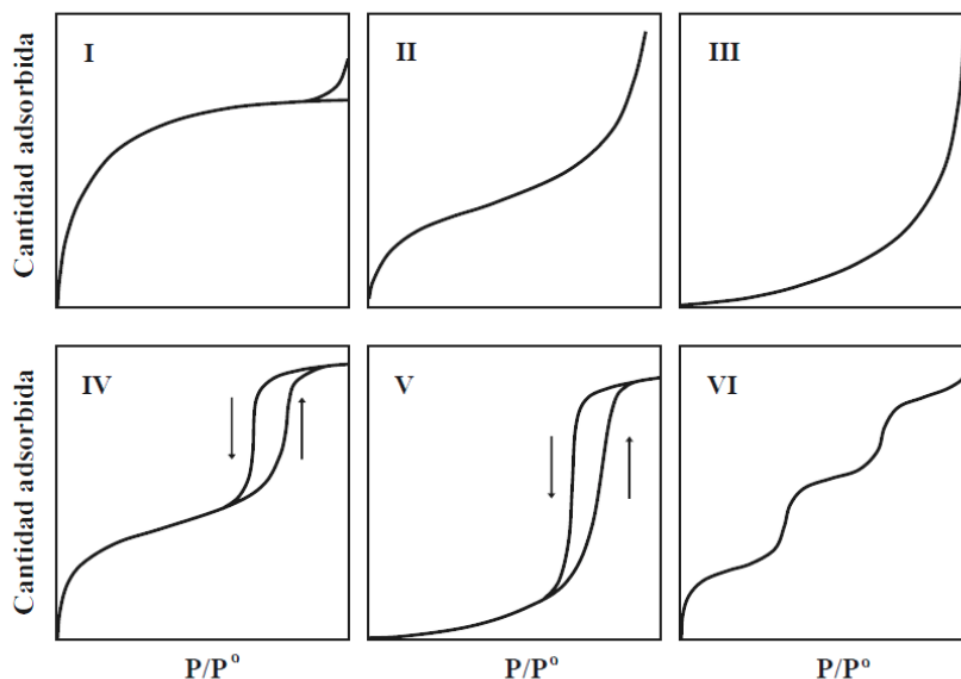


Figura 3. Tipos de isothermas según la IUPAC. Adaptado de: Sing, K. S. W., Everett, D. H., Haul, R. A. W., Pierotti, R. A., Moscou, L., Rouquerol, J. y Siemieniwska, T. (1985) Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. *Pure Appl. Chem*, 57 (4), 603-619.

2.3 El adsorbente: Carbón activado

El término carbón activado hace referencia a un material constituido fundamentalmente por carbono, que ha sido preparado artificialmente a partir de un precursor con elevado contenido de carbono mediante tratamiento térmico (carbonización) de activación, física o química, con gases u otros reactivos químicos (ZnCl₂, H₃PO₄, etc.) para elevar su grado de porosidad y su superficie interna (Bansal, Donnet y Stoeckli, 1988).

Según Acevedo (2014), los carbones activados se pueden utilizar en procesos de adsorción de moléculas desde las fases gaseosa y líquida mediante fuerzas de dispersión de Van de Waals que hacen que se produzca en dicha superficie una concentración mayor que en el adsorbtivo.

2.3.1 Estructura física. La estructura del carbón activado corresponde a la de un material no grafitizable, es decir, “carbones vegetales producto de la carbonización de materia orgánica natural que no han pasado por un estado fluido durante el proceso de carbonización” (Húmpola, 2013, p. 82). Esta estructura, según Rodríguez (1997), posee varias capas de grafeno, presenta planos hexagonales que no están bien orientados, sino desplazados unos respecto a otros y solapados entre sí, por lo cual presenta un alto porcentaje de estructura altamente desordenada.

La estructura macromolecular del precursor se mantiene durante el tratamiento térmico porque, como lo menciona Rodríguez y Sepúlveda (2001), se produce un entrecruzamiento que impide la fusión, con sólo la pérdida de pequeñas moléculas por la degradación. Ese entrecruzamiento conduce a una estructura rígida, y da lugar a una estructura porosa.

Como se mencionó anteriormente, la capacidad de adsorción de un adsorbente está determinada por el tamaño de los poros, Húmpola (2013) recomienda, para la adsorción de gases,

una estructura porosa que esté compuesta mayormente por microporos, mientras que para la adsorción de líquidos, se requiere una estructura meso y macroporosa. Un tamaño de poro adecuado debe tener entre 1 y 5 veces el diámetro de la molécula de adsorbato. Si se cumple esta condición el adsorbente adsorbería entre el 40-60% de su propia masa, es decir, un 1 kg de adsorbente acumularía 0,4-0,6 kg de adsorbato (La Chira, 2010).

2.3.2 Estructura Química. Se ha mencionado anteriormente que la adsorción se lleva a cabo gracias a las fuerzas de Van de Waals entre el adsorbato y el adsorbente, no obstante, la química superficial de un material de carbono también está determinada por el ordenamiento imperfecto de los grafenos que “provoca la aparición de valencias no saturadas y de electrones desapareados que son responsables de la gran afinidad por moléculas polares o fácilmente polarizables. Este desorden también provoca un aumento de la cantidad de heteroátomos en su superficie” (Húmpola, 2013, p. 86).

Álvarez (2016) afirma los heteroátomos de tipo O, H, N, S, B y halógenos impactan positivamente en el carbón activado de la siguiente manera:

El oxígeno como heteroátomo juega un papel importante en la superficie del carbón activado, al aumentar su polaridad y su carácter hidrófobo, además de facilitar la dispersión de la fase activa en la preparación de catalizadores y el anclaje de moléculas orgánicas. La presencia de nitrógeno como heteroátomo también aumenta la polaridad y el carácter básico de los materiales carbonosos y produce un efecto de deslocalización electrónica entre las capas grafénicas (p. 50).

Por otro lado, los átomos de carbono de los planos basales poseen orbitales π que contienen electrones más o menos deslocalizados dentro de estos planos basales (Acevedo, 2014). El mayor

o menor grado de deslocalización de los electrones π afecta directamente las interacciones del carbón con los adsorbatos (Bansal y Goyal, 2005).

Los bordes de los planos basales también juegan un papel importante en la quimisorción porque hay átomos con valencias no saturadas por lo que la concentración de electrones desapareados es grande (Húmpola, 2013).

Como se mencionó anteriormente, todos los carbones presentan en principio un carácter hidrófobo, no obstante, podemos disminuir este carácter hidrófobo al adicionar grupos superficiales polares. Esto puede conseguirse por oxidación con algún tipo de agente oxidante (Húmpola, 2013). En resumen, las propiedades químicas naturales de los carbones activados pueden mejorarse, al modificar o diseñar el método y las condiciones de activación en función de la aplicación que tendrá el carbón activado.

2.3.3 Preparación de carbones activados. A continuación, se describen las generalidades que se deben tener en cuenta para la preparación de carbones activados:

- **Material precursor:** Si bien es cierto que cualquier material que contenga carbono puede convertirse en un carbón activado, para la selección de la materia prima o precursor se debe tener en cuenta los siguientes factores: Disponibilidad y bajo costo, bajo contenido de componentes inorgánicos, alta densidad y contenido de materia volátil (Gergova, K., Petrov, N. y Eser, S., 1994).

Entre los factores mencionados, la alta densidad contribuye en la fortaleza al material final, mientras que el contenido de materia volátil permite controlar mejor el rendimiento del proceso, por lo que se le acuña un ahorro energético (Húmpola, 2013).

2.3.4 Tipos de activación. El carbón activado se puede producir de dos maneras, por activación física o activación química. A continuación, se presenta información general de cada proceso:

- **Activación física:** Este tipo de activación suele realizarse en dos etapas. En la primera etapa el material se carboniza, lo que produce un material con estructura porosa poco desarrollada, y por lo tanto ineficiente en la adsorción. Esta etapa se lleva a cabo para eliminar componentes no carbonosos que se liberan en forma de gases. En la segunda etapa, conocida como de activación, tiene lugar la gasificación del carbonizado. Para conseguir un desarrollo adecuado de la estructura porosa, la activación se debe llevar a cabo en atmósfera de vapor de agua, dióxido de carbono, aire o una mezcla de estas (Álvarez, 2016).

Este proceso debe estar controlado por la etapa de reacción (control químico), es decir, utilizar un oxidante suave (H₂O o CO₂), flujos bajos y una temperatura inferior a 900°C (Yang, T. y Lua, A. C. 2003).

Para realizar la activación con vapor de agua, generalmente esta se lleva acabo a temperaturas entre 850 y 950°C en ausencia de oxígeno. Mientras que la activación con CO₂ es más endotérmica por lo que se requieren temperaturas que oscilan entre 850°C y 1100°C (Bansal *et al*, 1988).

Aunque en la práctica la activación con vapor de agua es más extendido, y a pesar de que el uso de CO₂ para activar consume mayor energía y requiere mayor control de temperatura, este último agente activante es más adecuado si se necesita un control preciso de la porosidad (Gergova, Galushko, Petrov y Minkova, 1992).

Cabe mencionar que la activación física se puede llevar a cabo en una sola etapa, en donde el carbón activado resultante ha mostrado mejores rendimientos que el proceso tradicional y se presenta un mayor ahorro de energía.

- **Activación química:** Este tipo de activación se realiza en una sola etapa y en general el proceso, independiente del agente activante, se resumen de la siguiente manera (Martín, 1988 y Marsh y Rodriguez, 2005).

1. Molienda del material precursor.
2. Impregnación con el agente activante a temperatura ambiente.
3. Aplicación del tratamiento térmico de pirólisis en atmosfera inerte llegando primero a temperaturas desde los 100°C durante 1 hora, para posteriormente subir hasta los 700°C por un periodo adicional determinado.
4. Finalmente, el producto se deja enfriar a temperatura ambiente, se procede a lavar para retirar el exceso de agente activante y se clasifica el carbón activado resultante.

“Durante la pirólisis se produce una deshidratación del material celulósico, lo que resulta en la carbonización y aromatización del esqueleto carbonoso además de la formación de la estructura porosa tridimensional rígida del material final” (Húmpola, 2013, p. 100).

Los agentes activantes son deshidratantes que inhiben la cantidad de fase acuosa en el destilado y la formación de alquitranes. Esto último tiende a que el proceso global tenga un alto rendimiento (aproximadamente 30%). Generalmente se usa uno de los siguientes agentes de impregnación más utilizados ZnCl₂, H₃PO₄, H₂SO₄ y KOH (Húmpola, 2013).

El agente activante clásico es el cloruro de cinc, ZnCl₂, pues las ventajas de este agente son la simplicidad de uso y la buena estructura porosa (poros grandes) que induce en el carbón activado (Húmpola, 2013). “Sin embargo y debido a los problemas

medioambientales que genera el uso de cloruro de zinc, este agente activante cada vez se utiliza menos, en pro de otros como los ácidos y los hidróxidos” (Ramírez, 2013, p. 18).

En el caso de la activación con ácido fosfórico (H₃PO₄) la temperatura y los tiempos de activación son menores y aun así se producen carbones activados de características similares a los obtenidos con cloruro de zinc o hidróxido de potasio (Torné-Fernández, 2006).

En general, los carbones activados químicamente evidencian una estructura porosa tridimensional rígida bien desarrollada y son útiles en muchas aplicaciones. Es posible someter a los carbones activados químicamente a tratamientos posteriores de activación física lo que produce un aumento en la superficie específica (Húmpola, 2013).

Como se pudo evidenciar, las ventajas de la activación química sobre la activación física son las siguientes (Ramírez, 2013):

- No se requiere carbonización previa del material.
- Presenta ventajas en términos de costos energéticos debido a que la temperatura y los tiempos de activación son menores.
- Presentan un buen desarrollo de porosidad.

Por esta razón, en el presente trabajo se escoge la activación química del carbón activado y se selecciona el agente activante H₃PO₄ por lo que en la sección 3.2 se explica su procedimiento específico.

2.3.5 Caracterización del carbón activado. La caracterización del carbón activado es la etapa de mayor valor técnico dentro del proceso porque permite clasificar al producto según sus propiedades cuantitativas, con lo cual se identifica para qué puede ser usado en la práctica.

Los adsorbentes se suelen caracterizar en función de sus propiedades superficiales, como son el área específica y la polaridad (Brunauer, Emmet y Teller, 1938). En este trabajo se utiliza la adsorción física como método para determinar el área superficial específica BET del adsorbente, volumen total de poro, diámetro de poro (método BJH) y su correspondiente isoterma de adsorción-desorción de N₂ a 77K (-192°C).

2.4 El adsorbato: dióxido de carbono

2.4.1 Generalidades y propiedades del dióxido de carbono. El dióxido de carbono es, a temperatura y presión ambiente, un gas incoloro e inodoro, ligeramente ácido y no inflamable. Esta molécula está formada por un átomo de carbono unido con dos enlaces covalentes dobles a dos átomos de oxígeno por lo que su forma molecular es CO₂ (Rojas y Chacón, 2011).

A temperatura y presión ambiente, el dióxido de carbono presenta propiedades físicas tales como una densidad de 1842 g/cm³ lo cual lo hace más denso que el aire, una masa molar de 44,01 g/mol con un punto de fusión de -78°C y uno de ebullición de -57°C. Mientras que presenta unas propiedades químicas tales como acidez de 6,5 y 10,33 pKa y una solubilidad en agua de 1,45 kg/m³. El tamaño de esta molécula es de 0,2326 nm (Energy Institute, 2010).

La importancia del dióxido de carbono radica en que participa en la fotosíntesis en la conversión de la energía solar en compuestos orgánicos que proporcionan buena parte de la energía de toda la biósfera.

2.4.2 Fuentes de dióxido de carbono. Actualmente existen dos tipos de fuentes de dióxido de carbono las cuales son naturales y antropogénicas, en donde estas últimas se han incrementado

exponencialmente con el tiempo. A 2013 se destacaban las siguientes fuentes emisoras en todo el mundo (López, 2013):

- Industria termoeléctrica (con carbón): Con 4942 plantas las cuales emitían 11250 millones de toneladas de CO₂ al año.
- Industria cementera: Presenta 1175 fuentes, esta industria producían 932 millones de toneladas al año.
- Refinerías: Con 638 focos, las refinerías produjeron 798 millones de toneladas de CO₂ el año 2013.
- Industria siderúrgica: Presenta 269 plantas que generaron 646 millones de toneladas de dióxido de carbono.

Adicionalmente a estas industrias, el consumo de combustibles fósiles tales como el petróleo y el gas natural en actividades cotidianas como el transporte constituyen el 42% del total de las emisiones de carbono en el mundo (Rojas y Chacón, 2011).

Por otra parte, actividades humanas como la deforestación contribuyen en un 30% a las emisiones globales de CO₂ por la transpiración de estos al ambiente cuando son talados (Rojas y Chacón, 2011).

Por último, la ganadería y las actividades agrícolas contribuyen en un 18 y 10% con las emisiones de dióxido de carbono arrojadas al medio ambiente (Rojas y Chacón, 2011).

3. Metodología experimental

3.1 Precursor

Debido a su disponibilidad y bajo costo, en el presente trabajo se selecciona la pulpa de café como material precursor lignocelulósico, el cual está compuesto por la piel exterior que recubre al grano de café. Se presenta una breve descripción del café a continuación:

El café es el fruto procedente del árbol denominado cafeto, originario de Etiopía en África, este árbol puede llegar a crecer hasta los 8 metros (Plants of the world, 2019).

La pulpa de café representa, en base húmeda, el 43,6% del peso del fruto. Por cada millón de sacos producidos de 60 kg se generan alrededor de 192.000 toneladas de pulpa fresca el cual, si no se depositan adecuadamente, producen una contaminación anual, comparándola con orina y excretas, equivalente a la generada por una población de 868.736 habitantes (Rodríguez, 2009).

En el año 2017, Colombia produjo alrededor de 851.400 toneladas de café en 14,19 millones de sacos de 60 kg cada uno (Dinero, 2018). Esto convierte a Colombia en el tercer productor de café en el mundo después de Brasil y Vietnam, respectivamente (International Coffee Organization, ICO, 2018). Así mismo, el promedio de producción de pulpa de café en Colombia es de 2,25 Ton/Ha-año (Rodríguez, 2007).

Para tener una visión más global y realista del negocio del café y sus derivados en Colombia, se contó con la asesoría del caficultor Joaquín Candela, el cual, desde su perspectiva y experiencia, resumió las generalidades del café y su beneficio en Colombia.

El agricultor argumenta que la variedad de café que utiliza es la variedad Colombia y la variedad Castillo, esto se debe a que la variedad Colombia tiene sabor un 21% más dulce, mientras que la variedad Castillo tiene un sabor dulce del 16%. El fertilizante utilizado es el 17-6-18-2 de origen Colombiano, se aplica cuando el cafeto florea sus frutos. El nombre se debe a que está compuesto en un 17% de nitrógeno, 6% de fósforo, 18% de potasio y 2% de magnesio, boro y zinc. El agricultor reconoce que sin el fertilizante el fruto no crece adecuadamente, aun así, en el crecimiento del fruto también se adiciona 30 gr de *tag* el cual es un compuesto de fósforo y nitrógeno. El proceso de levante y maduración es de aproximadamente 6 meses, momento en el cual se puede comenzar a recolectar el grano.

Joaquín sigue el siguiente proceso en el beneficio del café: Cuando el cafeto florea, se recolectan los frutos que posteriormente son llevados a la descerezadora, la cual se encarga de separar la pulpa del grano de café. La pulpa se desecha en piscinas de deposición mientras que el grano se deposita en compartimentos para su fermentación, la cual se completa después de 12 horas. Posteriormente, el grano se lava tres veces hasta que se suelta el mucilago, y en seguida el grano es llevado a un invernadero solar para su secado durante 24 horas. Luego de este proceso, el café está listo para ser empacado y vendido.

Cada 8 años se *sorquea* o se reduce la altura de los cafetos y cada 18 o 20 años se renueva el cafetal. Según la región del país la cosecha es diaria, como lo es en Santander, mientras que en otras regiones del país la cosecha es cada 6 meses. Joaquín recoge de 30-35 cargas anuales de 120 kg cada una, lo que se traduce en aproximadamente 4 toneladas de café seco.

El proceso de descomposición de la pulpa se debe hacer en *piscinas* al aire libre. Actualmente, la pulpa no tiene ningún valor comercial y su proceso de descomposición contamina el agua, por

esta razón los caficultores tienen que cumplir la norma que los obliga a almacenarlas hasta su descomposición y les prohíbe depositarlas o arrojarlas sobre afluentes.

Como resumen, la piel o pulpa del café constituye un material abundante en Colombia y se puede conseguir sin ningún costo directamente de las fincas productoras. Por estas razones en el presente trabajo se escoge a la pulpa de café como el material precursor lignocelulósico para el carbón activado.

3.1.1 Caracterización de la materia prima. La finca de Joaquín Candela está ubicada en el municipio de Piedecuesta, Santander a 1600 msnm y a 840 hpa de presión. Se recolectaron 5 kilogramos de pulpa para caracterización y experimentación. La caracterización se basa en análisis próximo (TAPPI Standard T-15), cálculo de densidad real (CDPR METH012.00) y aparente.

3.2 Activación del carbón activado

Los experimentos de activación del carbón activado se llevan a cabo en el laboratorio 305 del Parque Tecnológico Guatiguará y para la producción se sigue el protocolo de operación establecido por el Grupo de Investigación en Tecnologías de valorización de Residuos y Fuentes Agrícolas e industriales para la sustentabilidad Energética (INTERFASE). El protocolo de operación, los implementos y equipos utilizados se mencionan a continuación:

A la biomasa recolectada se le realiza un proceso de secado de 24 horas a 110 °C en un horno de universal *Memmert VO200COOL*. De la biomasa seca se retiran 10 gr de precursor medidos con una balanza de precisión *Precisa BJ1000C* los cuales se depositan en un vaso de precipitado de 250 gr.

El vaso de precipitado se lleva hasta una campana *Frontier Esco* en donde se extraen 4.4, 8.8 y 17.6 ml de ácido orto-fosfórico H₃PO₄ (85-88%) de *AppliChem Panreac ITW companies* hacia un vaso de precipitado de 50 ml para impregnar al precursor en relación de peso 1:1, 1:2 y 1:3 respectivamente. Para impregnar la muestra se vacía el vaso de precipitado con los 10 gr de biomasa hacia una cápsula porta muestra rectangular de acero inoxidable, posteriormente se vacía el vaso de precipitado con el agente activante y se mezclan homogéneamente con ayuda de cucharas de laboratorio. El resultante se deja reposar por alrededor de 10 minutos.

Pasado el tiempo de reposo, el portamuestra se introduce a un reactor tubular que consiste de un tubo de cuarzo dentro de un horno tubular *Thermolyne Type 21100* acoplado con un controlador de temperatura *Maxthermo MC 5438*.

Por el escape de gases del horno tubular se monta una trampa de líquidos el cual consiste de un Ermenleyer de 250 ml sobre un vaso de precipitado de 1000 ml lleno con agua. Todos los experimentos se llevan a cabo en atmósfera inerte al utilizar Nitrógeno (N₂) UN 1066, el cual se encuentra en una bala *Cryogas*. Para iniciar el experimento, se abre la válvula de seguridad *Cole Parmer* hasta que el manómetro indica 14.5 psi, mientras que con un flujómetro *Sho Rate Brooks* se regula el flujo de N₂ a 100 cc/min. En este punto, y por seguridad, se hacen pruebas anti-fugas a lo largo de toda la conexión con una mezcla agua-jabón. Para asegurar atmósfera inerte se calcula el volumen de aire que debe ser desplazado por el nitrógeno y con el flujo controlado se calcula un tiempo estimado de 8 minutos que deben transcurrir hasta que inicie el calentamiento.

El horno se enciende y cumple con la siguiente programación: Una rampa de calentamiento hasta 500 °C durante 30 minutos y mantener esta temperatura constante durante 1 hora. Posteriormente, el horno se enfría hasta temperatura ambiente por convección natural hasta 70 °C,

momento en el cual se cierra la válvula de seguridad y se despresuriza el horno. Se retira el portamuestra del horno y se deja enfriar a temperatura ambiente en desecador.

Por último, se procede a lavar la muestra del exceso de agente activante, para ello se retira del portamuestra el carbón activado y se trasega hacia un vaso de precipitado de 250 ml al cual se le vierten 100 ml de agua destilada. El vaso de precipitado se coloca en una plancha de agitación magnética *IKA C MAG HS 7* durante 5 minutos a 300 RPM y 50 °C. Luego, con ayuda del phmetro *Hanna Instruments* se mide el ph inicial del carbón activado y se procede a lavar. Se realiza un montaje de vacío con kitasato y trampa de líquidos, para ello se utiliza una bomba de vacío *Welch IImvac* y un papel filtro *Microclar* al cual se agrega agua destilada. Al llegar al límite del kitasato se mide nuevamente el ph del carbón activado, este debe encontrarse en un rango de 6.5 a 7.5, de lo contrario se procede a repetir el proceso.

Una vez se llega al ph deseado, se lleva la muestra al horno de secado en donde se deja durante 4 horas, finalmente, se pesa el carbón activado resultante, se identifica y se empaca almacenándose en desecador.

En la figura 4 se puede visualizar el esquema del proceso de activación del carbón activado.

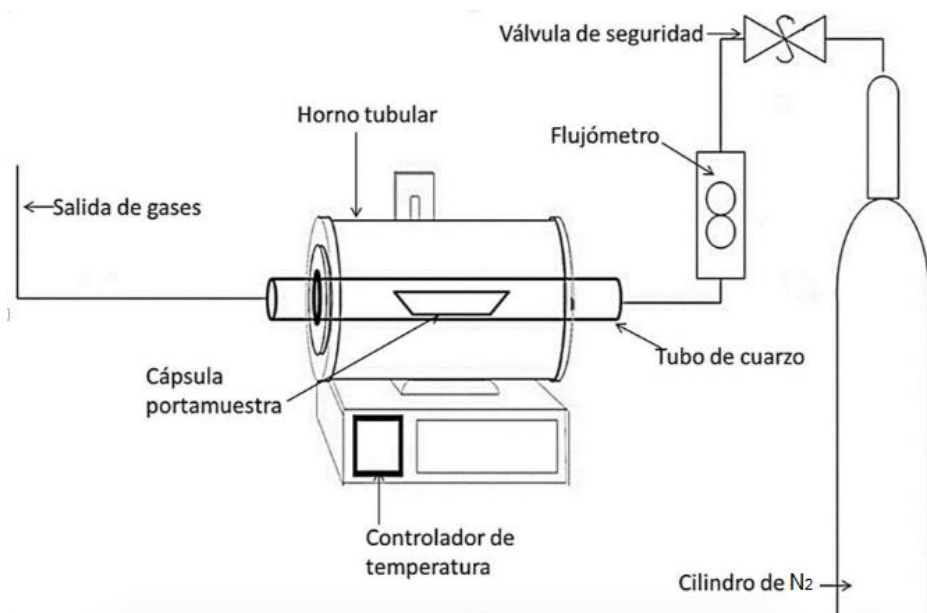


Figura 4. Montaje experimental. Adaptado de: Ramírez, O. I. (2013). Producción de carbones activados por activación química con H₃PO₄ a partir de carbón pirolítico de bagazo de caña de azúcar (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

3.2.1 Rendimiento. Para calcular el rendimiento del proceso de activación se utiliza la fórmula 1.

$$\text{Rendimiento para una etapa} \left[\% \frac{p}{p} \right] = \frac{\text{masa de CA en base seca [g]}}{\text{masa de bagazo en base seca [g]}} * 100. \quad (1)$$

En donde “masa de CA base seca” corresponde al peso registrado por la balanza después del secado de 4 horas y “masa de bagazo base seca” corresponde a 10 gr.

3.2.2 Caracterización del carbón activado. Para caracterizar el carbon activado se realiza un análisis BET, como se especificó en el apartado 2.3.5, para el cual se utiliza un equipo 3Flex de Micromeritics a cargo del Centro de Investigaciones en Catálisis, CICAT.

3.3 Diseño del dispositivo.

3.3.1 Formulación del problema y su posible solución. El proceso de diseño comienza con la definición del problema y una idea o concepto para llegar a una solución. Para plantear el problema se debe tener en cuenta que en el presente trabajo se utiliza el motor de combustion interna a gasolina de un generador *Bauker* modelo *GG2800*, y por otra parte, se tiene al carbón activado, un material carbonoso frágil compuesto por varias unidades en forma y tamaño de arena, encargado de adsorber el CO₂ del motor de combustión interna.

3.3.2 Búsqueda de información, requerimientos y restricciones del problema. Para comprender la magnitud del problema, primero es necesario revisar la literatura correspondiente al tema de interés, para este proyecto se requiere diseñar un prototipo que altera completa o parcialmente el sistema de escape de un motor, por este motivo, todos los esfuerzos deben estar encaminados a entender el funcionamiento del sistema de escape del motor de combustión interna y sus principales variables y relaciones a la hora de intervenirlo. Posteriormente, es conveniente revisar el manual del usuario del motor mencionado e identificar las especificaciones técnicas y los parámetros que puedan servir como condiciones de entrada en el proceso de diseño. Finalmente, las especificaciones y/o los parámetros que no se encuentren en la ficha técnica del motor deberán ser medidos en caso de que el proceso de diseño así lo requiera.

Con la información de partida debidamente documentada y analizada, el siguiente paso, llamado declaración de requerimientos, consiste en identificar qué características debe tener el prototipo para que este satisfaga la solución del problema. Así mismo, también se declarará qué características no pueden ser parte del diseño por ningún motivo, siendo estas últimas conocidas

como restricciones. Definir estos dos puntos es de vital importancia para el proceso de diseño, dado que su correcta o incorrecta formulación puede llevar a ideas y/o propuestas a satisfacer la solución del problema o a incurrir en un gasto innecesario de recursos que no solucionarán el problema enunciado.

3.3.3 Diseño conceptual. En este apartado se procede a utilizar el método de Brainstorming para idear todas aquellas configuraciones posibles que puedan satisfacer la solución del problema y además materializarlas a través de bosquejos o bocetos. En esta parte del proceso de diseño no es necesaria la implementación de la ingeniería propiamente dicha, no obstante, la utilización de software de diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés) es ampliamente utilizado y en la mayoría de los casos es determinante a la hora de escoger la propuesta que será desarrollada en el diseño en detalle. Cabe destacar que la rubrica más utilizada para la selección de propuestas en diseño es la holística de tipo QFD, la cual consiste en realizar una matriz en donde se evalúa cuantitativamente cada característica o requerimiento de la propuesta en un rango de 1 a 10, siendo 1 el menor resultado posible y 10 el mejor. La propuesta con el total ponderado más alto será la propuesta seleccionada para desarrollarse en detalle.

3.3.4 Diseño en detalle. Una vez seleccionada la propuesta se procede a definir las características teóricas y reales del prototipo, es decir, aplicar la teoría documentada y analizada a la propuesta por medio de cálculos ingenieriles cuyas variables de respuesta son: dimensiones, materiales, procesos y planos para fabricación. Este es un proceso iterativo que busca optimizar recursos, por tal motivo, el proceso de diseño debe estar encaminado a satisfacer todos o la mayoría de los requerimientos, al tiempo que debería evitar o mitigar las restricciones enunciadas. Es

importante mencionar que muchas veces el proceso teórico de diseño no es compatible con la realidad, por lo que el diseñador es responsable de llegar a un balance entre los cálculos y lo que se va a fabricar.

En esta etapa el uso de software CAD cobra más importancia, debido a que permite modelar las características calculadas del prototipo en tiempo real y porque es en esta clase de software en dónde se levantan los planos para fabricación aplicando la norma técnica vigente.

3.3.5 Fabricación. Para materializar el prototipo diseñado se requieren equipos y/o maquinaria necesaria para realizar los procesos y ensamblajes previstos en el diseño, por esta razón, es necesario buscar empresas en capacidad de realizar dichos procesos y seleccionar la más apropiada teniendo en cuenta las cotizaciones y tiempos de entrega del prototipo.

3.4 Capacidad de adsorción del dispositivo

3.4.1 Selección de variables. En este trabajo se evalúa la capacidad de adsorción de CO₂ del dispositivo en función de la cantidad de carbón activado que contenga el prototipo de adsorción. Para todos los experimentos se utiliza el motor mencionado anteriormente, el cual es trasladado al laboratorio de motores de ingeniería mecánica en el edificio de investigaciones del Parque Tecnológico Guatimar, en donde se realiza el experimento y se sigue el protocolo de experimentación.

3.4.2 Diseño experimental. Para el diseño de experimentos se hace una prueba inicial con réplica, que mide las emisiones de gases actuales del motor, y 3 pruebas con el prototipo conectado

al motor con réplica para un total de 8 mediciones. La variable de respuesta es la cantidad de CO₂ adsorbido. En la tabla 1 se presenta la relacion de los experimentos a realizar.

Tabla 1.

Experimentos de adsorción de CO₂.

Prueba	Precursor	Cantidad de carbón activado [gr]
CAC0	No aplica	0
CAC0r	No aplica	0
CAC1	Biochar	5
CAC1r	Biochar	5
CAC2	Biochar	10
CAC2r	Biochar	10
CAC3	Biochar	15
CAC3r	Biochar	15

3.4.3 Capacidad de adsorción de CO₂. El dispositivo se somete al siguiente experimento para determinar si la cantidad de carbón activado en el prototipo influye en la capacidad de adsorción de CO₂. Para ello, se utiliza un prototipo, diseñado y fabricado en la sección 3.3, que es reutilizado en todas las pruebas relacionadas e identificadas en la tabla 1.

Para el experimento y las mediciones de gases se cuenta con el analizador de gases de escape de la marca *Brain Bee Automotive* a cargo del laboratorio de motores de ingeniería mecánica.

Se establece el protocolo de experimentación como sigue:

1. Vestir la indumentaria de seguridad adecuada para la prueba que consiste de: Bata, guantes para altas temperaturas, gafas de seguridad, jean o pantalón y zapato cerrado.
2. Encender el motor sin carga. Esperar 5 minutos hasta que el motor se estabilice.

3. Encender el analizador de gases y realizar las pruebas de funcionamiento pertinentes. El equipo empieza a medir las condiciones ambientales y a registrar datos iniciales.
4. Realizar una medición de gases de escape con el equipo, para ello hay que insertar la sonda en el tubo de escape y tomar nota del resultado en la tabla 1 al final de la fila CAC0. Después de 2 minutos, realizar una réplica y tomar nota del resultado en CAC0r. Dar nombre al archivo generado por el programa y guardar en una carpeta específica.
5. Conectar el prototipo con la muestra de 5 gramos al tubo de escape del motor y realizar una medición. Se toma nota del resultado en CAC1. Dar nombre al archivo generado por el programa y guardar en una carpeta específica.
6. Desconectar el prototipo con la muestra CAC1. Se intercambia la muestra CAC1 por CAC1r y se conecta al tubo de escape del motor. Se toma nota del resultado en CAC1r. Dar nombre al archivo generado por el programa y guardar en una carpeta específica.
7. Desconectar el prototipo con la muestra CAC1r. Se intercambia la muestra CAC1r por CAC2 y se conecta al tubo de escape del motor. Se toma nota del resultado en CAC2. Dar nombre al archivo generado por el programa y guardar en una carpeta específica.
8. Desconectar el prototipo con la muestra CAC2. Se intercambia la muestra CAC2 por CAC2r y se conecta al tubo de escape del motor. Se toma nota del resultado en CAC2r. Dar nombre al archivo generado por el programa y guardar en una carpeta específica.
9. Desconectar el prototipo con la muestra CAC2r. Se intercambia la muestra CAC2r por CAC3 y se conecta al tubo de escape del motor. Se toma nota del resultado en CAC3. Dar nombre al archivo generado por el programa y guardar en una carpeta específica.

10. Desconectar el prototipo con la muestra CAC3. Se intercambia la muestra CAC3 por CAC3r y se conecta al tubo de escape del motor. Se toma nota del resultado en CAC3r. Dar nombre al archivo generado por el programa y guardar en una carpeta específica.
11. Desconectar el prototipo con la muestra CAC3r, retirar la sonda y apagar el motor.

3.5 Analisis de viabilidad

En este apartado se relacionan los equipos, consumibles, cotizaciones e implementos con los costos asociados a la fabricación del carbón activado y el prototipo. Añadir esta información al proyecto tiene como propósito determinar si es viable técnica y financieramente este método para la mitigación del calentamiento global con la adsorción del CO₂ antes de que este se convierta en GEI. También se busca informar al lector acerca de los recursos necesarios para investigar y fabricar carbones activados a partir de biomasa para adsorción de gases.

Cabe mencionar que en este proyecto no se incurre en todos los costos, debido a que, como estudiante en trabajo de grado investigativo no cofinanciado, el uso de los laboratorios, equipos, consumibles e implementos corre por cuenta de la universidad, mientras que los costos en los que sí se incurrieron sí serán declarados.

4. Resultados y análisis

4.1 Caracterización de la materia prima

4.1.1 Análisis próximo del precursor. A continuación, en la tabla 2, se presentan los resultados del análisis próximo del precursor (Norma TAPPI Standard T-15).

Tabla 2.

Análisis próximo de la pulpa de café.

Análisis próximo de la pulpa de café.	
Parámetros	Valor (%p)
Humedad	79.15 %
Carbón fijo + volátiles (en base seca)	79.13 %
Cenizas	20.87 %

4.1.2 Análisis de densidades. Para el precursor, la densidad real es de 1236.33 kg/m³ mientras que la densidad aparente es de 347.76 kg/m³.

4.2 Activación del carbón activado

4.2.1 Rendimiento. El rendimiento del proceso de activación del carbón activado, utilizando la fórmula 1 presentada en la sección 3.2.1, es del 45.05%.

4.2.2 Caracterización del carbón activado. La tabla 3 muestra los resultados del análisis BET hecho a los carbones activados producidos en diferentes proporciones de agente activante, el informe del análisis se anexa en el apéndice A.

Tabla 3.

Resultados análisis área superficial BET, volumen total de poro y diámetro promedio de poro.

	Relación de impregnación	Área Superficial BET (m ² /g)	Volúmen total de poro (cm ³ /g)	Diámetro promedio de poro (nm)
Carbón activado	1:1	780.87	0,496	5,62
Carbón activado	1:2	1147.55	0,876	5,42
Carbón activado	1:3	1187.81	1,023	5,39

4.2.2.1 Área Superficial BET. Revisando los resultados en la tabla 3 se observa que la relación de impregnación 1:1 produce un desarrollo en el área superficial de 780.87 m²/g, mientras que la relación de impregnación 1:2 produce 1147.55 m²/g de área superficial, lo que se traduce en un aumento del 47% entre una relación de impregnación y la otra, lo cual se ajusta a la teoría expuesta en el marco teórico. Sin embargo, se puede apreciar que este comportamiento reduce su tasa de crecimiento al pasar de un área superficial de 1147.55 m²/g en la relación de impregnación 1:2 a 1187.81 m²/g en la relación de impregnación 1:3, por lo que se da un aumento del 3.5%. El comportamiento del área superficial versus la relación de impregnación se puede apreciar mejor en la figura 5:

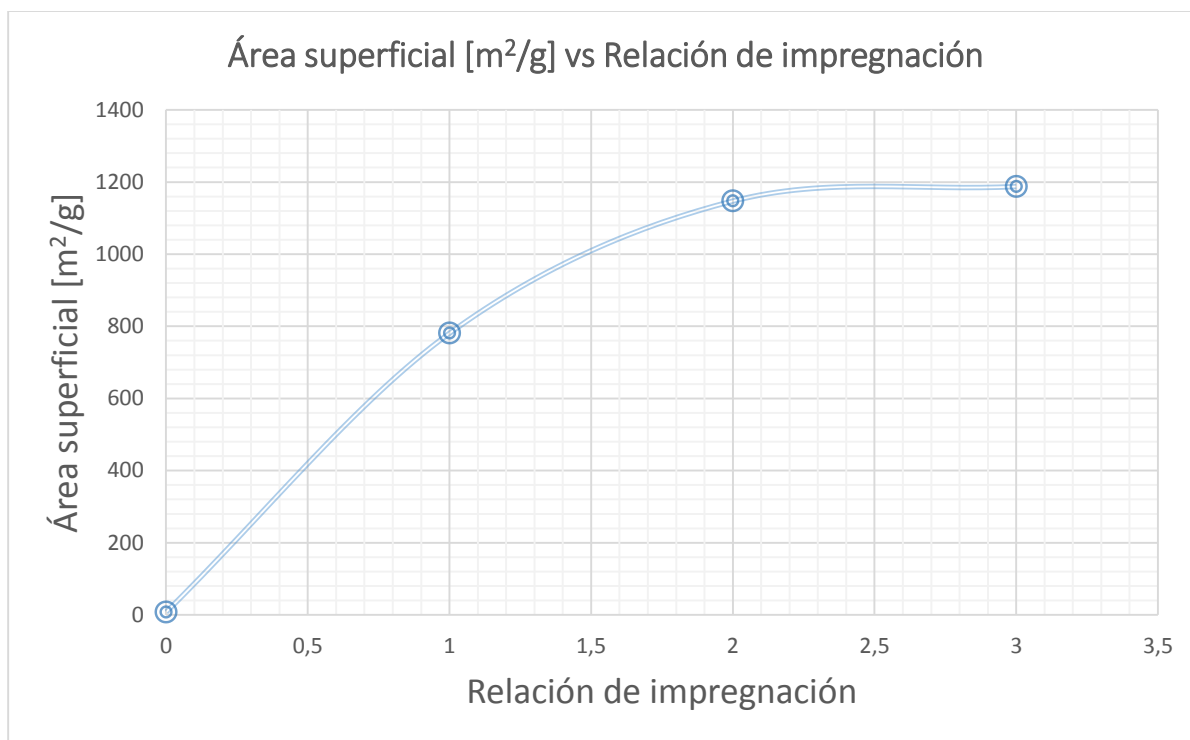


Figura 5. Área superficial BET vs relación de impregnación.

Este comportamiento corresponde a un crecimiento de tipo logístico. En otras palabras, a mayor relación de impregnación mayor será el área superficial BET, no obstante, el área superficial estará limitado por una asintota que, según los datos obtenidos y la figura 5, para el carbón activado a partir de pulpa de café se ubica alrededor de 1200 m²/g.

4.2.2.2 Volúmen total de poro. Según los datos de la tabla 3, y siguiendo el comportamiento del área superficial BET, el volúmen total de poro presenta un comportamiento creciente. Para la relación de impregnación 1:1 el volúmen total de poro fue de 0.496 cm³/g, mientras que para la relación de impregnación 1:2 fue de 0.876 cm³/g, lo cual significó un aumento del 76.7%. Sin embargo, entre el volúmen total de poro de la relación de impregnación 1:2 correspondiente a 0.876 cm³/g y el volúmen total de poro correspondiente a la relación de impregnación 1:3

correspondiente a 1.023 cm³/g se presenta un aumento del 16.8%. El comportamiento del volumen total de poro versus la relación de impregnación se puede apreciar mejor en la figura 6:

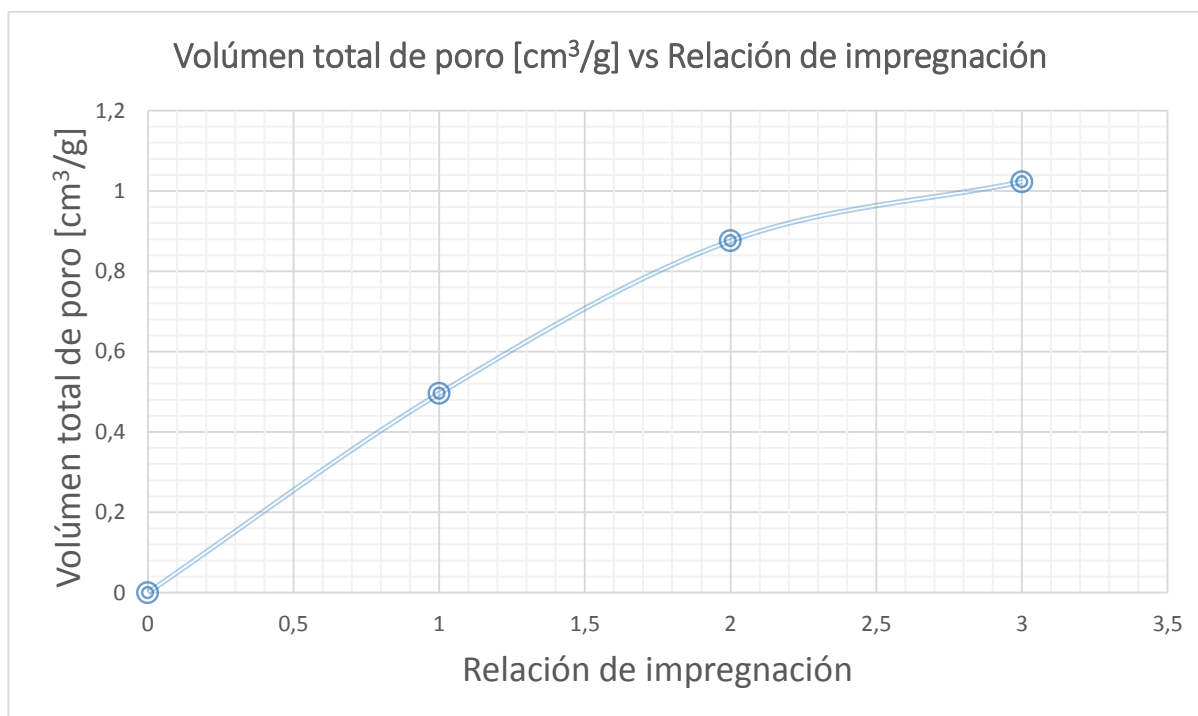


Figura 6. Volúmen total de poro vs relación de impregnación.

Como se puede apreciar en la figura 6, el comportamiento asociado al volúmen total de poro en función de la relación de impregnación también es de tipo logístico. A pesar de ello, en este caso no es tan evidente el volúmen total de poro máximo que pueda alcanzar el carbón activado, ya que la curva que se forma entre la relación de impregnación 1:2 y 1:3 no es totalmente plana y se podría esperar un aumento mas allá de la relación de impregnación 1:3.

4.2.2.3 Diámetro promedio de poro. Revisando los resultados consignados en la tabla 3, en este caso el diámetro promedio de poro reduce su tamaño a mayor relación de impregnación, pasando de 5.62 nm en la relación de impregnación 1:1 a 5.42 nm en la relación de impregnación

1:2 y a 5.39 nm en la relación de impregnación 1:3, obteniendo una disminución del 3,5% entre las primeras dos relaciones de impregnación y 0.5% entre las dos últimas. El comportamiento del diámetro promedio de poro versus la relación de impregnación se puede apreciar mejor en la figura 7.

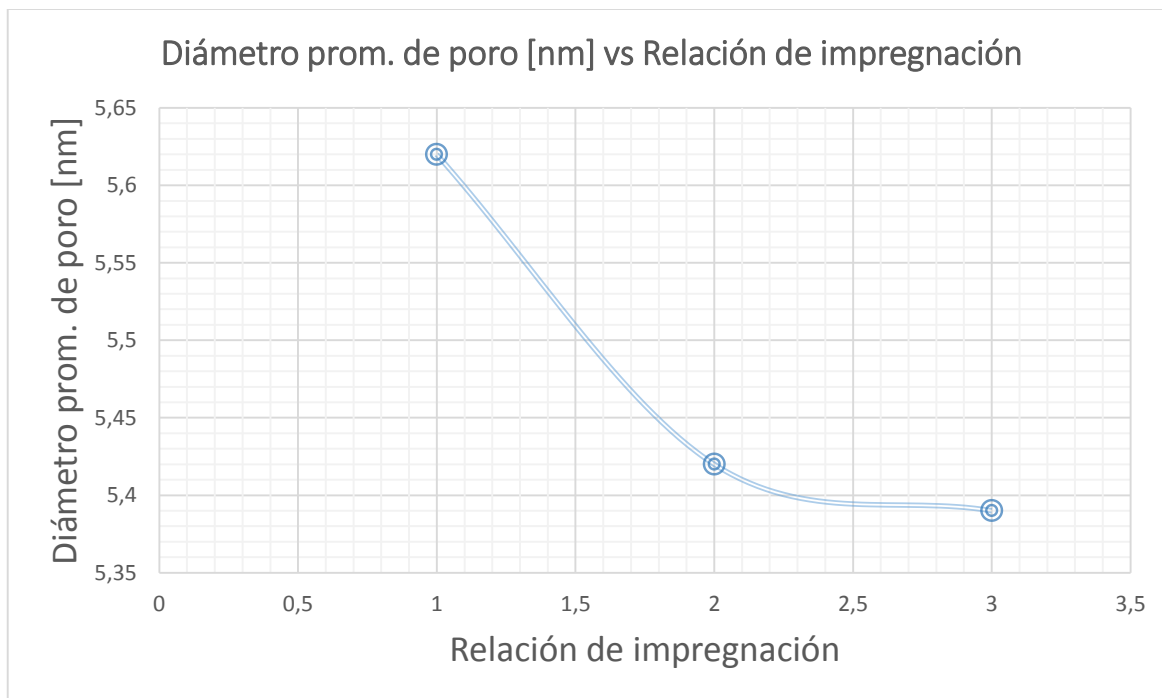


Figura 7. Diámetro promedio de poro vs Relación de impregnación.

Se puede deducir que las reducciones de diámetro promedio no son significativas puesto que para las tres relaciones de impregnación los carbones activados se clasifican como carbones mesoporosos. Esto es de vital importancia porque, como se describió en la sección 2.4.1, el diámetro de la molécula de CO₂ es de 0,2326 nm, en otras palabras, el diámetro promedio de poro del carbón activado es 23 veces el tamaño de la molécula de CO₂, lo cual puede ser un inconveniente al permitir que moléculas de mayor tamaño también se vean atraídas al adsorbato y se adsorban antes que el CO₂.

4.2.2.4 Isotermas de adsorción. Las figuras 8, 9, y 10 contienen las isotermas de adsorción de N₂ a 77 K resultantes de las tres relaciones de impregnación.

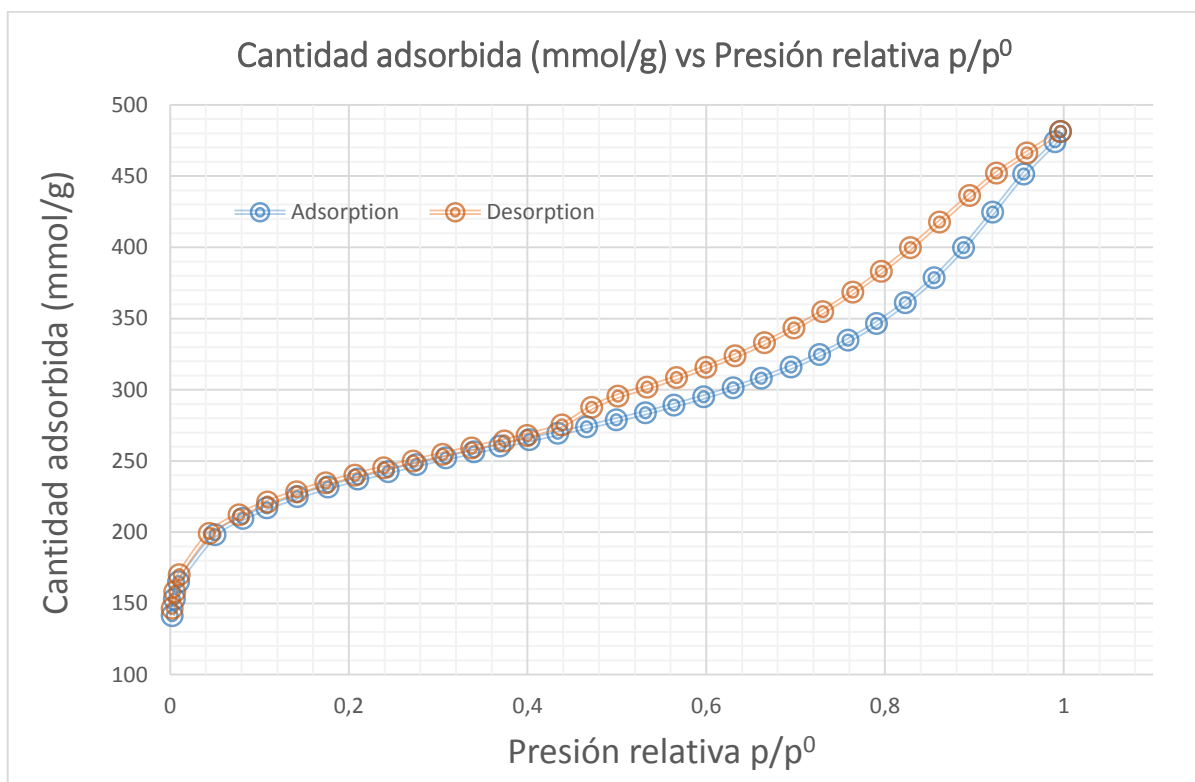


Figura 8. Isoterma de adsorción de la relación 1:1.

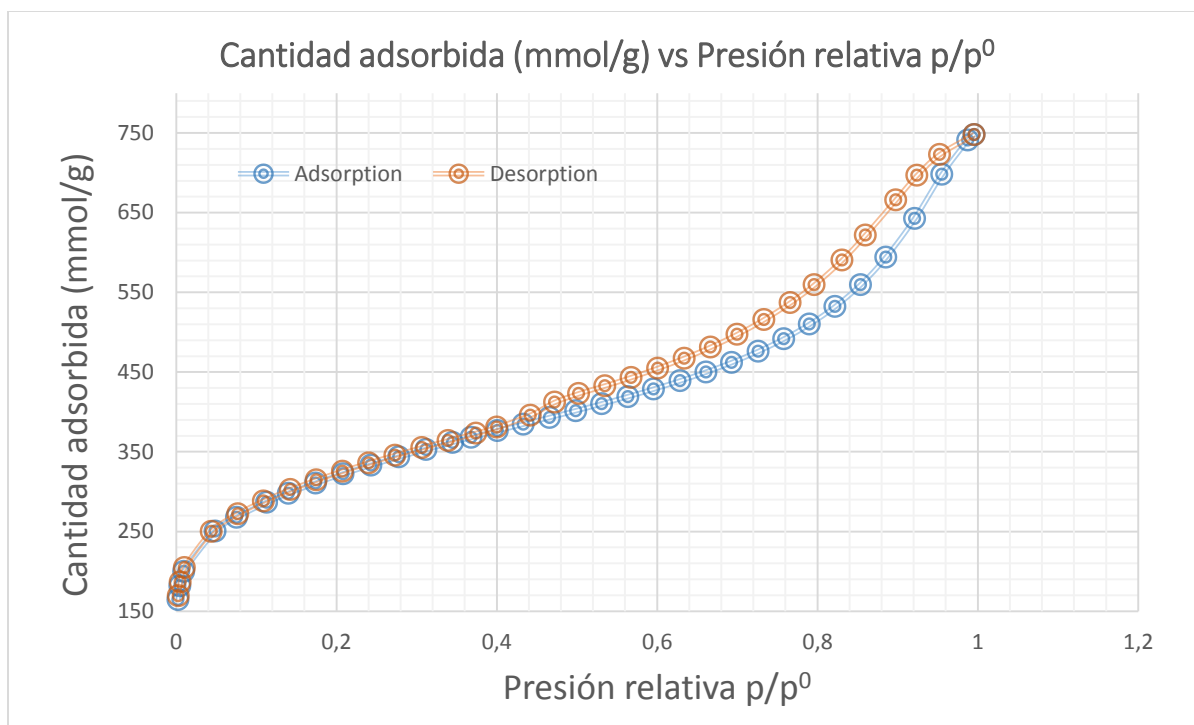


Figura 9. Isotherma de adsorción de la relacion 1:2.

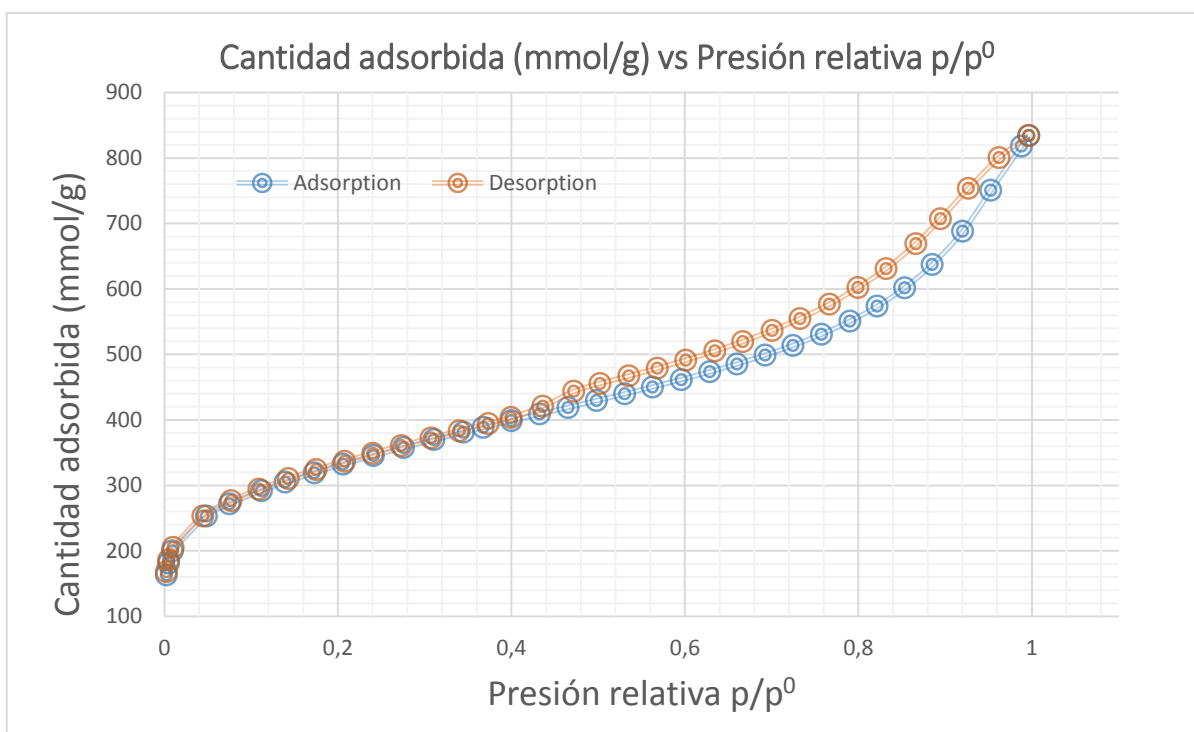


Figura 10. Isotherma de adsorción de la relacion 1:3.

Analizando las figuras 8, 9 y 10 independientemente de la relación de impregnación, las isothermas de los carbones producidos se clasifican como de tipo IV. Es decir, isothermas propios de carbones mesoporosos cuya principal característica es un ciclo de histéresis

4.3 Diseño del dispositivo

4.3.1 Formulación del problema y su posible solución. El problema consiste en hacer que el carbón activado pueda adsorber el CO₂ directamente del tubo de escape. De esta manera, la posible solución es diseñar y fabricar un tubo que permita acoplarse y desacoplarse al sistema de escape actual del motor y a su vez pueda alojar al carbón activado de manera segura.

4.3.2 Búsqueda de información, requerimientos y restricciones del problema. Para entender el funcionamiento del sistema de escape de un motor de combustión interna primero se revisa la bibliografía pertinente, en esta bibliografía se exponen los conceptos teóricos y técnicos para el diseño de sistemas de escape, sin embargo dichos documentos no se adjuntan en este proyecto debido a la extensión de los mismos, salvo los apartes necesarios que serán debidamente citados cuando se requiera. Posteriormente, se recurre al manual de usuario del generador en donde se destacan las siguientes especificaciones y parámetros del motor:

1. Tipo de motor: Otto de 4 tiempos.
2. Tipo de combustible: Gasolina.
3. Número de pistones: 1.
4. Diámetro y recorrido del pistón: 68x54 mm.

Finalmente, las dimensiones del tubo de escape del motor son:

1. Diámetro externo: 24.86 mm (0.977 in).
2. Diámetro interno: 21.69 mm (0.841 in).
3. Longitud: 26.78 mm (1.068 in).

Por otra parte, para las las especificaciones del prototipo se debe tener en cuenta que:

- Sea práctico, es decir, se pueda acoplar y desacoplar con facilidad.
- Permita que el carbón activado permanezca en su lugar para que este pueda adsorber el CO₂ de forma continua, sin pérdidas de material.
- Sea reutilizable, es decir, debe ser desacoplado para retirar el carbón activado saturado de CO₂ y posteriormente acoplado con nuevo carbón activado para continuar con la adsorción.
- Sea seguro, es decir, no genere laceraciones o heridas al ser manipulado.
- No requiera mantenimiento o mantenimiento mínimo.
- Sea capaz de soportar las altas temperaturas de los gases de escape.

Así mismo, el dispositivo no debería:

- Sobredimensionarse, pues debe ajustarse al tubo de escape actual.
- Ser pesado, debido a que su único apoyo es el tubo de escape actual.

A pesar de que el dispositivo introduce una resistencia adicional al sistema de escape del motor, en el presente proyecto no se evalúan los efectos ocasionados por el dispositivo sobre las prestaciones del motor.

4.3.3 Diseño conceptual.

4.3.3.1 Bosquejos o bocetos. Se presentan las siguientes propuestas:

1. Propuesta 1: Consta de dos tubos conectados por rosca macho-hembra. Uno de los tubos trabaja como jaula y contiene el carbón activado, a este tubo se sueldan dos mallas de tipo zaranda que permiten el flujo libre de los gases de escape y retienen el carbón activado. En la figura 11 se puede observar el boceto de la propuesta 1, cuyas medidas están en mm.

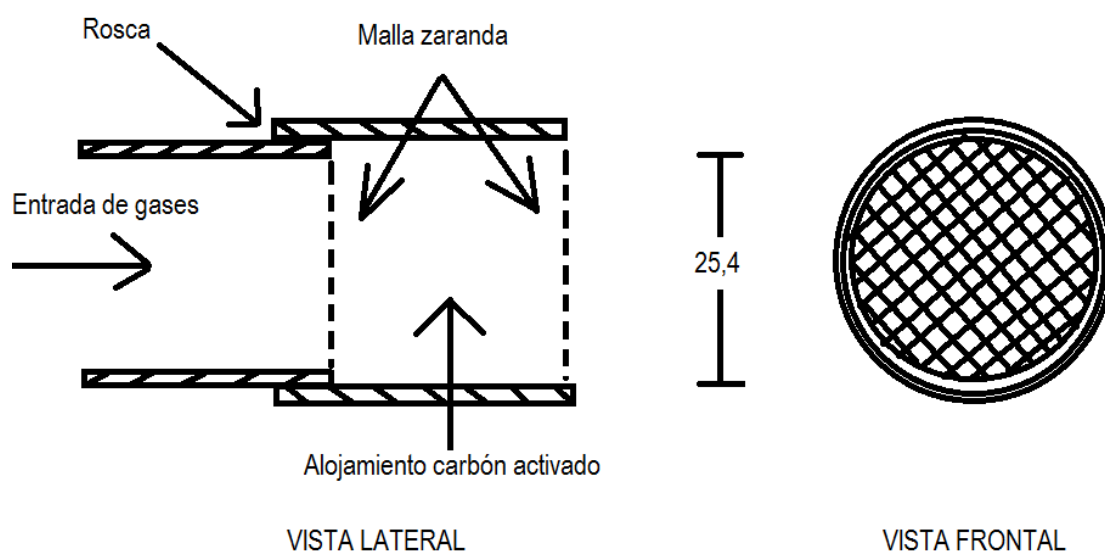


Figura 11. Boceto de propuesta 1.

2. Propuesta 2: Consta de tres tubos, dos de ellos conectados por rosca, mientras que el tercero está apoyado en varillas soldadas al tubo más grande. El tercer tubo trabaja como jaula y contiene el carbón activado siempre en el centro geométrico, a este tubo se sueldan dos mallas de tipo zaranda que permiten el flujo libre de los gases de escape y retienen el carbón activado. En la figura 12 se puede observar el boceto de la propuesta 2, cuyas medidas están en mm.

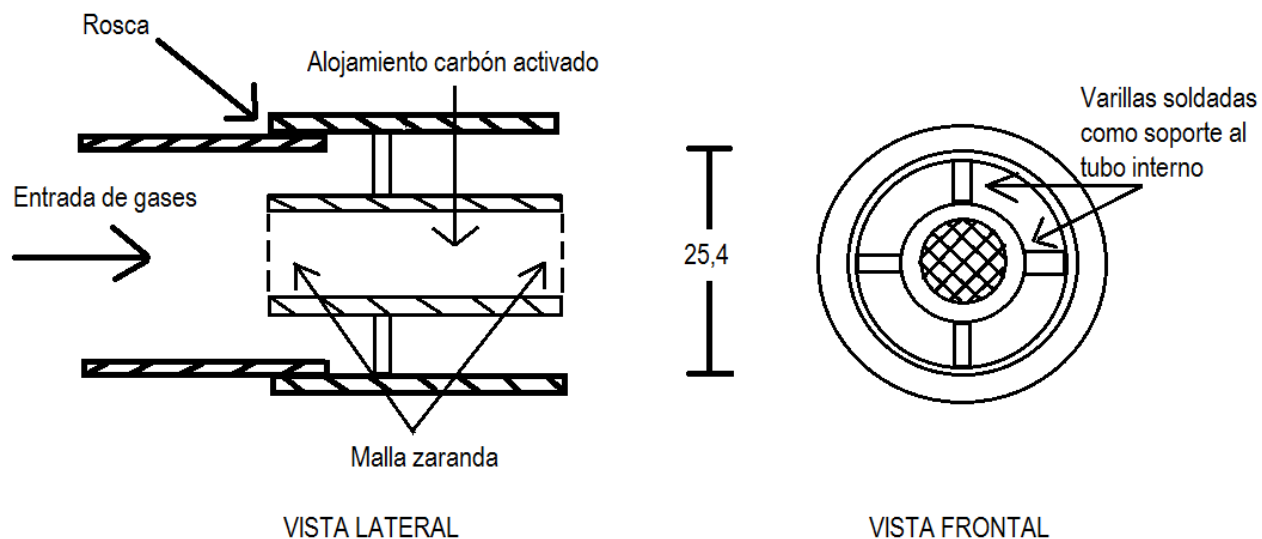


Figura 12. Boceto de propuesta 2.

3. Propuesta 3: Construido con 3 tubos, dos de 1 pulgada con rosca macho y una junta universal de mayor diametro para sostener y unir el conjunto. En medio se encuentra una malla zaranda enrollada en forma de cilindro, con tapas en sus extremos que hace de carcel del carbón activado. La malla y sus tapas es soldada y se sostiene gracias a la presión ejercida por los tubos roscados. En la figura 13 se puede observar el boceto de la propuesta 3, cuyas medidas están en mm.

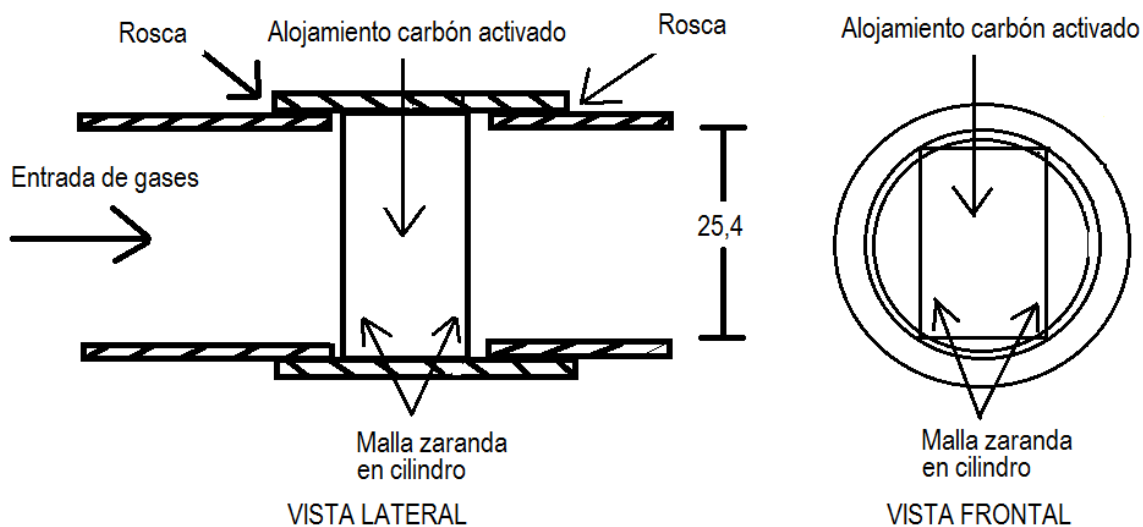


Figura 13. Boceto de propuesta 3.

4.3.3.2 Modelamiento virtual. Se utiliza el programa de diseño CAD SolidWorks 2015 para evaluar las características principales de las propuestas.

1. Propuesta 1: En la figura 14 se puede apreciar el modelado de la propuesta 1.

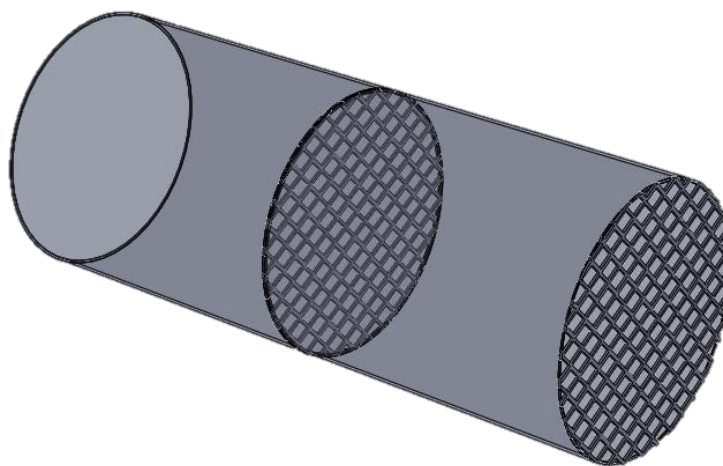


Figura 14. Modelado virtual de propuesta 1.

2. Propuesta 2: En la figura 15 se puede apreciar el modelado de la propuesta 2.

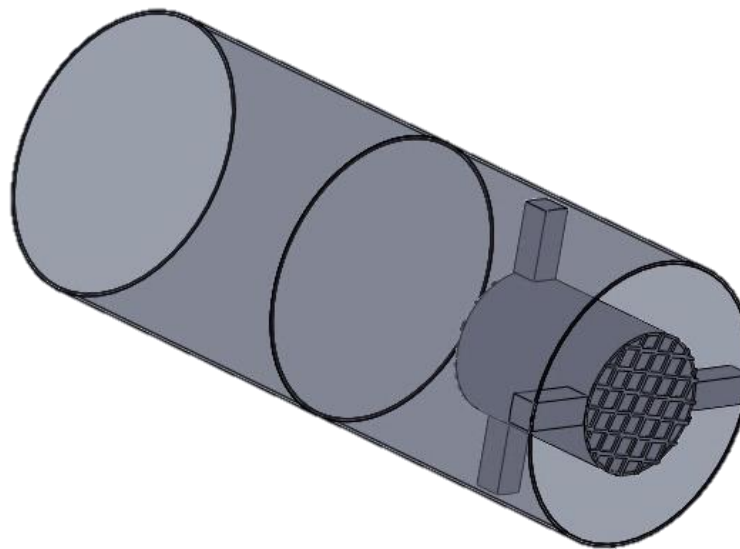


Figura 15. Modelado virtual de propuesta 2.

3. Propuesta 3: En la figura 16 se puede apreciar el modelado de la propuesta 3.

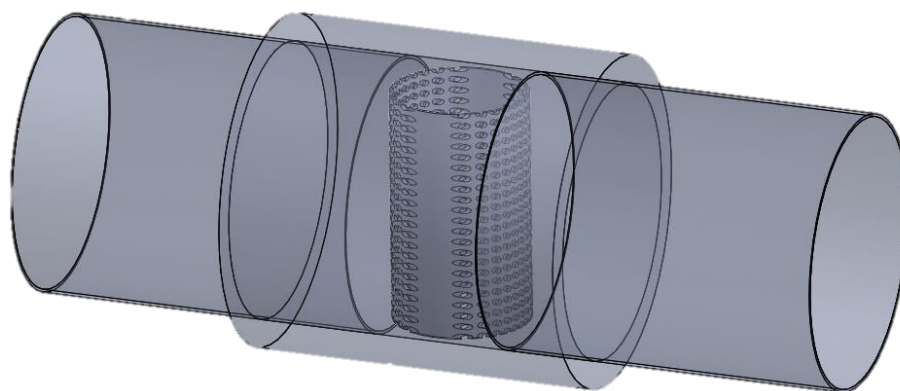


Figura 16. Modelado virtual de propuesta 3.

4.3.3.3 Toma de decisiones. Se presenta la tabla 4 con la matriz tipo QFD en donde:

A. Prácticidad. B. Estabilidad. C. Reutilizable. D. Seguridad. E. Resistencia altas temperaturas. F. Mantenibilidad. G. Dimensionamiento. H. Peso.

Tabla 4.

Matriz QFD para selección de propuesta.

Item	A	B	C	D	E	F	G	H	Total
Propuesta 1	6	2	4	6	4	7	9	7	45
Propuesta 2	4	8	6	8	4	5	7	5	47
Propuesta 3	5	7	8	6	6	9	5	4	54

4.3.3.4 Propuesta seleccionada. Según la información de la tabla 4, la propuesta con mayor ponderación y por ende la propuesta seleccionada para desarrollarse en detalle es la 3.

4.3.4 Diseño en detalle.

4.3.4.1 Dimensionamiento. Para el diseño del prototipo es necesario profundizar y comprender el proceso de diseño del sistema de escape de un motor de combustión interna. Las variables más importantes en este proceso de diseño son el diámetro, la longitud y el espesor del tubo, sin embargo, se debe tener en cuenta que estas variables son más o menos importantes dentro del sistema, ya que dependen de la etapa en donde se encuentren. Según lo anterior, el sistema de escape se compone de tres etapas, la primera, que comienza en la cámara de combustión del motor y va hasta el final de los colectores, la segunda, que va desde el fin de los colectores hasta el silenciador, y por último la tercera etapa, que comienza en el silenciador y va hasta el ambiente.

El presente proyecto modifica solo la tercera etapa del sistema de escape del motor al conectar el prototipo con el carbón activado. Por esta razón, únicamente se evalúan las implicaciones que tiene la tercera etapa del sistema dentro del sistema de escape en general.

Según Romero (2016) un aumento en el diámetro del tubo de escape de la tercera etapa no es relevante a la hora del diseño de un sistema de escape. Aumentar el diámetro del tubo de escape no influye ni en la potencia del motor ni en el torque del mismo, por esta razón, se toma el diámetro comercial más pequeño que coincida con el diámetro actual del tubo de escape del motor, el cual es de 24.86 mm o 0.977 in.

El mismo estudio (Romero, 2016) menciona que el aumento de la longitud del tubo de escape en la tercera etapa presenta variaciones ínfimas en la potencia del motor solo para revoluciones por encima de los 8000 RPM, pero como se mencionó anteriormente, el motor seleccionado para este trabajo solo opera, en condiciones normales de operación, hasta los 3600 RPM, por lo que las variaciones en la longitud del tubo no afectarán la potencia del motor en el rango de trabajo habitual del mismo. Para el torque, la eficiencia de barrido, la eficiencia de carga, el porcentaje de gas residual y la eficiencia volumétrica, un aumento en la longitud del tubo de escape en la tercera etapa sí influye para el rango de operación de 2000 RPM hasta 3500 RPM. En el caso del torque, este es mayor hasta un 5%, aproximadamente, con longitudes de 400, 500, 600, 700 y 800 mm en comparación con las longitudes iniciales del estudio que eran de 100 y 200 mm. Para la eficiencia de barrido, eficiencia de carga y la eficiencia volumétrica el aumento es de hasta 1%, 0.05%, y 0.03% respectivamente en longitudes mayores, mientras que el porcentaje de gas residual disminuye hasta 1% en el rango especificado con mayores longitudes. Después de 3500 RPM las variaciones son insignificativas o nulas.

Romero (2016) destaca que estos resultados se deben a que una mayor longitud del tubo de escape en la tercera etapa genera una mejor onda de reflexión que reduce los residuales en el cilindro, por lo que se consiguen mejores resultados operacionales en ese rango de revoluciones. Por lo mencionado anteriormente, y con una longitud del tubo de escape del motor actual desde el silenciador hasta el ambiente es de tan solo 26.78 mm (1.068in), se debe procurar alargar el tubo de escape actual lo necesario para alojar el carbón activado y teóricamente mejorar el torque del motor y las demás condiciones operacionales del motor.

Finalmente, la función principal del diámetro del tubo en la tercera etapa es la conducción de calor y no tienen implicaciones en la potencia, el torque u otras variables operacionales del motor. Romero (2016) hace énfasis en que, aumentar el espesor del tubo no tendría ningún aporte significativo, por lo que el uso de uno u otro espesor no es relevante, por el contrario, aumentar el espesor haría al prototipo más pesado. Por esta razón se selecciona un espesor comercialmente disponible que coincida con el espesor actual del tubo de escape del motor, el cual es de aproximadamente 3.20 mm.

4.3.4.2 Materiales de fabricación. El tubo de escape actual del motor está fabricado en acero galvanizado y tiene un recubrimiento de pintura negra.

Al revisar la literatura se encuentra que este tipo de acero es el más utilizado para la fabricación de tubos de escape, debido a que es el más económico en comparación con el acero inoxidable o aluminio. El acero galvanizado es capaz de soportar altas temperaturas y evitar la corrosión, lo cual lo hace pertinente para su uso como tubo de escape. Por otra parte este tipo de acero es económico y su disponibilidad es alta en el mercado local. También es importante mencionar que

este tipo de acero es fácil de trabajar localmente, así que será escogido para fabricar el prototipo en este material.

4.3.4.3 Técnicas de maquinado y/o ensamblaje. Para su fabricación, se parte de un tubo de acero galvanizado de 1 pulgada de diámetro interno, y otro de 2 pulgadas de diámetro interno. Al primer tubo se le realiza un corte, en partes iguales, quedando dos tubos con una longitud aproximada de 3 cm cada uno y se maquina una rosca macho M5 en sus extremos externos de 1 cm de longitud. Por otra parte, al tubo de 2 pulgadas se le realiza una rosca hembra M5 a lo largo de todo el tubo.

Para la jaula se utiliza una malla tipo zaranda de acero inoxidable de 120x120 (huecos por pulgada) la cual se enrolla sobre si misma quedando de 1 pulgada de diámetro, también se cortan dos tapas de una pulgada de diámetro y se sueldan sus extremos.

4.3.4.4 Planos de detalle. A continuación, se presentan las figuras 17, 18, 19 y 20 del modelado final por pieza y ensamblaje del prototipo, las unidades se encuentran en pulgadas. Los planos en detalle se adjuntan en el apendice B.

1. Tubo de apoyo y escape de gases.

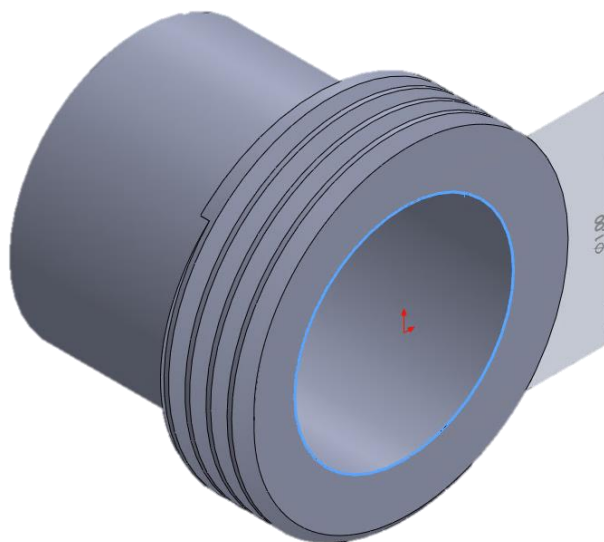


Figura 17. Modelado final del apoyo de tubo de escape y salida de gases.

2. Tubo de conexión.

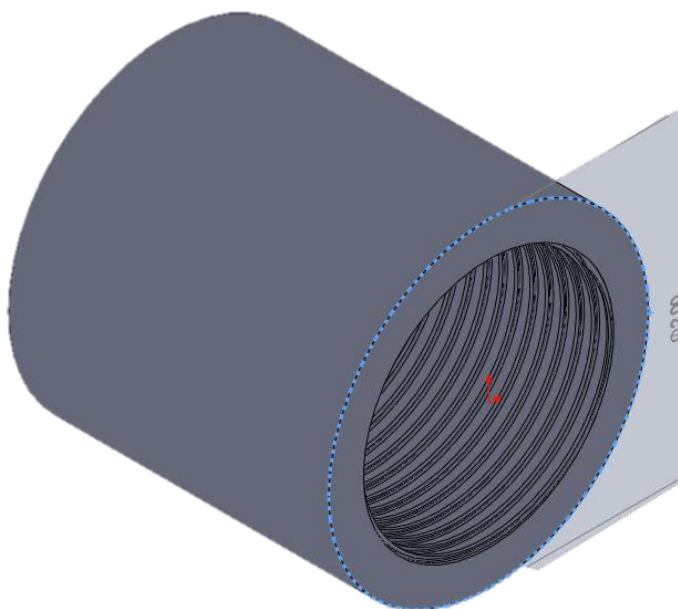


Figura 18. Modelado final del tubo de conexión.

3. Jaula del carbón activado

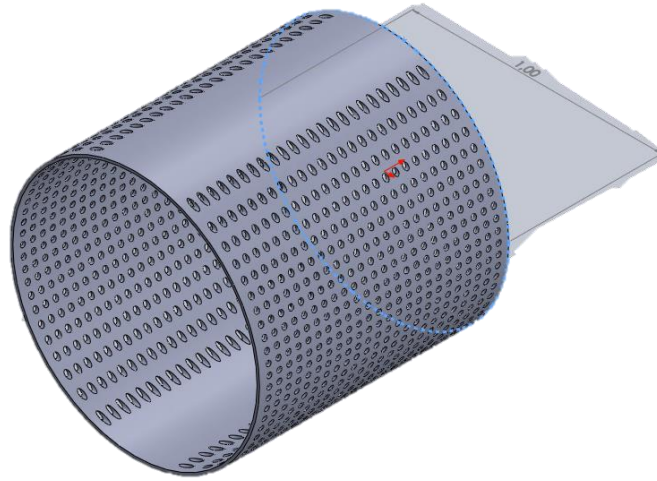


Figura 19. Modelado final de la jaula del carbón activado.

4. Ensamblaje.

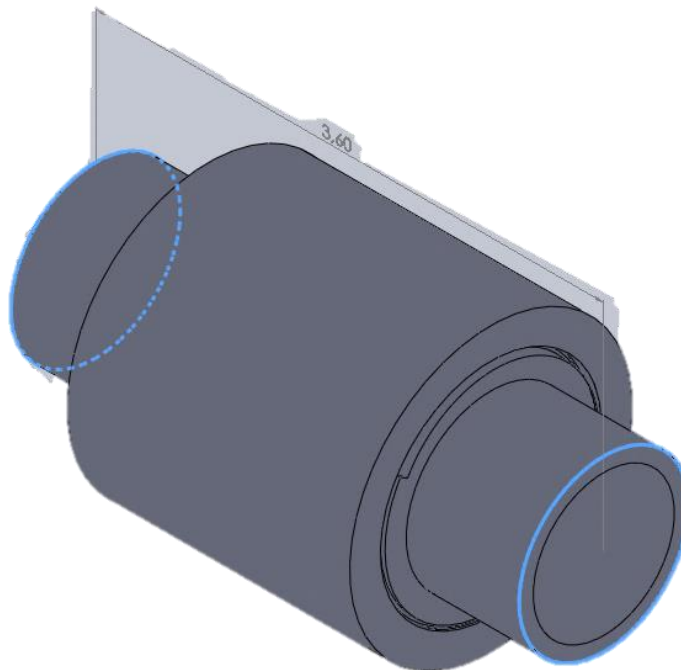


Figura 20. Modelado final del ensamblaje del prototipo.

4.3.5 Fabricación. En las figuras 21, 22, 23 y 24 se presenta el primer prototipo fabricado a cargo de la empresa industrias IMR, ubicada en Bucaramanga, Santander.



Figura 21. Apoyo del tubo de escape y salida de gases.



Figura 22. Tubo de conexión.



Figura 23. Jaula del carbón activado.



Figura 24. Vista lateral e isométrica del prototipo ensamblado.

4.4 Capacidad de adsorción del dispositivo

En la tabla 5 se presentan los resultados de las mediciones efectuadas al prototipo con el analizador de gases *Automotive Bee*, los reportes del equipo se anexan en el Apéndice C.

Tabla 5.

Resultados de la capacidad de adsorción de CO₂ del prototipo.

PRUEBA	CANTIDAD [gr]	LECTURA DE RESULTADO DE CO ₂ [%Vol]
CAC0	N/A	7.5
CAC0r	N/A	7.5
CAC1	5	7.5
CAC1r	5	7.5
CAC2	10	7.5
CAC2r	10	7.5
CAC3	15	7.5
CAC3r	15	7.5

Analizando los datos de la tabla 5, se da por sentado que el carbón activado, independientemente de la cantidad que se encuentre en el prototipo, no adsorbe el CO₂ de la combustión. Razón por la cual, se determina que el carbón activado a partir de pulpa de café y agente activante H₃PO₄ no pasó la prueba de adsorción diseñada.

4.5 Analisis de viabilidad

En la tabla 6 se enlistan todos los equipos, consumibles, cotizaciones e implementos que se utilizan a lo largo del proyecto y el valor comercial de cada uno de ellos.

Tabla 6.

Lista de precios de los equipos, consumibles cotizaciones e implementos.

Item	Valor (en COP)
Materia prima.	\$ 0
Horno universal Memmert VO200COOL	\$ 6.754.000
Acido orto-fosfórico H ₃ PO ₄ (85-88%) de AppliChem	\$ 346.000
Panreac ITW companies	
Horno tubular ThermolyneType 21100 + Controlador de temperatura Maxthermo MC 5438	\$ 2.150.000
Nitrógeno (N ₂) UN 1066 Cryogas	\$ 150.000
Flujómetro Sho Rate Brooks	\$ 185.000
Ph-metro Hanna Instruments	\$ 350.000
Bomba de vacio Welch Ilmvac	\$ 1.000.000
Análisis BET, volúmen total de poro y diámetro promedio de poro	\$ 540.000
Licencia Solidworks.	\$ 2.500.000
Generador Bauker modelo GG2800	\$ 2.700.000
Analizador de gases de escape Brain Bee Automotive	\$ 12.000.000
Malla Zaranda 30x30 cm	\$ 50.000
Fabricación prototipo (Industrias IMR)	\$ 120.000
Implementos de laboratorio (Vasos de precipitado, papel filtro, agitadores magnéticos, mangueras, kitasatos, cajas petri, balanza, etc)	\$ 600.000

Como se mencionó en el apartado 3.5, no se incurrieron en todos los costos anteriormente mencionados, los items destacados en negrita son aquellos en los que sí se tuvo que incurrir para la realización del proyecto.

Con la información presentada en el apartado 4.4, se determina que el dispositivo no es viable técnicamente y por ende tampoco es viable financieramente un proyecto a mayor escala con las condiciones, diseños y protocolos presentados en este trabajo de grado.

5. Conclusiones

- El carbón activado a partir de pulpa de café y H₃PO₄ presenta un buen desarrollo del área superficial y un diámetro de poro característico de carbones mesoporosos ideales para adsorción de líquidos, sin embargo, para adsorción de CO₂ se debe ajustar el protocolo de activación para fabricar carbones activados microporosos.
- El prototipo presenta fugas de carbón activado debido a la alta temperatura que expande la jaula, por lo que debe rediseñarse para evitar pérdidas durante las pruebas.
- El analizador de gases no registró ningún cambio en las lecturas de CO₂, por lo tanto, el experimento diseñado demuestra que el carbón activado preparado no adsorbe el CO₂ producto de la combustión.
- El dispositivo con el carbón activado no es viable técnicamente con las condiciones y los protocolos de activación y adsorción presentados en este proyecto, y por ende tampoco lo es financieramente.

Referencias bibliográficas

- Acevedo, S. A. (2014). Preparación y caracterización de carbón activado granular obtenido a partir de hueso de palma africana (*Elais Guineensis*) para la adsorción de CO₂ (Tesis de maestría). Recuperado de <http://bdigital.unal.edu.co/46106/1/74382041.2014.pdf>
- Álvarez, N. (2016). Procesos de adsorción para la captura de CO₂ en corrientes de biogás (Tesis doctoral). Recuperado de http://digital.csic.es/bitstream/10261/137813/1/TD_Alvarez_Noelia.pdf
- Bansal, R. C., Donnet, J. B. y Stoeckli, H. F. (Ed.). (1988). *Active Carbon*. New York, U.S.A: Marcel Dekker.
- Bansal, R. C. y Goyal, M. (Ed). (2005). *Activated Carbon and Its Surface Structure*. New York: U.S.A: Taylor & Francis Group.
- Brunauer, S., Deming, L. S., Deming, W. E. y Teller, E. (1940). On a theory of the van de Waals adsorption of gases. *Journal of The American Chemical Society*, 62, 1723-1732.
- Brunauer, S., Emmet, P. H. y Teller, E. (1938). Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of The American Chemical Society*, 60, 309-319.
- Garcés, L. E. y Coavas, S. C. (2012). Evaluación de la capacidad de adsorción en la cáscara de naranja (*Citrus sinensis*) modificada con quitosano para la remoción de Cr (VI) en aguas residuales (Tesis de pregrado). Recuperado de <http://190.242.62.234:8080/jspui/bitstream/11227/140/1/tesis%20Garces-Coavas.pdf>
- Energy Institute (2010). Good plant design and operation for onshore carbon capture installations and onshore pipelines. Recuperado de: <https://web.archive.org/web/20120626060816/http://www.globalccsinstitute.com/publications/good-plant-design-and-operation-onshore-carbon-capture-installations-and-onshore-pipe-5>.

- Friedli, H., H. Lötscher, H. Oeschger, U. Siegenthaler, and B. Stauffer. 1986. Ice core record of ¹³C/¹²C ratio of atmospheric CO₂ in the past two centuries. *Nature* 324:237-38.
- Gergova, K., Galushko, A., Petrov, N. y Minkova, V. (1992). Investigation of the porous structure of activated carbons prepared by pyrolysis of agricultural by-products in a stream of water vapor. *Carbon*, 30, 721-727.
- Gergova, K., Petrov, N. y Eser, S. (1994). Adsorption properties and microestructure of activated carbons produced from agricultural by-products by steam pyrolysis. *Carbon*, 32(4), 639-702.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2014). Cambio climático 2014: Mitigación del cambio climático. Recuperado de: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/WG3AR5_SPM_brochure_es.pdf
- Húmpola, P. D. (2013). Estudio de la adsorción de compuestos biorrefractarios en soluciones acuosas (Tesis doctoral). Recuperado de <http://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8080/tesis/handle/11185/604>
- Informe del mercado de café, diciembre de 2017 (2018). International coffee organization, ICO. Recuperado de: <http://www.ico.org/documents/cy2017-18/cmr-1217-c.pdf>
- La Chira, R. R. (2010). Columnas de carbón activado (Tesis doctoral). Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, México.
- López, A. B. (2013). Adsorción de dióxido de carbono, a elevadas presiones parciales, por disoluciones acuosas de mezclas binarias de alcanolaminas (Tesis doctoral). Recuperado de: <http://ruja.ujaen.es/bitstream/10953/545/1/9788484398424.pdf>
- Marsh, H. y Rodriguez, F. (Ed). (2005) Activated Carbon. Oxford, UK: Elsevier Science Ltd.
- Martín, J. M. (Ed.). (1988) Generalidades sobre la adsorción física de gases y vapores en carbones. Alicante, España: Editorial Secretariado de publicaciones de la Universidad de Alicante.
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, OCDE (2012). Perspectivas ambientales de la OCDE hacia 2050: Consecuencias de la inacción. Recuperado de <https://www.oecd.org/env/indicators-modelling-outlooks/49884278.pdf>

Organización de Naciones Unidas (1992). Convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. Recuperado de https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/convsp.pdf

Plants of the world (2019). *Coffea arabica*. Recuperado de: <http://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:747038-1>

Producción cafetera del 2017 fue igual a la de 2016 (1 de marzo de 2018). Revista Dinero. Recuperado de: <https://www.dinero.com/pais/articulo/colombia-mantuvo-produccion-de-cafe-en-2017/253782>.

Ramírez, O. I. (2013). Producción de carbones activados por activación química con H₃PO₄ a partir de carbón pirolítico de bagazo de caña de azúcar (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Rodríguez, F. (1997). Carbón Activado. Estructura, preparación y aplicaciones.

Rodríguez, F. y Sepulveda, A. (2001). Porous carbons in adsorption and catalysis. *Handbook of surfaces and interfaces of materials*, 5, 309-355.

Rodríguez, V. N. (2009). Estudio de un biosistema integrado para el postratamiento de las aguas residuales del café utilizando macrófitas acuáticas (Tesis de grado). Universidad politécnica de Valencia, Valencia, España.

Rojas, M. A. y Chacón, Y. V. (2011). Cuantificación general de emisiones de dióxido de carbono generadas por las actividades en la universidad industrial de santander y propuesta de mitigación (Tesis de pregrado). Recuperado de: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2011/139024.pdf>

Romero, I (2016). Diseño y optimización del sistema de escape para un monoplaza de formula student (Tesis de pregrado). Recuperado de: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5772/fichero/PFC+V4.pdf>

Sing, K. S. W., Everett, D. H., Haul, R. A. W., Pieroti, R. A., Moscou, L., Rouquerol, J. y Siemieniwska, T. (1985) Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. *Pure Appl. Chem*, 57 (4), 603-619.

- Sips, R. (1948) On structure of a catalysis surface. *The journal of chemical Physics*, 16, 490-495.
- Stoeckli, F. (1990). Microporous carbons and their characterization: The present state of art. *Carbon*. 28 (1), 1-6.
- Torné-Fernandez, V. (2006). Preparación, caracterización y aplicaciones de carbones activados a partir de lignina de kraft (Tesis doctoral). Universitat Rovira i Virgili, Terragona, España.
- Yang, T. y Lua, A. C. (2003). Characteristics of activated carbons prepared from pistachio-nut shells by physical activation. *Journal of Colloid and Interface Science*, 267, 408-417