



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA

ESTUDIO DE LA VIDA ÚTIL DEL CARBÓN ACTIVO EN FILTROS RÁPIDOS ABIERTOS APLICADOS AL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DE AGUA

AUTOR: Jaime Arbona Gimeno

TUTOR: María Isabel Iborra Clar

Curso Académico: 2016-17

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer la ayuda recibida por mis tutores tanto de la UPV como de la empresa: Isabel Iborra y Francisco Bernat. Una mención especial a Miguel Añó por ser cotutor en la empresa no oficial. Y a mis padres que me lo han dado todo en esta vida.

Además, quería agradecer a mis compañeros del laboratorio “La Presa” (por orden alfabético): A José Castelló por toda la ayuda recibida durante la realización experimental realizada en el laboratorio de fisicoquímico. A Salvador Cháfer por compartir sus conocimientos de química. A Elena Estal por ayudarme con los métodos ya puestos en marcha anteriormente para caracterizar el carbón activo. A Sara Gayo por recomendarme una serie con la que me he podido distraer en momentos de ofuscación durante la realización del proyecto. A José Llombart por su indispensable ayuda tanto dentro como fuera del laboratorio. A José Palomero por hacer más amenas las mañanas en el laboratorio. A Sonia Quintanilla por descubrirme la microbiología, un mundo nuevo para mí, así como por su increíble ayuda en todos los ámbitos y su paciencia al enseñarme. A Patricia Soler por su ayuda con la asignación de este TFG y sus consejos para realizarlo. Y a Álvaro Trapero por enseñarme formas de búsqueda de información más óptimas.

Muchas gracias a todos, sin vuestra ayuda no habría podido alcanzar esta meta, este objetivo.

Gracias por compartir este sueño.

RESUMEN

En el presente proyecto, se van a estudiar diferentes maneras de caracterizar distintos tipos de carbón activo con el fin de determinar la vida útil de los mismos aplicados a un proceso de potabilización de aguas.

El carbón activo que se emplea habitualmente en procesos de potabilización de aguas, puede ser de tipo en polvo (CAP), cuya recuperación no se contempla en el proceso, o bien de tipo granular (GAC) que se implementa en columnas y una vez saturado se regenera para su siguiente ciclo de tratamiento.

En este caso, el seguimiento de la actividad del carbón empleado, o su vida útil, es un parámetro tanto técnico como económico, muy importante y a tener en cuenta en el diseño de la instalación.

Palabras clave: Carbón activo, Isotherma de adsorción, Potabilización.

RESUM

En el present projecte, es van a estudiar diferents maneres de caracteritzar distints tipus de carbó actiu a fi de determinar la vida útil dels mateixos aplicats a un procés de potabilització d'aigües.

El carbó actiu que s'empra habitualment en processos de potabilització d'aigües, pot ser de tipus en pols (CAP) , la recuperació del qual no es contempla en el procés, o bé de tipus granular (GAC) que s'implementa en columnes i una vegada saturat es regenera per al seu següent cicle de tractament.

En este cas, el seguiment de l'activitat del carbó empleat, o la seua vida útil, és un paràmetre tant tècnic com econòmic, molt important i a tindre en compte en el disseny de la instal·lació.

Paraules clau: Carbó actiu, Isotherma d'adsorció, Potabilització.

ABSTRACT

In this Project, it's going to study different ways of activated carbon characterization, to determinate their life when they are applicated in a process of water potabilization.

The activated carbon is usually employed in the process of water potabilization, It can be powdered activated carbon (PAC), which recuperation is not contemplated in the process, or granular activated carbon (GAC) which is implemented in columns, and ones it's saturated, it's regenerated in order to be used in the next treatment cycle.

On this occasion, the study of the activity of the employed carbon, is a parameter as technic as economic, it's very important and it's necessary to think about in the design of the installation.

Key words: Activated carbon, Adsorption isotherm, Potabilization.

ÍNDICE

MEMORIA TÉCNICA	9
CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN	11
1.1 OBJETIVOS	11
1.2 MOTIVO DE LA REALIZACIÓN DEL TFG	11
1.3 ESTACIÓN DE TRATAMIENTO DE AGUAS POTABLES “LA PRESA”	12
1.4 CARBÓN ACTIVO	13
1.4.1 Introducción al carbón activo	13
1.4.2 Activación del carbón activo	14
1.4.3 Regeneración del carbón activo	15
1.5 MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN ACTIVO	15
1.5.1 Densidad aparente	15
1.5.2 Densidad absoluta	15
1.5.3 Densidad de la partícula	16
1.5.4 Tamaño de la partícula del carbón granular	16
1.5.5 Caída de presión de un flujo gaseoso sobre un lecho de relleno de carbón activo ..	16
1.5.6 Resistencia mecánica del carbón activo en grano	17
1.5.7 Isotermas de adsorción	17
1.5.8 Índice de adsorción de yodo	17
1.5.9 Índice de azul de metileno	18
1.5.10 Contenido en humedad	18
1.5.11 Contenido en cenizas	18
1.5.12 Punto de ignición del carbón activo granular	18
CAPÍTULO 2 – MÉTODOS APLICADOS AL LABORATORIO	21
2.1 ELECCIÓN DE MÉTODOS SIGNIFICATIVOS	21
2.2 PREPARACIÓN DEL CARBÓN ACTIVO EN POLVO	21
2.3 DENSIDAD APARENTE	21
2.3.1 Objetivo del método	21
2.3.2 Introducción teórica	22
2.3.3 Material y reactivos	22
2.3.4 Método experimental	23
2.4 TAMAÑO DE PARTÍCULA	23
2.4.1 Objetivo del método	23
2.4.2 Introducción teórica	23
2.4.3 Material y reactivos	24
2.4.4 Método experimental	25

2.5	ÍNDICE DE ADSORCIÓN DE YODO	25
2.5.1	Objetivo del método	25
2.5.2	Introducción teórica	25
2.5.3	Material y reactivos.....	26
2.5.4	Método experimental	27
2.6	ÍNDICE DE AZUL DE METILENO	27
2.6.1	Objetivo del método	27
2.6.2	Introducción teórica	27
2.6.3	Material y reactivos.....	29
2.6.4	Método experimental	30
2.7	CONTENIDO EN CENIZAS	31
2.7.1	Objetivo del método	31
2.7.2	Introducción teórica	31
2.7.3	Material y reactivos.....	32
2.7.4	Método experimental	32
CAPÍTULO 3 – RESULTADOS Y CONCLUSIONES		33
3.1	RESULTADOS DE LA DENSIDAD APARENTE	33
3.2	RESULTADOS DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA	35
3.3	RESULTADOS DEL ÍNDICE DE ADSORCIÓN DE YODO	38
3.4	RESULTADOS DEL ÍNDICE DE AZUL DE METILENO.....	44
3.5	RESULTADOS DEL CONTENIDO EN CENIZAS.....	48
3.6	CONCLUSIONES	51
CAPÍTULO 4 – SEGURIDAD Y GESTIÓN DE RESIDUOS.....		53
4.1	SEGURIDAD.....	53
4.1.1	Ácido clorhídrico al 37 % (HCl):	53
4.1.2	Yodo 0,5 mol/L (1N) solución valorada (I ₂):.....	54
4.1.3	Tiosulfato de sodio 1 mol/L (1N) (Na ₂ S ₂ O ₃):.....	54
4.1.4	Azul de metileno deshidratado.	54
4.2	GESTIÓN DE RESIDUOS.....	55
CAPÍTULO 5 – BIBLIOGRAFÍA		56
ANEXOS		57
ANEXO I		58
ANEXO II		59
PRESUPUESTOS		63
1.	PRESUPUESTOS PARCIALES	65
2.	PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN	68

MEMORIA TÉCNICA

CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETIVOS

El objetivo que persigue este Trabajo de Fin de Grado consiste en el estudio del carbón activo de los filtros rápidos abiertos de la Estación de Tratamiento de Aguas Potables (ETAP) "La Presa". Para ello se estudiarán los diferentes métodos de caracterización del carbón activo con el fin de escoger aquéllos que se puedan aplicar, ya sea por capacidad técnica como económica, en el laboratorio de La Presa.

Con este Trabajo Fin de Grado el alumno adquirirá metodología experimental y capacidad de diseño, suficiente para la consecución y desarrollo del TFG. Adquiriendo competencias específicas como:

- Capacidad para el Diseño y Gestión de procedimientos de experimentación aplicada, especialmente para la determinación de propiedades termodinámicas y de transporte, y modelado de fenómenos y sistemas en el ámbito de la ingeniería química, sistemas con flujo de fluidos, transmisión de calor, operaciones de transferencia de materia, cinética de las reacciones químicas y reactores.

- Diseñar equipos, instalaciones y servicios en la Industria Química.

- Capacidad para realizar un trabajo individual que deberá ser defendido ante un tribunal universitario, consistente en un proyecto en el ámbito de la tecnología específica de Química Industrial en el que se sintetizen e integren las competencias adquiridas en las enseñanzas.

- Conocimientos para la realización de mediciones, cálculos, valoraciones, tasaciones, peritaciones, estudios, informes, planes de labores y otros trabajos análogos.

- Gestionar la información procedente de diversas fuentes y, en su caso, las herramientas informáticas de búsqueda y clasificación de recursos bibliográficos o de información mono o multimedia.

1.2 MOTIVO DE LA REALIZACIÓN DEL TFG

El aumento progresivo del uso del carbón activo en los filtros rápidos abiertos en la Estación de Tratamiento de Aguas Potables "La Presa", su coste de compra y de regeneración, así como de su mantenimiento, hacen de vital importancia un seguimiento continuo sobre sus características más representativas.

Hasta la fecha de hoy, tan solo se realizaba un estudio parcial del carbón activo, ofreciendo unos datos sobre su calidad y vida útil muy limitadas.

El propósito de este proyecto aporta nuevas técnicas de caracterización del carbón activo que puedan ser realizadas en el laboratorio de análisis fisicoquímico de la ETAP “La Presa” de forma periódica, de forma que no sea necesario recurrir a otros laboratorios externos.

1.3 ESTACIÓN DE TRATAMIENTO DE AGUAS POTABLES “LA PRESA”

La estación de tratamiento de agua potable de La Presa, se encuentra en la intersección entre el canal Júcar-Turia y el río Turia. Estos dos efluentes, constituyen las principales captaciones de agua bruta de la ETAP de La Presa.

A estas dos captaciones, hay que añadir una serie de pozos interiores que proporcionan agua del nivel freático del río Turia.

La ETAP cuenta con un tratamiento convencional basado en los procesos de coagulación, decantación y filtración, pero con mejoras basadas en un control del pH y desinfección con luz ultravioleta.

La ETAP “La Presa” consta de tres líneas de tratamiento denominadas ALTA II, ALTA I y BAJA que se encuentran a diferentes cotas sobre el nivel del río Turia.

El proceso comienza con una primera etapa de desbaste de gruesos, mediante dos rejillas de 20 mm de paso para la instalación de ALTA II y otra común para las instalaciones de ALTA I y BAJA, seguidas de rejillas de finos formadas por dos macrotamices autolimpiables de 10 mm de paso de malla.

Como se ha comentado, la captación se encuentra a una cota inferior a las 3 líneas de tratamiento y por ello se dispone de una sala de agua bruta con seis grupos, para re-elevar el agua de las captaciones al nivel de las líneas de tratamiento.

En esta instalación se añade un oxidante, ya sea cloro o dióxido de cloro donde se oxida la materia orgánica natural. Además, y aunque no sea el caso de La Presa, en aguas subterráneas que posean hierro o manganeso, la oxidación generará sales de hierro y manganeso, que precipitarán al ser insolubles en agua.

Además, se añade dióxido de carbono como corrector del pH ya que favorece la coagulación y regula el poder incrustante del agua.

También puede dosificarse en cabecera CAP (carbón activo en polvo) en forma de lechada para la adsorción de sustancias contaminantes. Esto debe hacerse en cabecera para tener suficiente tiempo de contacto.

Del colector de salida de las bombas de re-elevación se envía por una tubería de 2000 mm a los decantadores.

En los decantadores, se produce el proceso de desestabilización de las cargas, que de forma natural lleva el agua, mediante un coagulante (policloruro de aluminio) y se forman agregados de sólidos, llamados coágulos, que aumentan de peso y van decantando a lo largo del decantador ayudado por los agitadores y la recirculación de fangos.

Los fangos generados en el fondo de los decantadores se purgan y se envían al proceso de tratamiento de fangos donde serán deshidratados.

La siguiente etapa es una filtración en lecho bien sea de arena silíceo o carbón activo granular. Los sólidos retenidos en el filtro crean una capa superficial que se elimina mediante el lavado de filtros. El agua de lavado de filtros, junto con la purga de decantadores, se dirige a la instalación de tratamiento de fangos.

El agua filtrada se conduce hacia un reactor ultravioleta donde se elimina por radiación UV cualquier posible microorganismo, protozoo o virus existente.

Tras este proceso, el agua se conduce a unas galerías donde se procede a un afino con cloro para mantener la desinfección y desde donde se bombea a los depósitos reguladores, por medio de bombas centrífugas, o bien directamente a la propia red según el consumo existente.

El funcionamiento normal es mantener y vaciar depósitos por el día y llenarlo por la noche.

1.4 CARBÓN ACTIVO

1.4.1 Introducción al carbón activo

Se denomina carbón activo al producto derivado de materiales carbonosos modificados artificialmente para desarrollar áreas superficiales extremadamente altas, pudiendo llegar a 1500 metros cuadrados por gramo de carbón "*Grupo TAR. (2016).*"; convirtiéndose en un material con un alto poder adsorbente.

La estructura del carbón activado es de carácter cristalino, siendo un conjunto de placas graníticas separadas y con diferente sentido, generando espacios entre las placas, conocidos como poros. Aquellos poros cuyo tamaño no superen los 2 nm se consideran microporos, aquellos que se encuentren entre los 2 nm. y los 50 nm, mesoporos; y los poros de mayor tamaño, macroporos.

Las dos características principales del carbón activo son su elevada adsorbancia, así como su baja selectividad de retención, puesto que, al poseer poros de tamaños tan dispares, el carbón activo es capaz de retener tanto pequeñas moléculas como moléculas de gran tamaño. Además, los macroporos permiten el acceso y la rápida difusión de las moléculas al interior del carbón.

El carácter apolar del material provoca la adsorción de moléculas apolares preferentemente. Sin embargo, sustancias levemente retenidas de carácter polar sirven como nexos de otras moléculas polares, pudiendo retener tanto moléculas polares como apolares en sus poros.

El carbón activo es un material relativamente económico, con un alto rendimiento de eliminación de impurezas orgánicas en el agua, tales como detergentes, virus, ciertos contaminantes químicos y sabores y olores. Por lo tanto, los filtros de carbón activo granular en las plantas de potabilización de aguas es cada vez más común.

"El estudio de Muna Y. Abdul (2008)." ha demostrado que el carbón activo granular es más eficiente que el carbón activo en polvo en plantas de tratamiento de aguas, esto se debe a que el uso del carbón activo en polvo sólo tiene un ciclo de vida, mientras que el granular puede ser reutilizado.

Asimismo, los filtros de carbón activo eliminan con mayor efectividad virus que los filtros convencionales de arena, incluso un lecho de carbón activo saturado elimina más virus que uno de arena virgen. Además de virus, el carbón activo es más efectivo en la reducción de turbidez del agua y la eliminación de cloro libre resultante de la sobre cloración que la arena.

El carbón activo puede ser usado después de una filtración convencional de materia en suspensión o como una combinación de filtración-adsorción, dependiendo del grado de contaminantes orgánicos del agua a tratar.

1.4.2 Activación del carbón activo

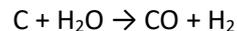
La materia prima para fabricar el carbón activo puede ser de origen mineral (turba, lignito, antracita y hulla bituminosa) o vegetal (cáscara de coco, bagazo, huesos de fruta y restos de madera). Sin embargo, debido a su precio económico y disponibilidad se utilizan principalmente la cáscara de coco, de nuez y de almendra a nivel comercial.

La activación del carbón puede ser dada mediante un proceso físico, más utilizado a nivel industrial; o mediante un proceso químico, cuyas superficies específicas obtenidas pueden rondar los 3000 metros cuadrados por gramo de carbón "Koehlert K. (2017).".

Previamente al proceso de activación física, se ha de secar el carbón de forma que se elimine la humedad del material, pues es fundamental para llevar a cabo la activación física del carbón.

Una vez seco el carbón bruto, se calienta a temperaturas de entre 100 y 400 °C en una atmósfera sin oxígeno, de forma que se eliminen los compuestos orgánicos volátiles. Más tarde, se calcina el carbón a temperaturas de entre 400 y 600 °C, en esta etapa, se forman los primeros poros, incrementándose la superficie de contacto del carbón.

Por último, se activa el carbón en una atmósfera de vapor de agua entre 700 y 1.050 °C. El carbón a esta temperatura reacciona con el agua, formando CO e H₂ como se muestra en la siguiente reacción:



formándose los poros característicos del carbón activo, puesto que se gasifica parte del carbón del interior de éste. Normalmente se hace reaccionar la mitad del carbón inicial para convertirlo en monóxido de carbono y generar así un carbón con una alta superficie de contacto.

El proceso químico se divide en dos etapas: inicialmente se introduce un agente activante (normalmente ácido fosfórico o cloruro de zinc) a la materia prima en una atmósfera inerte a temperaturas de entre 400 y 700 °C, obteniéndose la estructura porosa deseada. La segunda fase consiste en el lavado de los agentes activantes retenidos por el carbón activo.

Independientemente del proceso utilizado, el carbón activo es molido para obtener o bien carbón activo en grano, en polvo o en pellets; y se almacenan para su futura comercialización.

La regeneración supone un coste significativo en la empresa, especialmente al tratar con una gran cantidad de toneladas de carbón activo. Siendo de vital importancia un seguimiento de sus características principales y comparándolas con las de un

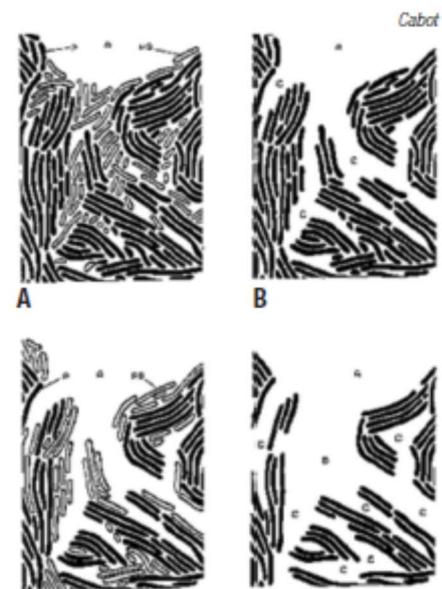


FIGURA 1.4.1. Desarrollo de los poros del carbón durante su activación. Koehlert K. (2017).

carbón virgen, con el fin de determinar la calidad del carbón regenerado.

1.4.3 Regeneración del carbón activo

El carbón activo se regenera mediante una oxidación orgánica. Éstos son quemados en un horno para su eliminación. El proceso destruye parte del carbón activo por lo que se le añade carbón activo virgen para reemplazar las pérdidas.

Puesto que la calidad del carbón activo regenerado siempre es levemente inferior al virgen, no se podrá regenerar ilimitadamente.

1.5 MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN ACTIVO

En este apartado se especificarán los distintos métodos de caracterización del Carbón activo “*obtenidos del Conseil Européen des Fédérations de l'Industrie Chimique. (1986)*”. La caracterización del carbón activo es muy importante puesto que la ETAP utiliza filtros de carbón activo durante el proceso de potabilización del agua. Conocer el estado de dichos filtros resulta clave para obtener los resultados óptimos esperados.

Existen multitud de ensayos para caracterizar un carbón activo, por lo que resulta imprescindible elegir aquéllos cuyos resultados sean útiles para la empresa y al mismo tiempo sean viables.

1.5.1 Densidad aparente

La densidad aparente es un método rápido y simple de realizar, aportando a su vez información valiosa sobre los filtros de carbón activo, ya que con este valor se permite estimar el volumen que ocupará el carbón en los filtros. De esta forma, se evitarán errores durante la reposición y diseño de los filtros. Una mala medida podría suponer costes adicionales innecesarios. Convirtiéndose en un método conveniente de realizar en el laboratorio.

La densidad aparente se define como la masa por unidad de volumen de una muestra seca, incluyendo los espacios entre partículas y los poros del carbón; se expresa como $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Existen dos métodos diferentes para obtener la densidad aparente de un carbón activo en polvo o granular: DIN ISO 787.11 o ASTM D 2854, respectivamente.

1.5.2 Densidad absoluta

La densidad absoluta obtiene un parámetro interesante sobre el carbón activo, sin embargo, es menos relevante que la densidad aparente; asimismo, y puesto que es necesario un picnómetro de helio y el propio gas helio para su realización, supone un coste extra a la empresa más el aumento de carga de trabajo sobre los técnicos de laboratorio. Por tanto, no se llevará a cabo.

La densidad absoluta se define como la masa por unidad de volumen de la estructura del carbón, inaccesible al helio, normalmente expresado en $\text{g}\cdot\text{ml}^{-1}$.

El volumen de la estructura de la muestra de carbón con masa conocida se mide mediante el desplazamiento de gas.

1.5.3 Densidad de la partícula

La densidad de la partícula es una característica importante del carbón en grano, siendo usada para la determinación de la porosidad del lecho. Esta característica es necesaria para la determinación de otras muchas propiedades.

La densidad de la partícula se define como la masa de la partícula por unidad de volumen, incluyendo sus poros; se expresa en $\text{g}\cdot\text{ml}^{-1}$.

Se determina introduciendo la muestra en un picnómetro con mercurio actuando como medio. El mercurio se añade al vacío en un picnómetro de diseño específico, controlando la temperatura en todo momento.

Como también ocurre con la densidad absoluta, no se realizará medirá la densidad de la partícula, ya que este método requiere de instrumentación con un coste relevante para obtener información de baja importancia sobre el carbón activo en la ETAP.

1.5.4 Tamaño de la partícula del carbón granular

El tamaño de la partícula es una propiedad de gran importancia ya posee influencia sobre las características del lecho: su cinética y catálisis. Se determina mediante la separación de los granos haciéndolos pasar por tamices de diferente luz de malla y midiendo la masa de capturados en cada tamiz.

El tamaño de la partícula es un parámetro importante puesto que puede complementar la información obtenida de la densidad aparente, así como la resistencia del grano en condiciones de trabajo y la evolución que sufre el carbón durante su regeneración. Al suponer un gasto elevado la regeneración, conviene observar sus consecuencias. Es por ello un método a realizar periódicamente en la planta.

1.5.5 Caída de presión de un flujo gaseoso sobre un lecho de relleno de carbón activo

La caída de presión de un flujo gaseoso sobre un lecho de relleno ofrece información sobre la resistencia del mismo en dichas circunstancias. La diferencia de presión se adecúa a una ecuación semi-empírica, que relaciona la forma y el tamaño de las partículas con la temperatura, presión y velocidad superficial del gas. Se obtiene en $\text{Pa}\cdot\text{m}^{-1}$ de lecho de relleno.

Se hace atravesar aire por un lecho de carbón activo en grano de una altura conocida. La caída de presión del gas se mide a través de la velocidad del gas al inicio y al final del lecho.

Puesto que el carbón activo se utiliza exclusivamente en agua líquida, la resistencia del lecho sobre un flujo de gas no ofrece información de interés.

1.5.6 Resistencia mecánica del carbón activo en grano

La resistencia mecánica es un factor importante para la mayoría de las aplicaciones del carbón activo granular. La determinación de dicho factor se realiza simulando la resistencia a la abrasión o el desgaste bajo condiciones prácticas.

Existen diferentes métodos para obtener dichos factores: por vibración, impacto, rotación, etc. Puesto que estudiar los diferentes métodos requeriría un exceso de carga de trabajo, la resistencia se estimará mediante la evolución del tamaño de partícula como se explica en el apartado correspondiente.

1.5.7 Isotermas de adsorción

Una isoterma de adsorción expresa la cantidad de sólido o gas adsorbido, bajo una temperatura constante, en función de la presión parcial (P_A) del gas (o de la concentración (C_A) en el caso de un líquido) en equilibrio con el sólido.

Mediante el empleo de un modelo de adsorción se pueden obtener parámetros característicos del sólido adsorbente, siendo los más característicos la superficie específica y el volumen de poros.

Existen diversos métodos de adsorción, siendo los más importantes:

- *Modelo de Langmuir*: en un modelo simple cuyas hipótesis se basan en que la superficie del carbón es uniforme y homogéneo, siendo todos sus centros activos igualmente accesibles por el adsorbato; las moléculas tan solo forman monocapas; y no existe interacción entre las moléculas a adsorber, de forma que se trata el adsorbato como fluido ideal y los centros activos ocupados del adsorbente no interfiere en dicho modelo. Puesto que las hipótesis no son totalmente reales, este modelo presenta un error relativamente elevado.
- *Modelo de Freundlich*: se basa en una mejora sobre el modelo de Langmuir, al tener en cuenta tanto la interacción intermolecular como la no uniformidad de la superficie del sólido. Sin embargo, deja de ser válido a altas concentraciones debido a la formación de multicapas.
- *Modelo de Brunauer, Emmet y Teller (BET)*: este modelo permite calcular la adsorción del adsorbente en el caso de que se generen multicapas.

A pesar de ser uno de los métodos para obtener información sobre la capacidad de adsorción más completos, la realización de dichas pruebas requiere maquinaria de alto coste y de gran tamaño, haciendo imposible su instalación en el laboratorio de la ETAP. Sin embargo, no se descarta la posibilidad de contratar una empresa externa para realizar las isotermas de adsorción del carbón activo de los filtros en un futuro.

1.5.8 Índice de adsorción de yodo

Se trata de un método simple y rápido capaz de indicar la capacidad de adsorción del carbón activo en sus microporos. Se define como los miligramos de yodo adsorbidos por gramo de carbón activo en polvo siendo la concentración del yodo 0.02N.

Al ser un método simple, pero al mismo tiempo ofrece información valiosa sobre la adsorción del carbón activo, el índice de yodo es uno de los métodos más realizados al carbón activo tanto de los filtros de la ETAP "La Presa", como de otras plantas de la empresa en cuestión. El índice de yodo se lleva realizando desde hace varios años, sin embargo, tan solo ofrece información parcial sobre el carbón, ya que únicamente ofrece la información sobre la capacidad de adsorción de los microporos, por lo que es necesario implantar otros métodos complementarios.

1.5.9 Índice de azul de metileno

El índice de azul de metileno indica la capacidad de adsorción de moléculas de tamaño similar del carbón activo, al ser una molécula grande, indica la capacidad de adsorber de los macroporos del carbón. Se define como los miligramos adsorbidos de azul de metileno por gramo de carbón activo.

Al ofrecer información sobre la capacidad de adsorción de los macroporos, este método resulta de gran utilidad al complementarse con el índice de adsorción de yodo, ofreciendo pues la capacidad de adsorción del carbón de los distintos poros de manera independiente. Para mayor inri, su simplicidad y bajo coste hacen del índice de azul de metileno un método de gran importancia a la hora de caracterizar el carbón activo de los filtros de la ETAP.

1.5.10 Contenido en humedad

El método determina la humedad del carbón activo secándolo en un horno, siempre y cuando el único volátil sea agua. Pesando el carbón antes y después se puede calcular su humedad. Una alta humedad en el carbón puede envejecerlo para aplicaciones en fase gas.

Al tratarse de filtros para agua líquida, el contenido en humedad resulta irrelevante en la empresa, a pesar de la rapidez del método. Por lo tanto, se descarta.

1.5.11 Contenido en cenizas

Este método determina las cenizas del carbón activo. El carbón seco se introduce en una mufla a 650°C durante 1 hora. La diferencia de masa permite la obtención de su contenido en cenizas. El carbón activo ha de tener entre un 5 % y un 10 % en cenizas.

Puesto que el laboratorio dispone de una balanza analítica y una mufla, se puede llevar a cabo este método a pesar de no ofrecer información tan importante en comparación con otros. De forma que se pueda saber que el porcentaje de cenizas del carbón usado en la planta posee el porcentaje en peso correcto, y en consecuencia su calidad.

1.5.12 Punto de ignición del carbón activo granular

Mediante este método se obtiene la temperatura en la cual el carbón comienza a combustionar en contacto con aire. Se determina exponiendo el carbón a un flujo de aire caliente, la temperatura de dicho flujo se eleva lentamente hasta que la temperatura del carbón sobrepasa la del aire.

Estudio de la vida útil del carbón activo en filtros rápidos abiertos aplicados al proceso de potabilización de agua

Al encontrarse el carbón en filtros en contacto con agua a temperaturas relativamente bajas, la posibilidad de ignición del carbón es despreciable. Este método es más común para el uso de carbón activo en gases, por lo que no es una característica útil desde el punto de vista de la empresa.

CAPÍTULO 2 – MÉTODOS APLICADOS AL LABORATORIO

2.1 ELECCIÓN DE MÉTODOS SIGNIFICATIVOS

Como se explica en el capítulo anterior, no todos los métodos son relevantes o viables. Ya sea por generar un gasto económico demasiado elevado, su imposibilidad práctica de implementar la instrumentación necesaria en el laboratorio, el exceso de carga de trabajo de los técnicos de laboratorio o simplemente, por no ofrecer información de importancia sobre el carbón activo en filtros rápidos abiertos aplicados al proceso de potabilización de agua.

Los métodos elegidos se explican detalladamente en este capítulo.

Todos ellos se realizan con carbón activo seco. Puesto que las muestras llegan húmedas, se introduce el carbón en cápsulas de cerámica y se dejan 24 horas a una temperatura de 140°C.

2.2 PREPARACIÓN DEL CARBÓN ACTIVO EN POLVO

Varios ensayos de caracterización del carbón activo requieren carbón activo en polvo. Para ello, y según la UNE-EN 12902, el tamaño medio de la partícula ha de estar comprendida entre 10 µm y 50 µm, además ha de tener más de un 95% en fracción másica dentro del rango 0 - 150 µm.

Para su obtención, se procederá de la siguiente forma:

- Se le realizará la molienda al carbón activo seco.

Se le hará pasar por un tamiz de 45 µm de luz de malla. Este paso conviene realizarlo en una campana de extracción de gases de forma que el carbón en polvo no contamine el resto del laboratorio. Imprescindible el uso de mascarilla de seguridad.

Una vez tamizado el carbón en polvo, - Se almacenará en botes estériles de plástico para su futuro uso.

2.3 DENSIDAD APARENTE

2.3.1 *Objetivo del método*

El objetivo del método consiste en la determinación de la densidad aparente del carbón activo granular de los filtros rápidos abiertos de la ETAP, de manera que se permita estimar el volumen que éste ocupará en dichos filtros antes de su instalación.

2.3.2 Introducción teórica

El método está basado en la UNE-EN 12902.

Puesto que el carbón activo se coloca en lechos en los filtros de la ETAP, el volumen que éste ocupará será la suma del carbón, sus poros y los huecos entre los granos, al obtener la densidad aparente se halla la relación de masa del carbón con el volumen total que ocupará.

Al introducir una masa conocida de carbón en un volumen conocido, se obtiene fácilmente su densidad, según la ecuación:

$$\rho_A = 1000 \cdot \frac{m_{den}}{V_{den}} \quad (1)$$

Siendo, ρ_A = densidad aparente ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

m_{den} = masa del carbón (g)

V_{den} = volumen de la muestra (mL)

2.3.3 Material y reactivos

Los materiales utilizados durante este ensayo son los siguientes:

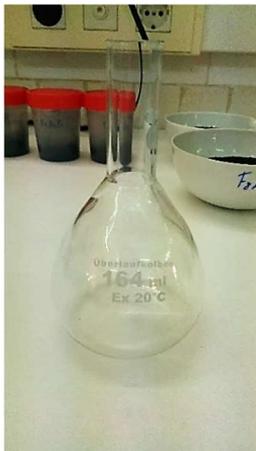


FIGURA 2.3.1. Frasco de desbordamiento



FIGURA 2.3.2. Balanza analítica

- Frasco de desbordamiento de 164 mL (Figura 2.3.1)
- Balanza analítica con sensibilidad de 0,1 mg (Figura 2.3.2)

- Vaso de precipitado de al menos 250 mL.

2.3.4 Método experimental

En primer lugar, se pesa el frasco de desbordamiento vacío en la balanza analítica.

Acto seguido, se introduce el carbón activo seco en el matraz hasta su aforo.

Se le genera vibración al matraz con el carbón de forma que éste se compacte, reduciendo su volumen.

Se vuelve a llenar y vibrar hasta que no se compacte más el carbón.

Se pesa el matraz lleno de carbón en la balanza analítica.

Para aplicar la ecuación (1) con los datos obtenidos, se debe restar la masa del matraz vacío, obteniéndose la masa del carbón. De esta manera, se modifica la expresión (1) en la siguiente:

$$\rho_A = 1000 \cdot \frac{m_{den_L} - m_{den_V}}{V_{den}} \quad (2)$$

Donde, m_{den_L} = masa del frasco lleno (g).

m_{den_V} = masa del frasco vacío (g).

2.4 TAMAÑO DE PARTÍCULA

2.4.1 Objetivo del método

Este método busca determinar la distribución del tamaño del grano del carbón activo. Como se ha explicado en el capítulo anterior, el tamaño de la partícula influye en la catálisis y la cinética del carbón, esto es debido al ser más accesibles los poros del carbón cuanto menor sea el tamaño del grano. Sin embargo, las partículas demasiado pequeñas pueden ser arrastradas por la corriente de agua, generando pérdidas relevantes de carbón en los filtros.

Las pérdidas de carbón activo provocadas por el arrastre del flujo del agua pueden provocar fallos en los próximos procesos de potabilización, el carbón podría adsorber parte del cloro introducido o simplemente, llegar a la red de consumo. Además, la pérdida de carbón activo en los filtros desembocaría en un gasto adicional en la empresa por la compra de nuevo carbón.

La evolución del tamaño del grano también informa sobre la resistencia física del carbón durante su vida útil, transporte, manipulación y regeneración.

2.4.2 Introducción teórica

El método está basado en la UNE-EN 12902.

Estudio de la vida útil del carbón activo en filtros rápidos abiertos aplicados al proceso de potabilización de agua

La teoría de este método es simple, al hacer pasar los granos por una serie de tamices con luces de malla de tamaño diferente en orden descendente, se distribuirán conforme a su tamaño; ya que éstos al irán pasando que los tamices impidan su paso al ser menor su luz de malla menor que el grano.

Al pesar el carbón atrapado en cada tamiz se puede observar la distribución del tamaño de grano en función de su masa.

A partir de los resultados obtenidos se determinarán los siguientes valores:

Tamaño efectivo (10%);

Talla correspondiente al 60%;

Coficiente de uniformidad (60%/10%).

Se aconseja un valor de coeficiente de uniformidad inferior a 2,1 y un % de rechazo de finos inferior al 5 % en fracción másica.

2.4.3 Material y reactivos

- Balanza analítica con una exactitud de $\pm 0,1$ mg (Figura 2.3.2).
- Tamices con diferente tamaño de luz de malla (Figura 2.4.1).



Tamaños de la luz de malla:

2,36 mm

2,00 mm

1,68 mm

1,41 mm

1,19 mm

1,00 mm

710 μm

590 μm

430 μm

360 μm

320 μm

250 μm

Figura 2.4.1. Tamiz vibratorio

2.4.4 Método experimental

Primero, se pesa el vaso de precipitado vacío.

Luego, se pesan aproximadamente 100 g de carbón activo en la balanza, apuntando su masa exacta (100 g de carbón aproximados + vaso vacío).

A continuación, se hace pasar el carbón por el tamiz vibratorio desde su punto más alto, se enciende el tamiz.

Por último, se deposita el carbón del tamiz con luz de malla de mayor tamaño en un vaso de precipitado y se pesa, sin vaciar el vaso, se añade el carbón del siguiente tamiz de menor tamaño de luz de malla y se vuelve a pesar.

Se repite este último paso hasta completar todos los tamices.

2.5 ÍNDICE DE ADSORCIÓN DE YODO

2.5.1 Objetivo del método

Este método determina la cantidad de yodo en miligramos adsorbidos por cada gramo de carbón activo en polvo en una solución acuosa yodo, cuando la concentración en yodo filtrado residual es de 0.02 N.

2.5.2 Introducción teórica

El método está basado en la UNE-EN 12902.

El índice de yodo es una técnica empleada para determinar la capacidad de adsorción del carbón activo. El método se basa en la saturación de la capacidad de adsorción del yodo en los microporos del carbón activo. Para ello se pone en contacto una disolución de yodo con carbón activo en polvo y se determina la concentración de yodo residual mediante una volumetría con tiosulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) 0.1M. El rango típico de un carbón activo se encuentra entre 500-1200 $\text{mg}_{\text{yodo}} \cdot \text{g}^{-1}_{\text{carbón}}$, "Potwara R. (2012)." normalmente, al alcanzar los 400 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ se descartaría el carbón por su baja capacidad de adsorción. Dependiendo de otras condiciones se desechará o se enviará a regenerar.

Para obtener el índice de yodo es necesario calcular la carga de yodo (X/M) y la concentración residual a partir de las siguientes ecuaciones:

$$X/M = \frac{([I_2] \cdot 200 - 2.2 \cdot [Na_2S_2O_3] \cdot V_{tio}) \cdot 126.9}{m_{IY_carbon}} \quad (3)$$

$$N_{yodo} = \frac{[Na_2S_2O_3] \cdot V_{tio}}{100} \quad (4)$$

Donde

X/M = índice de yodo (miligramos de yodo adsorbidos por cada gramo de carbón) (mg/g);

Estudio de la vida útil del carbón activo en filtros rápidos abiertos aplicados al proceso de potabilización de agua

N_{yodo} = normalidad del yodo residual;

$[I_2]$ = la concentración de yodo ($\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$), en nuestro caso $0,05 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$;

Factor de dilución: $\frac{100+10}{50} = 2,2$ en 10 mL de HCl y 50 mL filtrados;

$[Na_2S_2O_3]$ = es la concentración del tiosulfato ($\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$), en nuestro caso 0,1 M;

V_{tio} = volumen de tiosulfato utilizado en la valoración;

El peso atómico del yodo = 126,9 g/mol;

m_{IY_carbon} = la masa utilizada de carbón activo.

2.5.3 Material y reactivos

Los reactivos y materiales que se usarán para la obtención del índice de yodo son:

- Ácido clorhídrico (HCl) al 5% de fracción másica. Preparado a partir de ácido clorhídrico al 37%.
- Tiosulfato de sodio ($Na_2S_2O_3$) al $0,1 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$. Preparado a partir de tiosulfato comercial al 1 M.
- Solución de yodo (I_2) a $0,1 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$. Preparado a partir de yodo comercial al 1 N.
- Vasos de precipitado de diferentes volúmenes.
- Matraces aforados de 100 mL.
- Pipetas graduadas de 10, 20 y 50 mL.
- Matraz Erlenmeyer de 250 mL.
- Placa calefactora.
- Filtros de pliegues de $8 \mu\text{m}$ de tamaño de poro y 18 cm de diámetro.
- Embudo de cristal.
- Balanza analítica con una exactitud de $\pm 0,1 \text{ mg}$ (Figura 2.3.2)
- Bureta graduada de 50 mL.
- Campana de extracción de gases.

2.5.4 Método experimental

Se toma una muestra de carbón activo en polvo, en un matraz Erlenmeyer de 250 mL, de entre 1,000 g a 2,000 g dependiendo del índice de yodo estimado. Sobre un índice de yodo de 1000 mg/g se tomará 1,000 g, un valor de 500 mg/g se tomarán aproximadamente 1,800 g de carbón. Para elegir correctamente la masa de carbón se recomienda observar la proveniencia del carbón y su último índice de yodo determinado, de forma que se pueda estimar un valor cercano.

En una campana de extracción de gases, se añaden 10 mL de HCl (5%) con una pipeta de 10 mL.

Se agita manualmente levemente y se calienta en la placa calefactora en la misma campana de extracción hasta la ebullición, se deja en ebullición 30 ± 2 segundos.

Se deja enfriar el matraz.

Acto seguido se introducen 100 mL de la solución de yodo (0,1 M) y se agita manualmente.

Se hace pasar la muestra por el filtro colocado en un embudo, desechando los primeros 20-30 mL filtrados.

Se cogen 50,0 mL de la muestra filtrada y se valoran con tiosulfato de sodio al 0,1 M.

A partir de este punto se puede resolver la masa de yodo adsorbida por el carbón activo utilizando la ecuación (3).

Hay que tener en cuenta que el resultado sólo se dará por válido si la normalidad del yodo residual (N_{yodo}) está dentro del rango 0,008 y 0,0334; en el caso de que no se encuentre entre dicho rango se repetirá el proceso utilizando más carbón si $N_{\text{yodo}} > 0,0334$ y menos carbón si $N_{\text{yodo}} < 0,008$. Para el cálculo de la normalidad del yodo se resolverá la ecuación (4).

El índice de yodo corresponde a X/M y se expresa en miligramos de I adsorbidos por cada gramo de carbón empleado (mg/g).

2.6 ÍNDICE DE AZUL DE METILENO

2.6.1 Objetivo del método

El objetivo del método índice de metileno consiste en hallar la capacidad del carbón activo para adsorber moléculas de gran tamaño. Para ello se obtendrá el número de azul de metileno del carbón.

2.6.2 Introducción teórica

El índice de azul de metileno se define como los miligramos de reactivo adsorbidos por cada gramo de carbón activo en polvo, en una disolución en equilibrio entre el carbón y el azul de metileno.

Los valores del índice de azul de metileno de un carbón virgen son muy variables, dependiendo del carbón activo que se utilice. Sin embargo, en la ETAP la Presa se suele utilizar un carbón activo cuyo índice de azul de metileno ronda los 200 mg/g nuevo.

El número de azul de metileno puede ser obtenido a través de 3 métodos diferentes: comparación de color en tubos Nessler, volumetría y espectrofotometría visible.

De los tres métodos se realizará la espectrofotometría visible, ya que la comparación de color en tubos Nessler requiere de material y reactivos comerciales específicos que el laboratorio no posee en la actualidad y supondría un gasto adicional e innecesario. Por otra parte, la técnica de la volumetría, a pesar de ser la más simple, incurre a un error de medición mayor. En consecuencia, y teniendo en cuenta la posibilidad de utilizar el espectrofotómetro del laboratorio a la longitud de onda deseada, se procederá a usar dicho método en la planta.

El método de espectrofotometría de luz visible se basa en la relación entre la absorbancia de luz a ($\lambda = 662 \text{ nm}$) de la solución de azul de metileno y su concentración en la solución. Para ello se requerirá de una recta de calibrado. Esta recta no podrá superar los 12 ppm al perder la relación lineal entre absorbancia y la concentración.

El azul de metileno será adsorbido por los macroporos del carbón, por lo que la diferencia entre la concentración inicial y la final proporcionará la masa de azul de metileno adsorbida por una masa de carbón conocida. Para ello hay que encontrar la masa de carbón que deje una solución de azul de metileno residual que pueda entrar en la recta de calibrado.

“Según Bulut, Y. y Haluk, A. (2005).”, para que el ensayo se considere válido, el tiempo de contacto entre el carbón activo y el azul de metileno disuelto ha de ser el adecuado. Este tiempo varía dependiendo de la temperatura, la concentración de la disolución, el pH de la misma o la cantidad de carbón añadida.

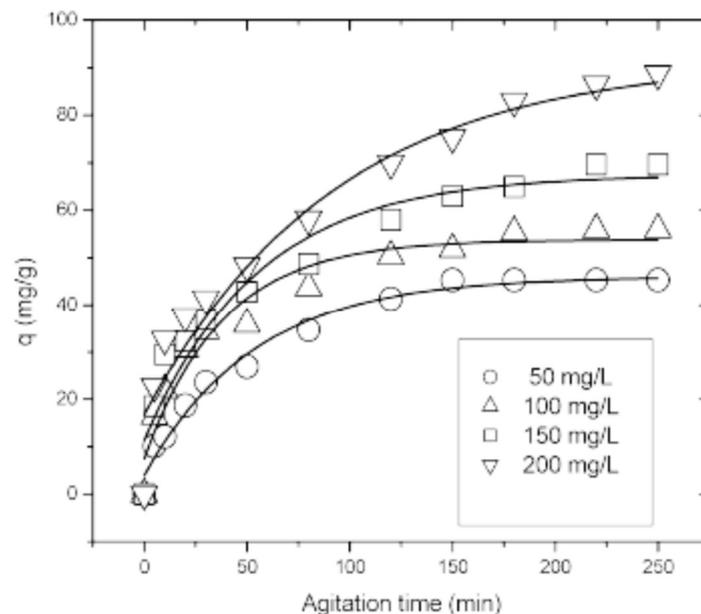


Figura 2.6.1. Efecto del tiempo de contacto para diferentes concentraciones de azul de metileno. Utilizando 4,0 g de carbón activo, con un tamaño de partícula de 0,425 mm a una temperatura de 28 °C. “Senthilkumaar S., Varadarajan P.R., Porkodi K. y Subbhuraam C.V. (2004).”

Puesto que entre valores de pH entre 5 y 10 unidades de pH la cinética apenas varía, no se tendrá en cuenta su influencia en el cálculo del tiempo de contacto. La temperatura tampoco se tendrá en cuenta al trabajar a temperatura ambiente el laboratorio.

Sin embargo, como se observa en la figura 2.6.1, a una concentración de 100 ppm, es necesario al menos 120 min de agitación. Además, hay que añadir más tiempo al utilizar bajas cantidades de carbón, esto se debe a que cuanto menor sea la superficie de contacto, más tardará el azul de metileno en adsorberse en el carbón. Por lo tanto, se requerirán 150 min para que el método se considere válido.

Una vez obtenida la concentración residual, se podrá calcular el índice de azul de metileno mediante la siguiente ecuación:

$$I_{AM} = \frac{(m_{AM0} - m_{AMres})}{m_{AMcarbon}} \quad (5)$$

Donde: I_{AM} = índice de azul de metileno;

m_{AM0} = masa de azul de metileno inicial (mg);

m_{AMres} = masa de azul de metileno residual (mg);

$m_{AMcarbon}$ = masa de carbón activo en polvo (g);

Puesto que la masa se puede calcular como la concentración por el volumen, modificamos la ecuación (5) en la siguiente:

$$I_{AM} = \frac{[AM]_0 - [AM]_{res}}{m_{AMcarbon}} \quad (6)$$

Donde: $[AM]_0$ = concentración inicial de azul de metileno (ppm);

$[AM]_{res}$ = concentración residual de azul de metileno (ppm);

V_{AM0} = volumen inicial de azul de metileno (L);

2.6.3 Material y reactivos

El material empleado es:

- Azul de metileno deshidratado.
- Vasos de precipitado de varios tamaños.
- Placa calefactora con agitador.
- Balanza analítica con una exactitud de $\pm 0,1$ mg (Figura 2.3.2).
- Filtros de pliegues de $8 \mu\text{m}$ de tamaño de poro y 18 cm de diámetro.



Figura 2.6.3. Espectrómetro de luz visible

- Embudo de cristal.
- Espectrofotómetro de luz visible cuya longitud de onda (λ) alcance los 662 nm (Figura 2.6.3).
- Cubeta de plástico de 1 cm.
- Matraz Erlenmeyer de 250 mL.
- Pipeta de 100 mL.

2.6.4 Método experimental

En primer lugar, se ha de preparar la solución de azul de metileno, para ello se pesarán 100 mg en un vaso de precipitado de 1L, a continuación, se añadirá agua destilada sin alcanzar el litro.

En una placa calefactora entre 40-60°C se dejará la solución de azul de metileno en agitación continua durante al menos 24 horas. Importante no llegar a la ebullición.

Una vez pasado el tiempo de agitación, se aforará en un matraz de 1L.

En el caso de tener muchas muestras de carbón activo a analizar se recomienda preparar el reactivo con 200 mg de azul de metileno en 2,00 litros de agua.

Una vez el reactivo está preparado se procederá a realizar la recta de calibrado: del reactivo se extraerán 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 6,0; 8,0 y 10,0 mL y se aforarán en matraces de 50 mL, obteniéndose 5 muestras de 0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 8,0; 12,0; 16,0 y 20 ppm.

Con ayuda del espectrofotómetro de luz visible a ($\lambda = 662$ nm) se miden las absorbancias para cada concentración. No se realizan puntos con mayor concentración al ver que a partir de 12,0 ppm la concentración y la absorbancia no se relacionaban de forma lineal.

Teniendo el reactivo de azul de metileno (100 ppm) y la recta de calibrado, se pesa el carbón activo en la balanza analítica entre 0,0450 y 0,0600 gramos de carbón activo en polvo. Si el carbón activo ha sido regenerado hace relativamente poco tiempo o es virgen, se pesará 0,0450-0,0500 g, en cambio si es un carbón activo gastado se pesará entre 0,0550 y 0,0600 g.

Se añaden 100 mL del reactivo de azul de metileno preparado en la muestra de carbón con una pipeta.

Se agita suavemente durante 20 min, tiempo en el que el carbón entra en equilibrio de adsorción con la solución de azul de metileno.

Se filtra por gravedad y se desechan los primeros 20-30 mL.

Se mide la absorbancia en el espectrofotómetro a $\lambda = 662$ nm de la muestra filtrada.

En caso de que el resultado no entre en la recta de calibrado, se repetirá el método. De forma que, si la concentración de azul de metileno supera los 12,0 ppm, se añadirá más carbón. Si no hay color azul en la muestra, se pesará menos carbón.

Una vez obtenidos las absorbancias, utilizando la recta de calibrado se calcularán las concentraciones, y haciendo uso de la ecuación (6), se hallará el índice de azul de metileno para cada muestra.

Se aconseja limpiar bien los materiales utilizados, puesto que el azul de metileno se incrusta fácilmente en el cristal, por ello, la mejor forma de limpiarlos es:

- Usar agua de red abundantemente repetidas veces.
- Añadir etanol 96º, agitar y sin tirarlo, añadir agua de red y volver a agitar.
- Tirar el etanol y limpiar con agua de red de nuevo.
- Acabar limpiando con agua destilada.

2.7 CONTENIDO EN CENIZAS

2.7.1 *Objetivo del método*

El objetivo del método trata de hallar la fracción másica en porcentaje de las cenizas de un carbón activo para determinar su calidad.

2.7.2 *Introducción teórica*

El método está basado en la UNE-EN 12902.

Un carbón activo de buena calidad ha de tener un contenido en cenizas de entre un 5 a un 10 %. Una regeneración excesiva, un mal uso o su desgaste en general aumenta la fracción másica de las cenizas, haciendo perder poder adsorbente al carbón. Es por ello que las cenizas son un elemento clave a la hora de analizar un carbón activo y determinar su vida útil restante.

El contenido en cenizas se determina por calcinación de la muestra hasta masa constante.

El contenido en cenizas (X_{cen}) se expresa como fracción másica del carbón activo seco, por lo que se calculará a partir de la expresión siguiente:

$$X_{cen}(\%) = \frac{m_{cen_final} - m_{cen_0}}{m_{cen_1} - m_{cen_0}} \cdot 100 \quad (7)$$

Donde, X_{cen} = la fracción másica del contenido en cenizas del carbón (%);

m_{cen_final} = masa del carbón más la cápsula después de la calcinación (g);

m_{cen_0} = masa de la cápsula (g);

m_{cen_1} = masa del carbón más la cápsula inicial (g);

2.7.3 Material y reactivos

Los materiales requeridos para realizar este experimento se muestran a continuación:



Figura 2.7.1. DeseCADOR



Figura 2.7.2. Mufla regulable con recirculación de aire

- Estufa regulable a $(150 \pm 5) \text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Mufla, con circulación de aire, regulable a $(650 \pm 25) \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 2.7.2).
- Cápsula de cerámica resistente a altas temperaturas.
- DeseCADOR (Figura 2.7.1).
- Balanza analítica, con una exactitud de $\pm 0.1 \text{ mg}$ (Figura 2.3.2).

2.7.4 Método experimental

Previamente a cualquier paso, se calcina la cápsula durante 1 hora en la mufla a $(650 \pm 25) \text{ }^{\circ}\text{C}$ para eliminar posibles impurezas que puedan generar errores en los resultados.

Acto seguido, se enfría la cápsula en el desecador.

Una vez la cápsula se encuentra a temperatura ambiente, se pesa la cápsula vacía en la balanza analítica (m_{cen_0}).

Luego, se introduce aproximadamente 1 g de carbón activo granulado y se pesa en la balanza analítica (m_{cen_1}).

Se calcina la cápsula con el carbón en la mufla a $(650 \pm 25) \text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta que se alcance la masa constante. Este proceso puede durar entre 3 y 16 horas dependiendo de la mufla, la muestra o el tamaño de partícula.

La cápsula se deja enfriar en el desecador hasta que alcance la temperatura ambiente. Hay que tener cuidado en este paso pues el contacto de la cápsula caliente con las paredes del desecador pueden estropearlo.

Se pesa la cápsula calcinada fría en la balanza analítica obteniendo (m_{cen_final})

Con todos los datos obtenidos, se procede a resolver la ecuación (7), hallando el contenido en cenizas de la muestra de carbón activo.

CAPÍTULO 3 – RESULTADOS Y CONCLUSIONES

3.1 RESULTADOS DE LA DENSIDAD APARENTE

El método de la densidad aparente se realizó solamente a los carbones de Alta 1 y a los carbones comerciales “CYJ”. Con los datos obtenidos se calcularon las densidades utilizando la ecuación 1. Con las densidades calculadas generamos las Tablas 3.1.1 y 3.1.2:

Tabla 3.1.1. Densidad de Alta 1			
FECHA	FILTRO	FECHA	DENSIDAD (g/mL)
may-17	F7-A1	LA PRESA ALTA 1	0,53
	F8-A1		0,56
	F9-A1		0,56
	F10-A1		0,57
	F11-A1		0,56
	F12-A1		0,58
	F13-A1		0,62
	F14-A1		0,62

En la Tabla 3.1.1 se observan las densidades aparentes de los filtros Alta 1.

Tabla 3.1.2. Densidad carbones comerciales CYJ					
FECHA	FILTRO	FECHA	DENSIDAD EXP (g/mL)	DENSIDAD T ^a (g/mL)	ERROR (%)
jul-17	CYJ 20170213-1	COMERCIAL	0,67	0,42	58,33
	CYJ 20170213-2		0,66	0,42	57,86
	CYJ 20170215-1		0,63	0,42	48,94
	CYJ 20170215-2		0,55	0,42	29,31
	CYJ 20161228-1		0,70	0,41	69,25
	CYJ 20161228-2		0,65	0,41	57,63

Las densidades de los carbones comerciales "CYJ" están descritos en la Tabla 3.1.2, en ella también se muestra la densidad aparente dada por la casa comercial (Anexo II). Como se aprecia, la diferencia de ambas densidades varía hasta alcanzar errores superiores al 50%. Por este motivo se repitió la prueba, pero lavando el carbón.

Los datos de los carbones comerciales se exponen en la Tabla 3.1.3:

Tabla 3.1.3. Densidad carbones comerciales CYJ lavado					
FECHA	FILTRO	FECHA	DENSIDAD EXP (g/mL)	DENSIDAD Tª (g/mL)	ERROR (%)
jul-17	CYJ 20170213-1	COMERCIAL	0,64	0,42	52,38
	CYJ 20170213-2		0,66	0,42	57,14
	CYJ 20170215-1		0,60	0,42	41,84
	CYJ 20170215-2		0,56	0,42	32,39
	CYJ 20161228-1		0,61	0,41	47,70
	CYJ 20161228-2		0,60	0,41	45,28

Como se observa en la Tabla 3.1.3, los errores, a pesar de ser menores que en la Tabla 3.1.2, siguen demasiado altos.

Puede ocurrir por tres motivos: por una parte, el método no es correcto y por lo tanto los datos de densidades aparentes tomados no son válidos y por lo tanto es necesario buscar una alternativa; también puede ocurrir que los datos facilitados por la casa comercial no sean correctos, o bien, las muestras ofrecidas no son representativas.

Para descartar opciones la empresa se plantea adquirir un aparato especializado para medir las densidades aparentes como el que se muestra en la Figura 3.1.1. explicado en el Anexo I.

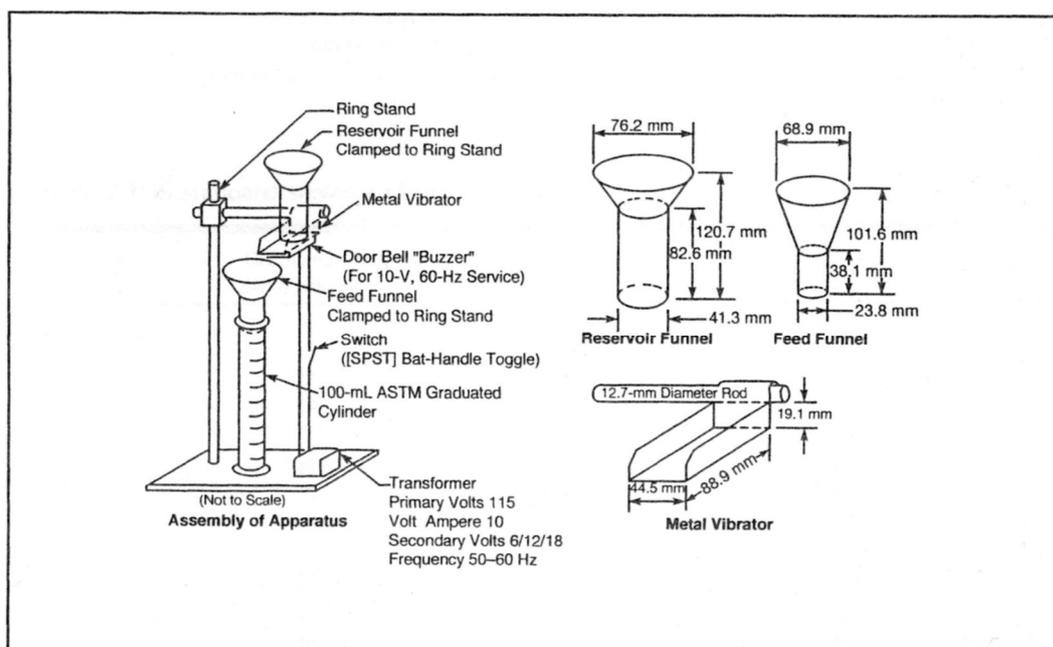


Figura 3.1.1. Instrumentación especializada para calcular la densidad aparente.

A pesar de las grandes diferencias entre densidades, este parámetro tan solo cobra importancia durante su compra e instalación, por lo que no representa un problema demasiado grave a corto plazo, pero convendría instalar el método de forma que se puedan encontrar discrepancias con las ofrecidas con la casa comercial.

3.2 RESULTADOS DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA

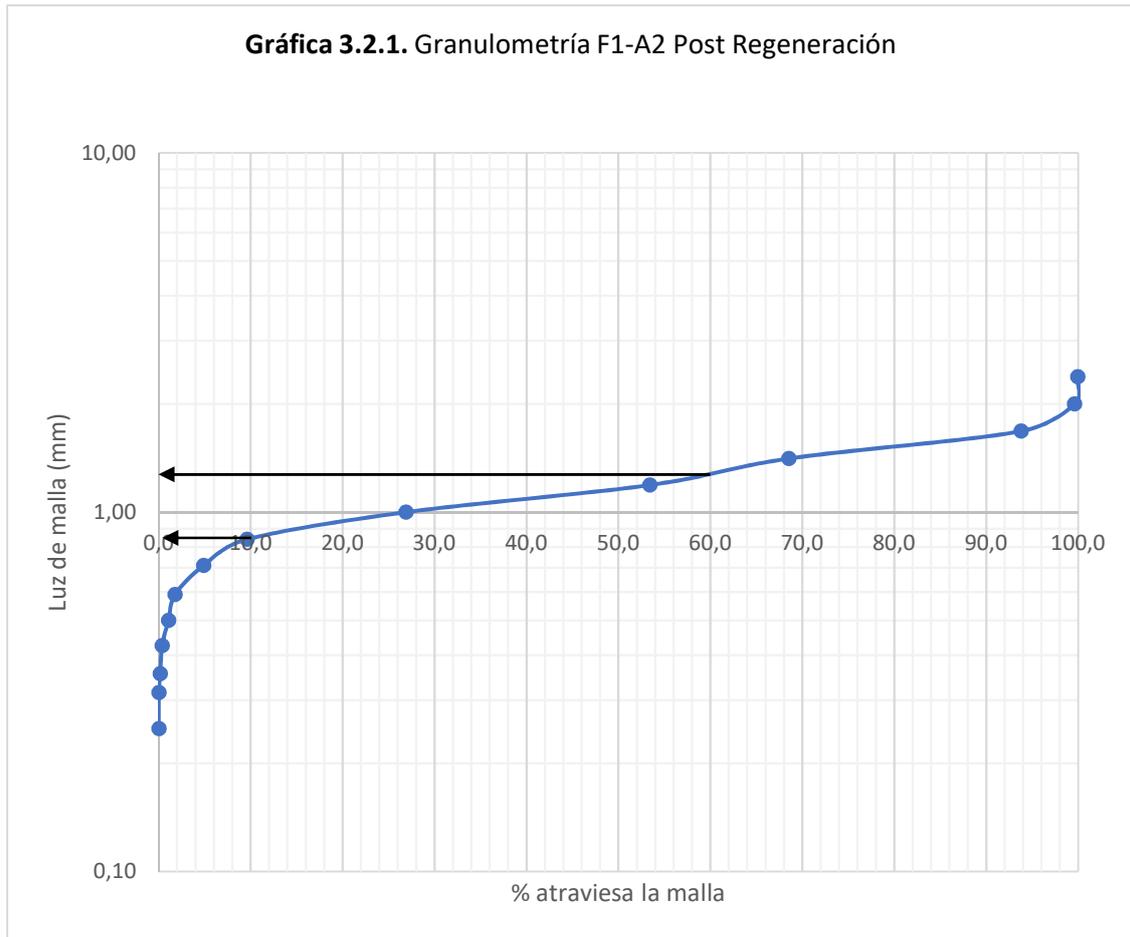
Se realizarán comparaciones entre distintos carbones para observar su variación. En primer lugar, se calculará la talla efectiva y la correspondiente al 60% para hallar el coeficiente de uniformidad del carbón del Filtro 1 Alta 2. Los datos obtenidos se observan en la Tabla 3.2.1, calculados a su vez el porcentaje retenido y que atraviesa cada malla:

Muestra pesada = 87,114 g

Tabla 3.2.1. Granulometría F1-A2 Post Regeneración				
Ref	masa retenida	% retenido en la malla	% atraviesa la malla	Luz de malla Diámetro (mm)
A	0,0560	0,1	99,9	2,38
B	0,2870	0,3	99,6	2,00
C	5,0690	5,8	93,8	1,68
D	22,0150	25,3	68,5	1,41
E	13,1490	15,1	53,4	1,19
F	23,1140	26,5	26,9	1,00
G	15,0650	17,3	9,6	0,84
H	4,1160	4,7	4,9	0,71
I	2,6840	3,1	1,8	0,59
J	0,6390	0,7	1,1	0,50
H	0,5900	0,7	0,4	0,43
L	0,1940	0,2	0,2	0,36
M	0,1220	0,1	0,0	0,32
N	0,0030	0,0	0,0	0,25
		0,0	0,0	Fondo
TOTAL	87,1030			

Este método presenta ciertas pérdidas de masa, sin embargo, son pérdidas pequeñas e irrelevantes.

A partir de la Tabla 3.2.1 se crea la Gráfica 3.2.1 relacionando el diámetro de la luz de malla con el porcentaje de carbón que la atraviesa:



Con la gráfica X, se hallan la talla efectiva (10%) y la correspondiente al 60%

Talla efectiva (10 %) = 0,84 mm

Talla correspondiente al 60 % = 1,23 mm

Con estos dos valores obtenemos el coeficiente de uniformidad (CU)

$$CU = 1,23/0,84 = 1,46$$

El coeficiente de uniformidad del carbón se encuentra dentro del rango aconsejable.

En la Tabla 3.2.2 se muestran los datos históricos de diferentes tipos de carbón:

Tabla 3.2.2. Tamaño partícula comparativa					
FECHA	PLANTA	MUESTRA	TALLA 10 % (mm)	TALLA 60 % (mm)	C. U.
oct-16	LA PRESA ALTA 2	F1-A2	0,84	1,23	1,46
dic-15		F5-A2-1	0,87	1,22	1,40
		F5-A2-2	0,97	1,42	1,46
X	COMERCIAL	AQUA SORB	1,11	1,60	1,44
		NORIT	0,82	1,31	1,60
		AC32345	0,86	1,37	1,59
		VIRGEN NORIT	0,82	1,31	1,60
		XA88GY	0,85	1,36	1,60
nov-15	PICASSENT	F3	1,10	1,55	1,41
		F4	1,05	1,55	1,48
		F5	0,97	1,40	1,44
		F6	1,02	1,48	1,45
		F12	1,14	1,60	1,40
		F13	1,09	1,55	1,42
		F14	1,05	1,48	1,41

Se puede observar la poca variación del C.U. entre los distintos carbones, quizás, cabría destacar el ligero aumento de este valor en los carbones nuevos comerciales, los cuales se sitúan alrededor del 1,60 mientras que los carbones de planta se mantienen entre los 1,40 y 1,45. Este pequeño aumento se observa también en la columna Talla 10 % de la Tabla 3.2.2, indicando que todavía mantienen partículas de carbón activo en polvo. Esto se debe al arrastre del agua sufrido por las partículas más pequeñas del carbón de los filtros de las plantas, mientras que los carbones comerciales aún mantienen carbón activo en polvo entre los granos. Posiblemente se haya formado el polvo durante su transporte y activación.

Cabe destacar la irrelevante diferencia entre el coeficiente de uniformidad de un carbón regenerado (F1-A2 oct/16) con el carbón saturado (F5-A2 dic/15). Como ya se ha explicado, el agua ha arrastrado todas aquellas partículas de carbón activo en polvo que se hayan podido formar durante la regeneración. Por consiguiente, se observa que el grano no pierde ni gana tamaño apreciable durante la regeneración. Por teoría, al regenerar un carbón éste debería perder tamaño, sin embargo, al ser mezclado con carbón nuevo, las tallas de partículas medias se han podido compensar.

También se observa una variación importante entre los tamaños de grano de los carbones de la ETAP La Presa con los de la ETAP de Picassent, a pesar de tener un coeficiente de uniformidad similar. A pesar de formar parte de la misma empresa, las ETAP adquieren los carbones activos de manera independiente, por lo que es normal que exista una diferencia de tamaños entre los carbones de ambas plantas de tratamientos de aguas potables.

3.3 RESULTADOS DEL ÍNDICE DE ADSORCIÓN DE YODO

Los resultados obtenidos en el laboratorio durante la realización de este TFG se muestran en las Tablas 3.3.1 y 3.3.2.

Tabla 3.3.1. Datos experimentales obtenidos durante la realización del ensayo del índice de yodo para carbones de la Línea 1 de los filtros de la ETAP la presa.				
FECHA	PLANTA	MUESTRA	m_{IY_carbon}(g)	V_{tio} (mL)
may-17	LA PRESA ALTA 1	F7-A1-1	1,5124	12,2
		F7-A1-2	1,5078	12,3
		F8-A1-1	1,5256	11,5
		F8-A1-2	1,5140	11,8
		F9-A1-1	1,5126	10,9
		F9-A1-2	1,4858	10,1
		F10-A1-1	1,5266	12,2
		F10-A1-2	1,5097	12,0
		F11-A1-1	1,8261	11,6
		F11-A1-2	1,8496	11,2
		F12-A1-1	1,5968	13,6
		F12-A1-2	1,6156	13,2
		F13-A1	1,6040	11,4
		F14-A1	1,6082	11,8

En la Tabla 3.3.1 se muestran los datos experimentales que se usarán para obtener el índice de yodo de la línea Alta 1.

Tabla 3.3.2. Datos experimentales obtenidos durante la realización del ensayo del índice de yodo para carbones de los filtros de la ETAP de Picassent.				
FECHA	PLANTA	MUESTRA	m_{IY_carbon}(g)	V_{tio} (mL)
jun-17	PICASSENT	F3-der	1,4753	12
		F3-izq	1,46	11,9
		F4	1,4316	11,9
		F5	1,4274	8,7
		F6	1,2871	13,4
		F12-der	1,468	13,6
		F12-izq	1,4429	12,4
		F13	1,4468	11,7
		F14	1,4445	12,4
		F15	1,3065	12,2

Utilizando las ecuaciones (3) y (4) modificamos las Tablas 3.3.1 y 3.3.2, calculamos el índice de yodo y la normalidad de nuestros datos obtenidos experimentalmente:

Tabla 3.3.3. Índice de yodo Alta 1						
FECHA	PLANTA	MUESTRA	$m_{IV_carbon}(g)$	$V_{tío}(mL)$	N_{yodo}	I.YODO (mg/g)
may-17	LA PRESA ALTA 1	F7-A1-1	1,5124	12,2	0,0244	599
		F7-A1-2	1,5078	12,3	0,0246	599
		F8-A1-1	1,5256	11,5	0,0230	611
		F8-A1-2	1,5140	11,8	0,0236	608
		F9-A1-1	1,5126	10,9	0,0218	631
		F9-A1-2	1,4858	10,1	0,0202	664
		F10-A1-1	1,5266	12,2	0,0244	594
		F10-A1-2	1,5097	12,0	0,0240	605
		F11-A1-1	1,8261	11,6	0,0232	508
		F11-A1-2	1,8496	11,2	0,0224	510
		F12-A1-1	1,5968	13,6	0,0272	537
		F12-A1-2	1,6156	13,2	0,0264	539
		F13-A1	1,6040	11,4	0,0228	584
		F14-A1	1,6082	11,8	0,0236	573

Los resultados obtenidos en la Tabla 3.3.3 muestran la capacidad de adsorción de los microporos del carbón activo de los filtros de la Línea 1 de La Presa. Se puede observar que los índices de yodo obtenidos son relativamente bajos, pero no sería necesario regenerarlos ni cambiarlos todavía. Los valores se sitúan entre los 660 y los 510 mg/g, hasta no alcanzar un índice de yodo inferior a los 450 mg/g, se considera que el carbón aún no se ha saturado.

Tabla 3.3.4. Índice de yodo Picassent						
FECHA	PLANTA	MUESTRA	$m_{IV_carbon}(g)$	$V_{tío}(mL)$	N_{yodo}	I.YODO (mg/g)
jun-17	PICASSENT	F3-der	1,4753	12	0,024	619
		F3-izq	1,46	11,9	0,0238	628
		F4	1,4316	11,9	0,0238	641
		F5	1,4274	8,7	0,0174	731
		F6	1,2871	13,4	0,0268	671
		F12-der	1,468	13,6	0,0272	584
		F12-izq	1,4429	12,4	0,0248	623
		F13	1,4468	11,7	0,0234	642
		F14	1,4445	12,4	0,0248	623
		F15	1,3065	12,2	0,0244	694

Por otra parte, los valores obtenidos sobre el índice de yodo de la ETAP de Picassent, provistos en la Tabla 3.3.4, muestran un mejor estado de sus filtros en comparación con los de la Línea 1 de La Presa.

Sin embargo, para realizar un estudio más amplio sobre la capacidad de adsorción de los carbones utilizados en la empresa, es conveniente estudiar su variación respecto del tiempo.

Utilizando los datos históricos de los índices de yodo de las dos ETAP:

Tabla 3.3.5. Índice de yodo histórico La Presa Alta 1					
FILTRO	FECHA	I. YODO (mg/g)	FILTRO	FECHA	I. YODO (mg/g)
F7-A1	dic-15	752	F11-A1	dic-15	583
	mar-16	742		mar-16	596
	jul-16	769		jul-16	659
	may-17	599		may-17	509
F8-A1	dic-15	763	F12-A1	dic-15	608
	mar-16	613		mar-16	612
	jul-16	734		jul-16	648
	may-17	610		may-17	538
F9-A1	dic-15	744	F13-A1	dic-15	617
	mar-16	736		mar-16	628
	jul-16	760		jul-16	654
	may-17	648		may-17	584
F10-A1	dic-15	758	F14-A1	dic-15	601
	mar-16	707		mar-16	684
	jul-16	722		jul-16	665
	may-17	600		may-17	573

En la Tabla 3.3.5 se muestran los datos del índice de yodo obtenidos desde diciembre del 2015 de la línea Alta 1 de la ETAP La Presa.

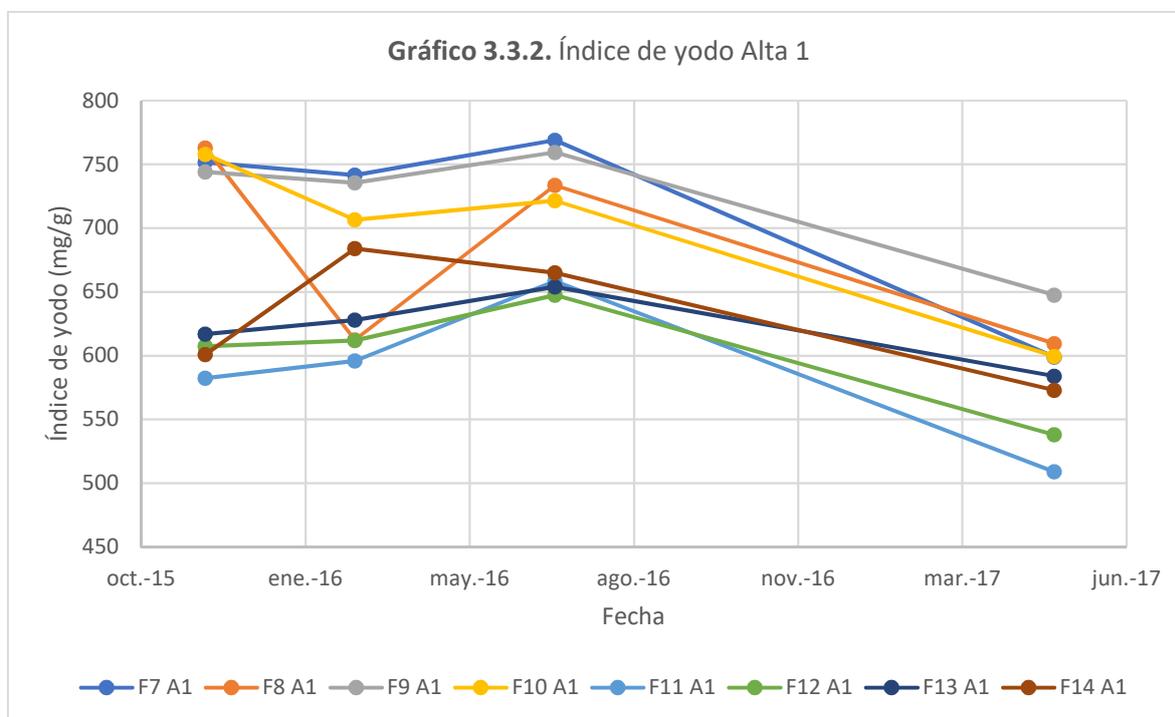
A continuación, se muestran los índices de yodo de la línea Alta 2. Esta línea es la primera de la planta que empezó a utilizar filtros de carbón activo. Es por ello por lo que existen datos desde antes que la línea Alta 1 o la ETAP de Picassent. Los datos se muestran en la Tabla 3.3.6:

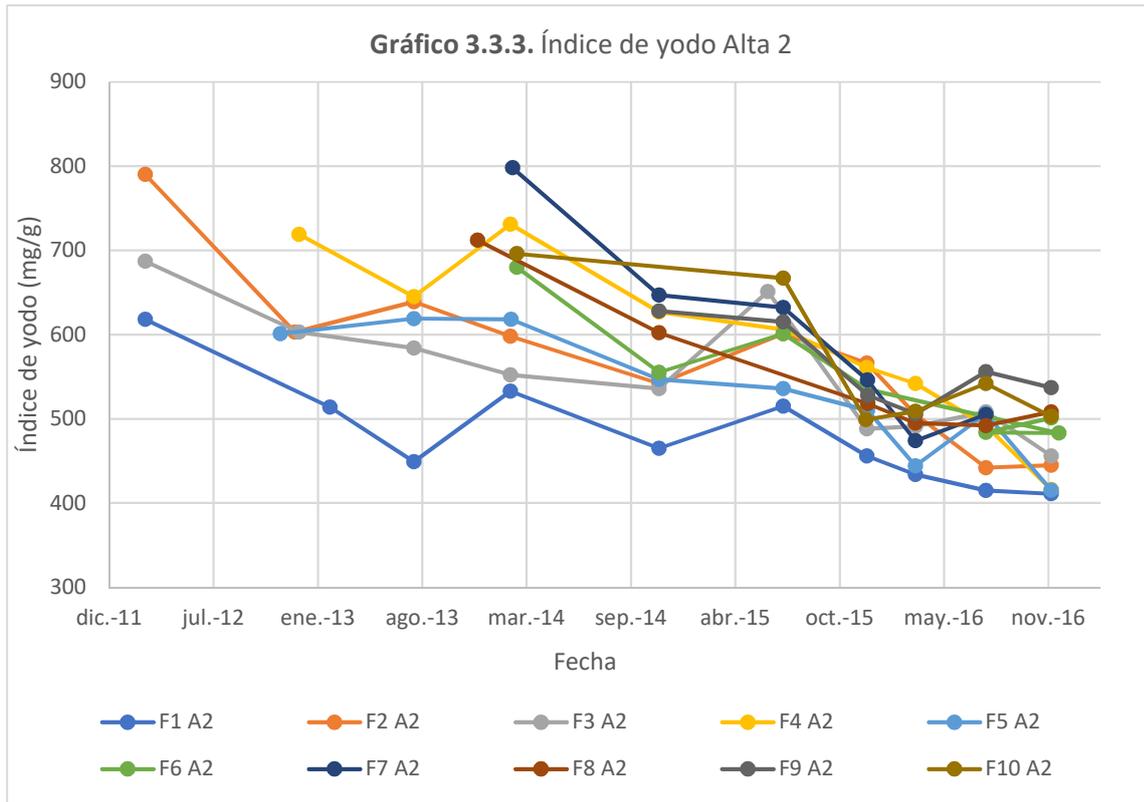
Tabla 3.3.6. Índice de yodo histórico La Presa Alta 2					
FILTRO	FECHA	I. YODO (mg/g)	FILTRO	FECHA	I. YODO (mg/g)
F1-A2	mar.-12	618	F2-A2	mar.-12	790
	feb.-13	514		dic.-12	603
	jul.-13	449		jul.-13	639
	ene.-14	533		ene.-14	598
	nov.-14	465		nov.-14	542
	jul.-15	515		jul.-15	601
	dic.-15	456		dic.-15	566
	mar.-16	434		mar.-16	505
	jul.-16	415		jul.-16	442
	dic.-16	411		dic.-16	445
F3-A2	mar.-12	687	F4-A2	dic.-12	719
	dic.-12	603		jul.-13	645
	jul.-13	584		ene.-14	731
	ene.-14	552		nov.-14	627
	nov.-14	536		jul.-15	606
	jun.-15	651		dic.-15	561
	dic.-15	488		mar.-16	542
	mar.-16	491		jul.-16	492
	jul.-16	508		dic.-16	416
	dic.-16	456			
F5-A2	nov.-12	601	F6-A2	feb.-14	680
	jul.-13	619		nov.-14	555
	ene.-14	618		jul.-15	601
	nov.-14	547		dic.-15	535
	jul.-15	536		dic.-16	483
	dic.-15	510		jul.-16	484
	mar.-16	444		dic.-16	501
	jul.-16	506			
	dic.-16	416			
F7-A2	feb.-14	798	F8-A2	nov.-13	712
	nov.-14	647		nov.-14	602
	jul.-15	632		dic.-15	518
	dic.-15	546		mar.-16	495
	mar.-16	474		jul.-16	492
	jul.-16	505		dic.-16	508
	dic.-16	506			
F9-A2	nov.-14	628	F10-A2	feb.-14	696
	jul.-15	615		jul.-15	667
	dic.-15	528		dic.-15	499
	mar.-16	506		mar.-16	509
	jul.-16	556		jul.-16	542
	dic.-16	537		dic.-16	503

Tabla 3.3.7. Índice de yodo histórico Picassent					
FILTRO	FECHA	I. YODO (mg/g)	FILTRO	FECHA	I. YODO (mg/g)
F3	dic-15	720	F6	dic-15	841
	abr-16	703		abr-16	797
	oct-16	678		oct-16	671
	jun-17	624		jun-17	671
F4	dic-15	730	F12	dic-15	713
	abr-16	728		abr-16	717
	oct-16	732		oct-16	721
	jun-17	641		jun-17	604
F5	dic-15	754	F13	dic-15	808
	abr-16	767		abr-16	746
	oct-16	786		oct-16	717
	jun-17	731		jun-17	642

Por último, en la Tabla 3.3.7 se exponen los datos de índice de yodo de la ETAP de Picassent.

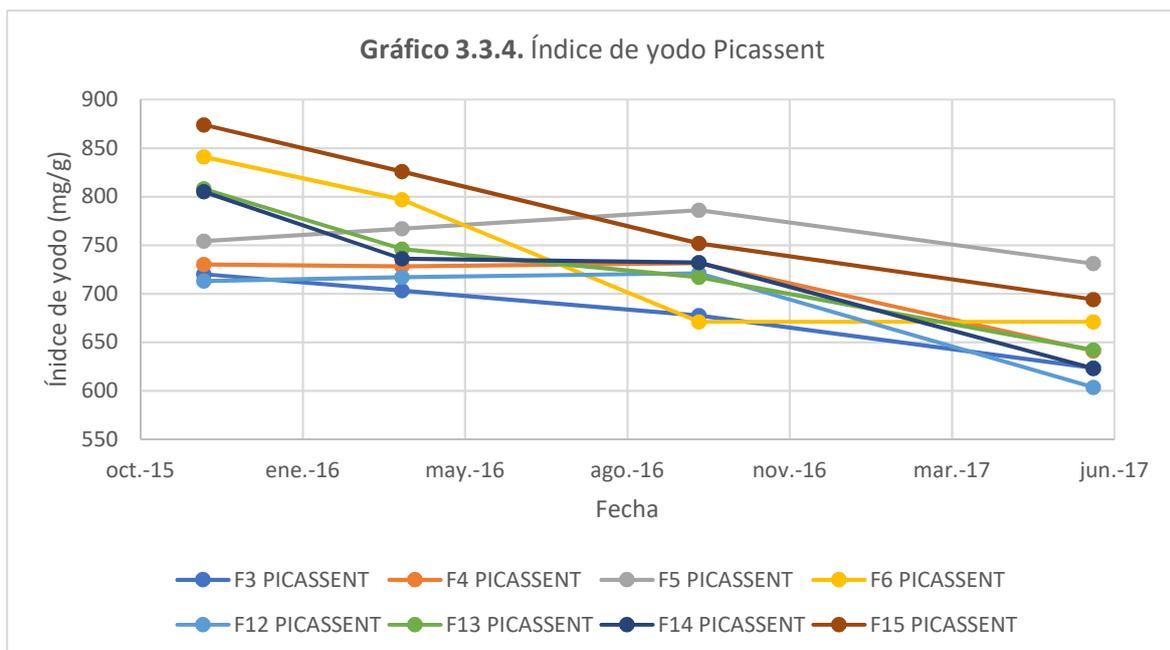
Utilizando la Tabla 3.3.5 construimos la Gráfica 3.3.2, de forma que se aprecia de manera más visual la evolución del índice de yodo de Alta 1.





De la misma forma que se construye el Gráfico 3.3.2, generamos el Gráfico 3.3.3 con los datos de la Tabla 3.3.6 para representar la evolución del índice de yodo respecto el tiempo en la línea Alta 2.

Exactamente igual para la ETAP de Picassent, mediante la Tabla 3.3.7, construimos la gráfica 3.3.4:



De los datos históricos reflejados en las Gráficas 3.3.3 y 3.3.4 se puede deducir como el índice de yodo desciende de una manera lineal hasta alcanzar aproximadamente los 450 mg/g, punto en el cual, los datos obtenidos disminuyen a una velocidad mucho menor. Este fenómeno se da al haberse saturado los microporos del carbón activo.

Puesto que cuanto más saturados están los microporos, menos accesibles a éstos son a las sustancias a eliminar, por lo cual, se necesitará aumentar el tiempo de contacto del carbón con el agua para obtener resultados similares en la etapa de filtración; puesto que esto no es posible, conviene o bien regenerar el carbón de los filtros o sustituirlo por un carbón virgen. Dependiendo de otros parámetros, como es el tamaño de las partículas y el contenido en cenizas, se decidirá cuál de las dos soluciones es más conveniente.

Como se observa en el Gráfico 3.3.3, en el caso de los filtros de la Línea 2 de la ETAP La Presa, el carbón ya está saturado. Sin embargo, el carbón ya se regeneró en los últimos meses. A pesar de que aún no hay datos sobre el índice de yodo del carbón regenerado.

También se puede observar como los filtros de Picassent mantienen mayor linealidad que los de Alta 2, puesto que Picassent trata exclusivamente agua del canal Júcar-Turia, mientras que Alta 2 varía entre el río Turia y el canal. Esta variación de agua de toma genera la pérdida de linealidad de la evolución de los filtros, puesto que las aguas no tienen las mismas características, por lo que el carbón activo adsorberá más o menos sustancias dependiendo del agua tomada.

En cambio, en la Gráfica 3.3.2, se observan ciertas incongruencias en los primeros puntos medidos. El índice de yodo se mantiene prácticamente estable, incluso en leve ascenso hasta julio de 2016, fecha en la que alcanza un punto máximo. En un principio se pensó en la posibilidad de que se hubiese añadido carbón activo nuevo para contrarrestar las pérdidas que se producen durante su lavado. Sin embargo, no se repone el carbón activo hasta su saturación por lo que el error posiblemente sea fruto de un fallo en las analíticas. Además, Alta 1 es una línea de la planta que funciona de forma irregular, por lo que el volumen de agua filtrada no es constante, por lo que su evolución se vuelve irregular y poco representativa. Aunque conviene seguir caracterizando el carbón de forma que se pueda observar su estado.

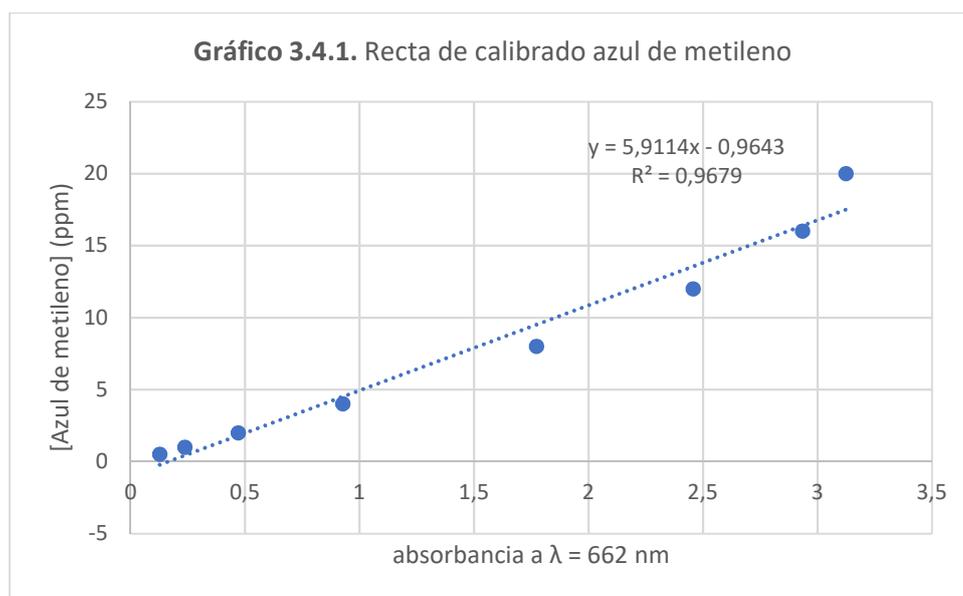
3.4 RESULTADOS DEL ÍNDICE DE AZUL DE METILENO

Tras la realización del método del índice de azul de metileno, se representarán sus resultados, conclusiones y, en este caso, su comparación con datos teóricos, puesto que se trata de un ensayo nuevo para el laboratorio de EMIVASA.

En primer lugar, se realiza la recta de calibrado. En la Tabla 3.4.1 se observan las absorbancias para cada concentración conocida de azul de metileno:

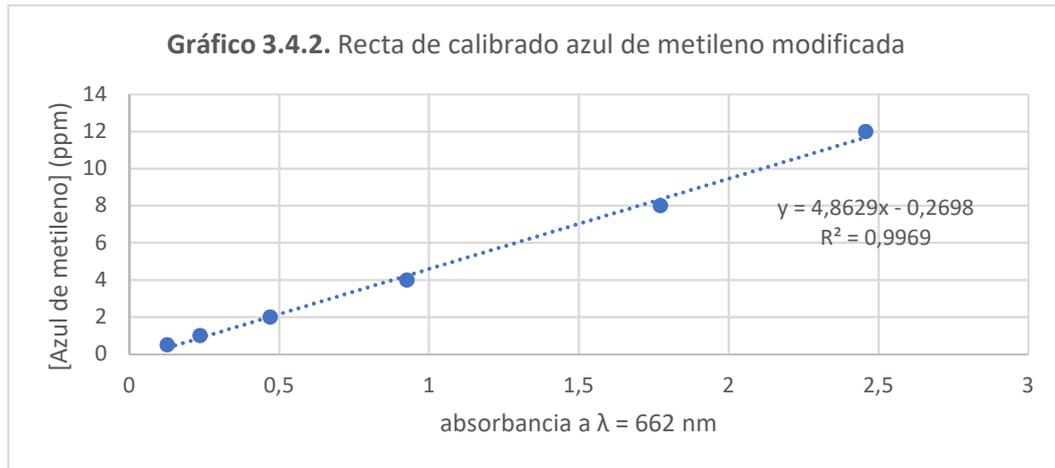
Tabla 3.4.1. Recta de calibrado	
Abs	[Azul Metileno] (ppm)
0,127	0,5
0,236	1
0,470	2
0,926	4
1,772	8
2,457	12
2,935	16
3,124	20

A partir de la Tabla 3.4.1, generamos la Gráfica 3.4.1, de forma que podamos obtener la ecuación de la línea de tendencia:



Se puede observar en la Gráfica 3.4.1 como la tendencia de la absorbancia no es lineal respecto de la concentración de azul de metileno, puesto que R^2 no es un valor demasiado alto.

Se rehízo la recta de calibrado dos veces más, por si el error era de carácter humano o no. Puesto que se obtenían valores muy similares, se llegó a la conclusión de que a altas concentraciones la relación absorbancia-concentración de azul de metileno no es completamente lineal, posiblemente, al acercarse a los límites de absorbancia medibles por el espectrofotómetro, éste pierda precisión. Es por ello, que se decidió eliminar los valores superiores a 12 ppm para disminuir el error, quedando de esta forma, la Gráfica 3.4.2:



Como se aprecia en la Gráfica 3.4.2, la relación absorbancia-concentración de azul de metileno es prácticamente lineal, con un $R^2 > 0,99$. De esta forma, se procederá a realizar el ensayo con carbones nuevos, cuyos índices de azul de metileno son conocidos. De esta forma, se puede comparar los resultados experimentales obtenidos con el método presentado con los valores teóricos facilitados por la casa comercial (Anexo II)

Los datos experimentales obtenidos se muestran en la Tabla 3.4.2

Tabla 3.4.2. Datos experimentales obtenidos durante el ensayo del índice de azul de metileno			
MUESTRA	PLANTA	$m_{AMcarbon}$ (g)	Absorbancia
CYJ20170215-1	CARBÓN COMERCIAL	0,0576	0,286
		0,0428	0,222
CYJ20170215-2		0,0616	0,067
		0,0459	0,555
CYJ20161228-1		0,0515	0,937
		0,0644	0,025
		0,0512	0,422
CYJ20161228-2		0,049	1,183
		0,049	0,814
		0,0594	0,091
F3 IZQ	PICASSENT	0,0537	2,013
F3 DER		0,0541	1,954
F5-A1	LA PRESA ALTA 1	0,0591	2,121
F6-A1		0,0676	1,69
F8-A2-1	LA PRESA ALTA 2	0,0551	2,311
F8-A2-2		0,0514	2,979
F4-A2-1		0,0628	1,546
F4-A2-2		0,0601	1,333

Haciendo uso de la ecuación de la línea de tendencia de la Gráfica 3.4.2, calculamos la concentración de azul de metileno de las muestras de carbón mostradas en la Tabla 3.4.2.

Una vez con todos los datos necesarios ya obtenidos, se calcula el índice de azul de metileno, usando la ecuación (6). Los cálculos se reflejan en la Tabla 3.4.3:

Tabla 3.4.3. Índice de azul de metileno calculado en carbones comerciales									
MUESTRA	PLANTA	$m_{AM_{carbon}}$ (g)	Absorbancia	$[AM]_0$ (ppm)	$[AM]_{res}$ (ppm)	V_{AM0} (L)	Índice de AM (mg/g)	VALOR Tº	ERRO R (%)
CYJ 20170215 1	CARBÓN COMERCIAL	0,0546	0,276	100	1,07	0,1	181	202	10,30
		0,0428	1,156	100	5,35	0,1	221	202	9,48
CYJ 20170215 2		0,0616	0,067	100	0,06	0,1	162	202	19,68
		0,0459	0,555	100	2,43	0,1	213	202	5,23
CYJ 20161228 1		0,0515	0,937	100	4,29	0,1	186	203	8,45
		0,0644	0,025	100	-0,15	0,1	156	203	23,39
		0,0512	0,422	100	1,78	0,1	192	203	5,50
CYJ 20161228 2		0,0490	1,183	100	5,48	0,1	193	203	4,98
		0,0490	0,814	100	3,69	0,1	197	203	3,18
		0,0594	0,091	100	0,17	0,1	168	203	17,21

Los valores en rojo de la Tabla 3.4.3 son aquellos cuyas absorbancias no se encuentran dentro de la recta de calibrado, y como se aprecia, los errores relativos entre los valores experimentales y teóricos del índice de azul de metileno sobrepasan el 15% en estos casos. Por lo tanto, tan solo se tendrán en cuenta, aquellos valores de absorbancia obtenidos que se encuentren entre 0,127 y 2,457.

Una vez validado el método planteado, se realizaron unas pocas muestras significativas de los carbones de filtros de las tres líneas diferentes. Los datos se muestran en la Tabla 3.4.4, ya calculados mediante la recta de calibrado y la ecuación (6).

Tabla 3.4.4. Índice de azul de metileno y yodo calculado en carbones de planta								
MUESTRA	PLANTA	$m_{AM_{carbon}}$ (g)	Absorbancia	$[AM]_0$ (ppm)	$[AM]_{res}$ (ppm)	V_{AM0} (L)	Índice de AM (mg/g)	Í. YODO (mg/g)
F3 IZQ	PICASSENT	0,0537	2,013	100	9,52	0,1	168	628
F3 DER		0,0541	1,954	100	9,23	0,1	168	624
F5-A1		0,0591	2,121	100	10,04	0,1	152	731
F6-A1		0,0676	1,69	100	7,95	0,1	136	671
F8-A2-1	LA PRESA ALTA 2	0,0551	2,311	100	10,97	0,1	162	511
F8-A2-2		0,0514	2,979	100	14,22	0,1	167	505
F4-A2-1		0,0628	1,546	100	7,25	0,1	148	438
F4-A2-2		0,0601	1,333	100	6,21	0,1	156	394

Los índices de azul de metileno de los carbones de las distintas plantas se muestran en la Tabla 3.4.4. Como se observa, no existe una relación directa entre ambos índices, es por ello, que se vuelve fundamental la obtención del índice de azul de metileno en la planta, ya que la saturación de los microporos es independiente de los macroporos.

Además, sería conveniente realizar este método a lo largo de la vida útil del carbón activo para obtener el valor de saturación de los macroporos. El mecanismo debería ser el mismo que en el caso de los microporos con el índice de yodo: una vez el descenso del índice de azul de metileno comience a ralentizarse, se entendería que el carbón posee sus macroporos saturados.

3.5 RESULTADOS DEL CONTENIDO EN CENIZAS

Los datos obtenidos en el laboratorio sobre contenido en cenizas de los carbones activos se muestran en la Tabla 3.5.1:

Tabla 3.5.1. Datos experimentales del contenido en cenizas (parte 1)					
FECHA	MUESTRA	PLANTA	masa cápsula (g)	masa cápsula + masa seca (g)	masa cápsula + masa calcinada (g)
may-17	f8 a1 I	LA PRESA ALTA 1	65,0062	66,3632	65,1545
	f8 a1 II		57,0551	58,5158	57,2424
	F9 A1 I		62,6445	64,0328	62,7938
	F9 A1 II		63,6692	64,6760	63,8034
	F10 A1 I		63,7177	64,8181	63,8659
	F10 A1 II		56,8361	58,0159	56,9711
	F12 A1 I		55,0628	56,2628	55,2442
	F12 A1 II		53,7367	54,8361	53,9325
	F13 A1		54,8267	55,8558	54,9658
	F14 A1		58,2525	59,2808	58,3953
	F7 A1 I		56,8424	57,9012	56,9890
	F7 A1 II		63,6677	64,6950	63,8079
	F11 A1 I		62,6477	63,6370	62,8314
	F11 A1 II		57,0645	58,0934	57,2487

Tabla 3.5.1. Datos experimentales del contenido en cenizas (parte 2)

FECHA	MUESTRA	PLANTA	masa cápsula (g)	masa cápsula + masa seca (g)	masa cápsula + masa calcinada (g)
jun-17	F3 der	Picassent	53,9697	55,3535	54,1439
	F3 izq		55,6305	56,7577	55,7708
	F4		52,9425	53,9262	53,0724
	F5		55,0785	56,1151	55,1395
	F6		65,0104	66,1476	65,0738
	F12 der		54,8505	55,9568	54,9968
	F12 izq		56,8480	57,9913	57,0302
	F13		63,7224	64,9931	63,8888
	F14		89,9619	91,7218	90,0497
	F15		92,7900	93,9163	92,8582
	CYJ-1	COMERCIAL	116,7216	118,1908	116,8024
	CYJ-2		79,0936	80,0644	79,1378
	CYJ-1		118,7747	120,0780	118,8175
	CYJ-2		87,7549	88,9178	87,8223
	CYJ-1		69,7955	71,2273	69,8547
	CYJ-2		117,4088	118,4155	117,4681

Una vez tomados los datos de la Tabla 3.5.1 (parte 1 y parte 2), calculamos el contenido en cenizas de los carbones, tanto de la ETAP de Picassent, como los de la línea Alta 1 de la ETAP La Presa.

Para ello, haremos uso de la ecuación (7). De esta manera, construimos la Tabla 3.5.2 mostrada a continuación:

Tabla 3.5.2. Contenido en cenizas						
FECHA	MUESTRA	PLANTA	m. cápsula (g)	m. cápsula + m.seca (g)	m.cápsula + m.calcinada (g)	CENIZAS (%)
may-17	f8 a1 I	LA PRESA ALTA 1	65,0062	66,3632	65,1545	10,9
	f8 a1 II		57,0551	58,5158	57,2424	12,8
	F9 A1 I		62,6445	64,0328	62,7938	10,8
	F9 A1 II		63,6692	64,6760	63,8034	13,3
	F10 A1 I		63,7177	64,8181	63,8659	13,5
	F10 A1 II		56,8361	58,0159	56,9711	11,4
	F12 A1 I		55,0628	56,2628	55,2442	15,1
	F12 A1 II		53,7367	54,8361	53,9325	17,8
	F13 A1		54,8267	55,8558	54,9658	13,5
	F14 A1		58,2525	59,2808	58,3953	13,9
	F7 A1 I		56,8424	57,9012	56,989	13,8
	F7 A1 II		63,6677	64,6950	63,8079	13,6
	F11 A1 I		62,6477	63,6370	62,8314	18,6
	F11 A1 II		57,0645	58,0934	57,2487	17,9
jun-17	F3 der	Picassent	53,9697	55,3535	54,1439	12,6
	F3 izq		55,6305	56,7577	55,7708	12,4
	F4		52,9425	53,9262	53,0724	13,2
	F5		55,0785	56,1151	55,1395	5,9
	F6		65,0104	66,1476	65,0738	5,6
	F12 der		54,8505	55,9568	54,9968	13,2
	F12 izq		56,8480	57,9913	57,0302	15,9
	F13		63,7224	64,9931	63,8888	13,1
	F14		89,9619	91,7218	90,0497	5,0
	F15		92,7900	93,9163	92,8582	6,1
	CYJ-1	COMERCIAL	116,7216	118,1908	116,8024	5,5
	CYJ-2		79,09360	80,0644	79,1378	4,6
	CYJ-1		118,7747	120,0780	118,8175	3,3
	CYJ-2		87,7549	88,9178	87,8223	5,8
CYJ-1	69,7955		71,2273	69,8547	4,1	
CYJ-2	117,4088		118,4155	117,4681	5,9	

Tabla 3.5.2 permite apreciar la significativa diferencia de contenido en cenizas entre un carbón virgen y otro usado. Los carbones de los filtros de alta 1 han sido regenerados numerosas veces, aumentando relevantemente su contenido en cenizas, puesto que como se explica en el apartado 1.4.3 de este TFG, para regenerar el carbón, se quema en hornos, aumentando su contenido en cenizas.

3.6 CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos podemos concluir:

En primer lugar, el alto contenido en cenizas que poseen los carbones usados en los filtros, prácticamente todos los filtros de las dos ETAP tienen un contenido en cenizas superior al 10 %. Sin embargo, al tratarse de carbones con varios años de vida útil y teniendo en cuenta que los índices de adsorción aún se mantienen por encima de la saturación, no supone un problema. Además, al tratarse de carbones usados, las sustancias adsorbidas por el carbón en algunos casos no pueden ser calcinadas, aumentando así el porcentaje de cenizas del carbón activo. Esto se puede observar al comparar las Tablas 3.3.7 y 3.4.2, donde se observa que los filtros con un mayor índice de yodo (Picassent F5 y Picassent F6) tienen también el menor contenidos en cenizas.

Segundo, como se muestra en la Tabla 3.3.6, los carbones de los filtros de la Línea 2 de la ETAP La Presa, tienen sus microporos saturados. Es por ello, que los carbones ya han sido regenerados, aunque sería muy conveniente analizar su contenido en cenizas, dependiendo de su resultado se deducirá si esta será la última vez que se regeneren y se tenga que comprar carbón activo nuevo o, por el contrario, aún podrían soportar un ciclo de vida más. Es importante el estudio en estos momentos puesto que las cantidades de carbón activo que se debiesen sustituir supondrían un coste muy elevado y es necesario una buena planificación económica para hacerle frente.

Tercero, el índice de azul de metileno ha mostrado lo que a primera vista supone un dato interesante de cara al futuro. Es necesario alcanzar la saturación de los macroporos para en un futuro saber cuándo éstos están alcanzando su límite de adsorción, ya que como ocurre en el índice de yodo, conforme los poros se van saturando, la dificultad del adsorbato para ocupar dichos poros va aumentando, siendo necesario un aumento del tiempo de contacto entre el agua y el carbón activo. Puesto que el tiempo de contacto se mantiene constante, la tendencia del índice de azul de metileno respecto del tiempo tenderá a mantenerse prácticamente constante en el punto de saturación de sus macroporos. De forma que se pueda hallar dicho punto.

Cuarto, las granulometrías muestran que no existen grandes cambios en el tamaño de las partículas del carbón activo relevantes a lo largo del tiempo, sin embargo, no conviene desechar este método puesto que no supone una gran carga de trabajo y podría informar de anomalías en los filtros antes de que éstas puedan desembocar en un problema mayor.

CAPÍTULO 4 – SEGURIDAD Y GESTIÓN DE RESIDUOS

4.1 SEGURIDAD

Todos los reactivos empleados en la parte experimental del TFG. Fueron identificados y previamente se comprobó su peligrosidad para las personas y el medio, así como los procedimientos necesarios para su manipulación con seguridad. En este apartado se muestran los pictogramas, y las frases H y P de todos los reactivos utilizados.

4.1.1 Ácido clorhídrico al 37 % (HCl):

Pictogramas de seguridad:



Figura 3.7.1. CORROSIVO.



Figura 3.7.2. PRECUACIÓN.

Frases H y P:

H 290 - Puede ser corrosivo para los metales.

H 335 - Puede irritar las vías respiratorias.

H 314 - Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves.

P 234 - Conservar únicamente en el recipiente original.

P 390 - Absorber el vertido para que no dañe otros materiales.

P 406 - Almacenar en un recipiente resistente a la corrosión / con revestimiento interior resistente.

P 264 - Lavarse...concienzudamente tras la manipulación.

P 280 - Llevar guantes, prendas, gafas o máscara de protección.

P 302 + P 352 - EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL: Lavar con agua y jabón abundantes.

4.1.2 Yodo 0,5 mol/L (1N) solución valorada (I₂):

Pictogramas de seguridad:



Figura 3.7.3. PELIGROSO PARA EL MEDIO AMBIENTE.

Frases H y P:

H 411 - Tóxico para organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos.

P 273 - Evitar su liberación al medio ambiente.

P 391 - Recoger el vertido.

P 501 - Eliminar el contenido/el recipiente según Directiva 94/62/CE o 2008/98/CE.

4.1.3 Tiosulfato de sodio 1 mol/L (1N) (Na₂S₂O₃):

El tiosulfato de sodio no tiene frases de peligrosidad.

4.1.4 Azul de metileno deshidratado.

Pictogramas de seguridad



Figura 3.7.4. PRECUACIÓN.

Frases H y P:

H 302 - Nocivo en caso de ingestión.

P 264 - Lavarse...concienzudamente tras la manipulación.

P 301 + P312 - EN CASO DE INGESTIÓN... Llamar a un CENTRO DE INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA o a un médico en caso de malestar.

4.2 GESTIÓN DE RESIDUOS

Asimismo, la gestión de residuos se llevó a cabo conforme a la normativa vigente:

UNE-EN ISO/IEC 14001

De tal manera que cada residuo fue tratado de manera diferente para evitar daños a personas o al medio ambiente.

CAPÍTULO 5 – BIBLIOGRAFÍA

Bulut, Y. y Haluk, A. (2005). *Kinetics and thermodynamics study of methylene blue adsorption on wheat shells*. Turquía: Universidad de Dicle.

Conseil Européen des Fédérations de l'Industrie Chimique. (1986). *Thest methods for activated carbon*.

Grupo TAR. (2016). *Manual del carbón activo*. Sevilla: E.U. Politécnica y U. Sevilla

Koehlert K. (2017). *Activated carbon: Fundamentals and New Applications*. EEUU: Cabot Norit.

Muna Y. Abdul (2008). *Design Criteria of an Activated Carbon Bed for Dechlorination of Water*. Iraq: University of Baghdad

Potwara R. (2012). *The ABC of Activated Carbon*. USA: Carbon Resources.

Senthilkumaar S., Varadarajan P.R., Porkodi K. y Subbhuraam C.V. (2004). *Adsorption of methylene blue onto jute fiber carbon*. India: Coimbatore.

ANEXOS

ANEXO I

6 AWWA D1904-96

5.2.4 Apparent density.

5.2.4.1 General. The apparent density of a carbon is the weight in grams per cubic centimeters (g/cc) of the carbon in air. Carbons should have the density determined on an "as-received" basis with corrections made for moisture content.

5.2.4.2 Apparatus. The testing apparatus shall be as shown in Figure 1. Reservoir and feed funnels are glass or metal. The metal vibrator is 26-gauge galvanized sheet metal. A balance with a sensitivity of 0.1 g is required.

5.2.4.3 Procedure.

1. Carefully place a representative sample of the carbon into the reservoir funnel. If the material prematurely flows into the graduated cylinder, return the material to the reservoir funnel.

2. Add the sample to the cylinder by the vibrator feeder at a uniform rate of not less than 0.75 mL/s nor greater than 1.0 mL/s up to the 100-mL mark. Adjust the rate by changing the slope of the metal vibrator or raising or lowering the reservoir funnel, or both, or by using a variable autotransformer to vary the current to the buzzer transformer.

3. Transfer the contents from the cylinder to a balance pan and weigh to the nearest 0.1 g.

5.2.4.4 Calculation. Calculate the apparent density in grams/millilitre on the dry basis:

$$\text{apparent density} = \frac{(\text{weight of carbon}) \times (100 - \% \text{ moisture})}{10,000}$$

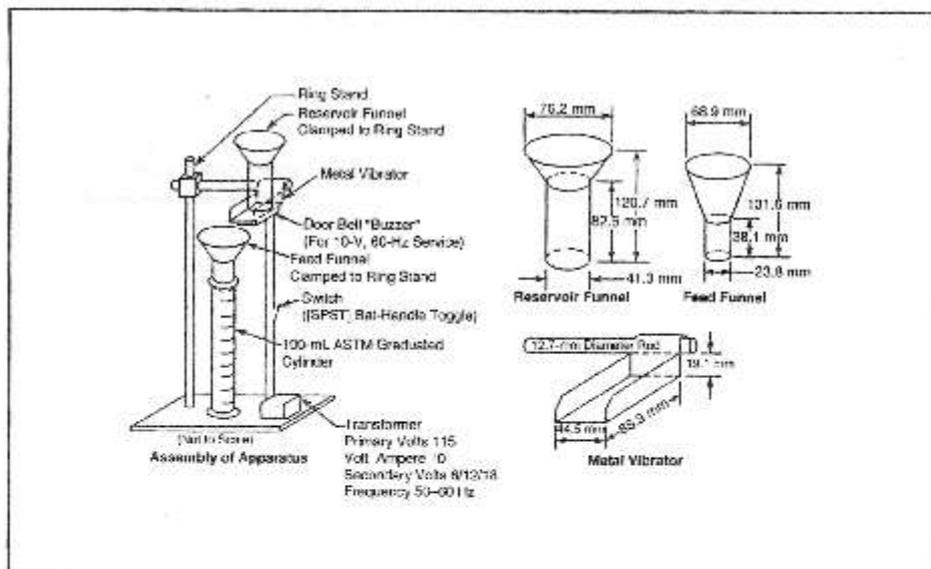
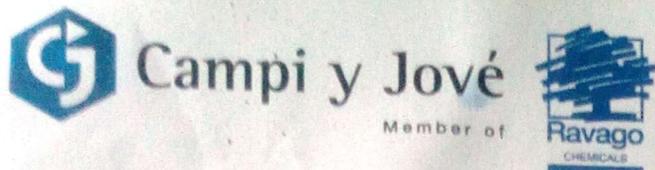


Figure 1 Apparent density apparatus

ANEXO II



CERTIFICATE OF ANALYSIS

Product Name	CAS NO.
Agglomerated Activated Carbon <u>GAC</u> B-1020 A	7440-44-0

Lot No.	MFG. DATE	EXP. DATE
CYJ20170215	February, 2017	February, 2019
TOTAL QUANTITY	120000 Kgs	

PROPERTIES TEST					
No.	Properties	Unit	Specification	Test result	Test method
1	Iodine Adsorption Value	mg/g	950 min	1004	GB/T 12496.08-1999
2	Methylene Blue Adsorption Value	mg/g	200 min	203	GB/T 12496.10-1999
3	Moisture Content	%	2.0 max	1.3	GB/T 12496.04-1999
4	Ash Content	%	15.0 max	7.2	GB/T 12496.03-1999
5	Ph		7.0 min	8.5	GB/T 12496.20-1999
6	Apparent Density, backwashed & drained	kg/m3	410-470	423	GB/T 12496.01-1999
7	Particle size (10x20 mesh)	%	90 min	97	GB/T 12496.02-1999
8	Hardness		95 min	95	GB/T 12496.06-1999
9	Abrasion Index		75	77	GB/T 12496.06-1999
10	Floating Content	%	0.1 min	0.01	GB/T 12496-1999

Appearance: non-toxic and tasteless black granular

Testing method: GB/T 12496-1999

Conclusion: Qualified



Campi y Jové

Member of



Ravago
CHEMICALS

CERTIFICATE OF ANALYSIS

Product Name	CAS NO.
Agglomerated Activated Carbon GAC B-1020 A	7440-44-0

Lot No.	MFG. DATE	EXP. DATE
CYJ20161228	December, 2016	December, 2019
TOTAL QUANTITY	169400 Kgs	

PROPERTIES TEST					
No.	Properties	Unit	Specification	Test result	Test method
1	Iodine Adsorption Value	mg/g	950 min	999	GB/T 12496.08-1999
2	Methylene Blue Adsorption Value	mg/g	200 min	203	GB/T 12496.10-1999
3	Moisture Content	%	2.0 max	1.4	GB/T 12496.04-1999
4	Ash Content	%	15.0 max	6.5	GB/T 12496.03-1999
5	Ph		7.0 min	8.29	GB/T 12496.20-1999
6	Apparent Density, backwashed & drained	kg/m ³	410-470	413	GB/T 12496.01-1999
7	Particle size (10x20 mesh)	%	90 min	92.7	GB/T 12496.02-1999
8	Hardness		95 min	95	GB/T 12496.06-1999
9	Abrasion Index		75	79	GB/T 12496.06-1999
10	Floating Content	%	0.1 min	0.01	GB/T 12496-1999

Appearance: non-toxic and tasteless black granular

Testing method: GB/T 12496-1999

Conclusion: Qualified



Campi y Jové
Member of



CERTIFICATE OF ANALYSIS

Product Name	CAS NO.
Agglomerated Activated Carbon GAC B-1020 A	7440-44-0

Lot No.	MFG. DATE	EXP. DATE
CYJ20170213	February, 2017	February, 2019
TOTAL QUANTITY	83260 Kgs	

PROPERTIES TEST					
No.	Properties	Unit	Specification	Test result	Test method
1	Iodine Adsorption Value	mg/g	950 min	1005	GB/T 12496.08-1999
2	Methylene Blue Adsorption Value	mg/g	200 min	202	GB/T 12496.10-1999
3	Moisture Content	%	2.0 max	1.2	GB/T 12496.04-1999
4	Ash Content	%	15.0 max	7.3	GB/T 12496.03-1999
5	Ph		7.0 min	8.5	GB/T 12496.20-1999
6	Apparent Density, backwashed & drained	kg/m ³	410-470	420	GB/T 12496.01-1999
7	Particle size (10x20 mesh)	%	90 min	97	GB/T 12496.02-1999
8	Hardness		95 min	95	GB/T 12496.06-1999
9	Abrasion Index		75	77	GB/T 12496.06-1999
10	Floating Content	%	0.1 min	0.01	GB/T 12496-1999

Appearance: non-toxic and tasteless black granular

Testing method: GB/T 12496-1999

Conclusion: Qualified

PRESUPUESTOS

En este apartado se refleja la inversión necesaria para la realización de este TFG. Para su obtención Es necesario reconocer todos los materiales, maquinaria y reactivos que han sido utilizados en este proyecto.

1. PRESUPUESTOS PARCIALES

En el Capítulo 1 se muestra el personal requerido para la realización de tanto los ensayos experimentales como de la búsqueda de información y realización del estudio.

CAPÍTULO 1 - Mano de obra

Designación	Importe		
	Precio (€/hr)	Cantidad (hr)	TOTAL (€)
Ingeniero químico	30,00	250	7.500,00
		Importe total:	7.500,00

En el Capítulo 2 se detalla la maquinaria empleada en el laboratorio durante la etapa experimental del trabajo de fin de grado.

CAPÍTULO 2 - Maquinaria

Designación	Importe		
	Precio (€)	Cantidad	TOTAL (€)
Espectrofotómetro Hach Lange DR5000	5.000,00	1	5.000,00
tamiz 45 micras ISO 3310.1 con certificado CISA	77,10	1	77,10
Molino de bolas Retsch MM400	8.091,08	1	8.091,08
Tamiz AS 200 basic	3.015,21	1	3.015,21
Balanza analítica Cobos JT -220AI	2.268,00	1	2.268,00
Desecador sin plato	303,33	1	303,33
Plato desecador Nalgene	89,99	1	89,99
Placa calefactora IKA c-mag HS-7	525,00	2	1.050,00
Campana extracción de gases ASEM	10.495,00	1	10.495,00
Horno mufla Hobersal HK-11	1.241,12	1	1.241,12
Estufa 200°C Gallur	1.250,00	1	1.250,00
Nevera Serial nº 44,811,7	1.729,00	1	1.729,00
Vortex IKA MS 3 basic	546,00	1	546,00
		Importe total:	35.155,83

CAPÍTULO 3 - Materiales de laboratorio

Designación	Importe		
	Precio (€)	Cantidad	TOTAL (€)
Mascarilla FFP2 Dräger 1720+ v	2,11	1	2,11
Cápsula cerámica f/plano, 169x68 mm	38,27	12	459,24
Timer laboratorio	11,50	1	11,50
Guantes caja (100 ud)	6,47	1	6,47
Bata laboratorio	18,84	1	18,84
Calzado seguridad	39,75	1	39,75
Vaso precipitado 25 mL	3,30	4	13,20
Vaso precipitado 50 mL	2,29	4	9,16
Vaso precipitado 100 mL	3,28	4	13,12
Vaso precipitado 250 mL	3,11	4	12,44
Vaso precipitado 1000 mL	16,84	2	33,68
Pipetas clase A 5mL	31,00	1	31,00
Pipetas clase A graduada 10mL	31,74	1	31,74
Pipetas clase A x2aforada 10mL	39,02	1	39,02
Pipetas clase A graduada 20mL	55,27	1	55,27
Pipetas clase A aforada 50mL	96,29	1	96,29
Pipetas clase A aforada 100mL	101,91	1	101,91
Erlenmeyer boca ancha 250mL	6,42	6	38,52
Espátula/cuchara laboratorio	3,21	2	6,42
Embudo cristal	6,25	1	6,25
Soporte aro con nuez	5,30	1	5,30
Soporte universal laboratorio	11,90	1	11,90
Pinza nuez giratoria	12,50	1	12,50
Filtros de pliegues de 8 µm poro (100 ud)	4,31	1	4,31
Frasco de desbordamiento 164 mL	140,68	1	140,68
Cubeta de poliestireno de 1 cm (100ud)	75,82	1	75,82
tapones 3M Tr-01-000 (50 ud)	73,48	1	73,48
Mortero porcelana 650 mL	64,26	1	64,26
Mano de mortero	21,65	1	21,65
Botella topacio 1L	66,00	2	132,00
Bureta 50 mL	76,41	1	76,41
Matraz aforado A 50 mL	31,58	8	252,64
Matraz aforado A 100 mL	32,99	2	65,98
Matraz aforado A 1000 mL	79,52	2	159,04
Matraz aforado A opaco 100 mL	42,86	2	85,72
Botella agua destilada 1L	11,91	2	23,82
Sistema de purificación de agua	5.832,00	1	5.832,00
		Importe total:	8.063,44

En el Capítulo 3 se detallan los gastos necesarios para proveer al laboratorio de materiales básicos y auxiliares del mismo.

Por último, se representan los costes asociados a los reactivos empleados en el Capítulo 4.

CAPÍTULO 4 - Reactivos

Designación	Importe		
	Precio (€)	Cantidad	TOTAL (€)
Ácido clorhídrico al 37 % 1L	33,67	1	33,67
Azul de metileno sólido 100g	43,55	1	43,55
Yodo al 1N 1L	175,60	1	175,60
Tiosulfato al 1N 1L	38,00	1	38,00
Alcohol etílico al 96º 1L	4,50	5	22,50
		Importe total:	313,32

2. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN

Con la suma de los presupuestos parciales se obtiene el Presupuesto de Ejecución Material.

Presupuesto de ejecución material

Capítulo 1 Mano de obra	7.500,00 €
Capítulo 2 Maquinaria	35.155,83 €
Capítulo 3 Material de laboratorio	8.063,44 €
Capítulo 4 Reactivos	313,32 €
Total.....	51.032,59 €

Asciende el presupuesto de ejecución material a la expresada cantidad de CINCUENTA Y UN MIL CIENTO SESENTA Y CUATRO CON OCHENTA CÉNTIMOS.

Al añadir los gastos generales del proyecto (consumo eléctrico, mantenimiento, limpieza, etc.) y el beneficio industrial se calcula el Presupuesto por de Ejecución por Contrata.

Presupuesto de ejecución por contrata

Capítulo 1 Mano de obra	7.500,00 €
Capítulo 2 Maquinaria	35.155,83 €
Capítulo 3 Material de laboratorio	8.063,44 €
Capítulo 4 Reactivos	313,32 €
Presupuesto de ejecución material	51.032,59 €
10 % Gastos generales	5.103,26 €
8 % Beneficio industrial	4.082,61 €
Total.....	60.218,46 €

Por último, se calcula el Presupuesto Base de Licitación adicionando el 21 % de IVA al Presupuesto de Ejecución por Contrata, el cual, expresa el coste final del proyecto.

Presupuesto en base de licitación

Capítulo 1 Mano de obra	7.500,00 €
Capítulo 2 Maquinaria	35.155,83 €
Capítulo 3 Material de laboratorio	8.063,44 €
Capítulo 4 Reactivos	313,32 €
Presupuesto de ejecución material	51.032,59 €
10 % Gastos generales	5.103,26 €
8 % Beneficio industrial	4.082,61 €
Suma	60.218,46 €
21 % IVA	12.645,88 €
Total.....	72.864,33 €

Asciende el presupuesto de total a la expresada cantidad de SETENTA Y DOS MIL OCHOCIENTOS SESENTA Y CUATRO CON TREINTA Y TRES CÉNTIMOS.