



(11) **MX 2014008261 A**

(12)

SOLICITUD de PATENTE

(43) Fecha de publicación: **04/01/2016** (51) Int. Cl: **C02F 9/06** (2006.01)
(22) Fecha de presentación: **04/07/2014** **C02F 1/72** (2006.01)
(21) Número de solicitud: **2014008261**

(71) Solicitante:
**CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO
TECNOLOGICO EN ELECTROQUIMICA, S.C.
Parque Tecnológico Querétaro Sanfandila 76703
PEDRO ESCOBEDO Queretaro MX**

(72) Inventor(es):
**JESÚS CÁRDENAS MIJANGOS
Parque Tecnológico Querétaro PEDRO ESCOBEDO
Queretaro 76703 MX
ERIKA BUSTOS BUSTOS
GERARDO ISAAC ALBA LOPEZ
VANESSA RAMIREZ DELGADO
JESUS ANTONIO SANCHEZ ALBORES**

(74) Representante:
**CLAUDIA RÍOS ÁLVAREZ
Camino a los Olvera No.44 Corregidora Queretaro
76904 MX**

(54) Título: **EQUIPO Y PROCESO DE TRATAMIENTO ELECTROKINÉTICO ON SITE EN FLUJO DE SUELO CONTAMINADO CON HIDROCARBUROS.**

(54) Title: **EQUIPMENT AND PROCESS OF ELECTROKINETIC TRERATMENT ON SITE PERFORMED IN FLOWS OF SOIL POLLUTED WITH HYDROCARBONS.**

(57) Resumen

La presente invención consiste en efectuar un tratamiento electrocinético (TEC) on site en flujo de suelo contaminado con hidrocarburos (HC) y su posterior degradación o transformación química o electroquímica con el reactivo de Fenton en solución para líquidos extraídos con compuestos orgánicos. Las pruebas efectuadas a nivel piloto comprueban remociones mayores del 80% en al menos 8 horas para un volumen de suelo contaminado de al menos un metro cúbico de suelo base seca, así como evitando la alteración físico-química del suelo y la reutilización de los electrodos modificados con óxidos superficiales por la resistencia mecánica que muestran. Los resultados de las pruebas experimentales al acoplar el reactor del proceso de oxidación Fenton para el tratamiento de los líquidos extraídos resultantes del proceso del TEC con HC comprueban remociones máximas entre 50 y 90% para la Demanda Química de Oxígeno (DQO) empleando un tiempo de reacción del proceso de oxidación Fenton entre 1 y 5 horas, proporcionando un efluente que puede ser reciclado para la preparación de electrólito en la electrorremediación, o bien disponerla como agua residual tratada a una planta biológica, o bien empleando el agua para regar el suelo circundante. Los lodos obtenidos después de este tratamiento también pueden ser reutilizados como catalizador Fe^{+2} en el reactor del proceso de oxidación Fenton.

(57) Abstract

The present invention consists in performing an electrokinetic treatment on site in flows of soils polluted with hydrocarbons (HC) and its subsequent degradation or chemical or electrochemical transformation with the Fenton reactant in solution for liquids extracted with organic compounds. The tests performed at a pilot level show removals higher than 80% in at least 8 hours for a volume of polluted soil of at least 1 cubic meter of dry-base soil, also avoiding the physical-chemical alteration of the soil and reusing the electrodes modified with superficial oxides by means of their mechanical resistance. The results of the experimental tests, upon coupling the reactor of the Fenton oxidation process for treating the extracted liquids resulting from the electrokinetic process with hydrocarbons, shown maximum removals ranging from 50% to 90% for the Chemical Oxygen Demand (COD) using a reaction time of the Fenton oxidation process ranging from

1 to 5 hours, providing an effluent that may be recycled for the preparation of electrolytes in the electro remediation, or treated as a residual water in a biological plant, or being used as a water for watering the surrounding environment. The obtained sludges, after being subjected to this treatment, may be reused as a Fe⁺² catalysts in the reactor of the Fenton oxidation process.

EQUIPO Y PROCESO DE TRATAMIENTO ELECTROKINÉTICO *ON SITE* EN FLUJO DE SUELO CONTAMINADO CON HIDROCARBUROS

CAMPO TÉCNICO DE LA INVENCION

5 La presente invención se relaciona con el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos (HC), la presente invención se refiere al equipo y proceso de tratamiento electrocinético (TEC) *on site* en flujo de suelo contaminado con HC que comprende un reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos, empleando como cátodo un electrodo de titanio (Ti), y como ánodo un electrodo de Ti de superficie modificada con óxidos de metales de transición tales como Iridio (Ir) y Tantalio (Ta). Asimismo, se considera la posterior transformación de la solución generada que contiene los HC removidos por el TEC *on site* del suelo, mediante un reactor para el proceso de oxidación Fenton.

15

OBJETIVOS DE LA INVENCION

El primer objetivo de la presente invención se refiere a un equipo para TEC *on site* de suelo contaminado con HC que incluye el diseño de un reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos.

20 El segundo objetivo de la presente invención se refiere a un proceso de TEC *on site* que aplique a suelo de diferentes tamaños de partícula, desde limo, arcilla y grava contaminado con HC

El tercer objetivo de la presente invención es el acoplamiento del proceso de oxidación Fenton después del TEC *on site* en flujo de suelo contaminado con HC para la degradación y/o transformación de los contaminantes orgánicos en solución como los HC.

25

ANTECEDENTES

De acuerdo con Volke S. T. y Velasco T. J. A. (2004) en “Tecnologías de Remediación para Suelos Contaminados” en el Instituto Nacional de Ecología, México; Bustos, E. (2009) en “El Remedio Electroquímico contra la Contaminación del Suelo” en la Revista de Divulgación Serendipia, No. 7, p.p. 9 – 11; Méndez, E. y Bustos, E. (2010) en “Electro-remediación de Suelos: Una Alternativa más para Recuperar Sitios Contaminados”, No. 3, p.p. 4 – 7, así como en los documentos de patente AU2003285830B2, CA2307961, CN102527707, ES2031583, ES2061425T1, RU2125122C1, US005476992A, US006120579A, US20030210957, US20040208706, US6214189 y WO2005/053866, que indican que la electro-remediación, también llamada remediación o tratamiento electroquímico, tratamiento electro-cinético (TEC), electro-reclamación entre otros, es una técnica que se encuentra dentro de los tratamientos fisicoquímicos. El TEC ha sido reconocido como un proceso prometedor para hacer frente a dificultades tales como suelos heterogéneos y de baja permeabilidad. Asimismo, el TEC puede ser aplicado *in situ* o *ex situ*, siendo especialmente útil para la remediación de sitios inaccesibles con mínima alteración de sus propiedades, donde otras tecnologías fracasan como el lavado de suelos y biorremediación de acuerdo con lo que se indica en el artículo indexado de Méndez, E., Castellanos, D., Alba, G. I., Hernández, G., Solís, S., Levresse, G., Vega, M., Rodríguez, F., Urbina, E., Cuevas, M. C., García, M. G. y Bustos E. (2011) en “Effect in the Physical and Chemical Properties of Gleysol Soil after an Electrokinetic Treatment in Presence of Surfactant Triton X-114 to Remove Hydrocarbon” de la revista International Journal of Electrochemical Science, No. 6, p.p. 1250-1268; así como Alba, G. I., Cuevas M. C. y Bustos E. en “Comparing the Electroremediation of Gleysol Soil Contaminated with Hydrocarbons with Triton X-114 Washing and Bioremediation with Solid cultures Employing Agroindustrial Residues” en la revista International Journal of Electrochemical Science, No. 8, p.p. 4735–4746. El TEC es sensible a una amplia variedad de contaminantes.

Las ventajas antes mencionadas, han dado lugar a varios programas de investigación en todo el mundo para el desarrollo del proceso electroquímico,

existiendo aun la necesidad de continuar ampliando la investigación que permita tener un mejor entendimiento de los procesos geoquímicos, geofísicos y electrocinéticos involucrados para poder llevar a cabo exitosamente la aplicación en campo, representando este tratamiento un reto tecnológico por todos los factores involucrados. El TEC es relativamente seguro, efectivo, de fácil implementación, económico y flexible porque puede emplearse en diferentes tipos de suelo y contaminantes.

Según De la Rosa P. D., Teutli L. M. y Ramírez I. M. (2007) en "Electro-remediación de Suelos Contaminados, una Revisión Técnica para su Aplicación en Campo" en la Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 23; así como Bustos E. (2012) en el "Remediación Electro-cinética de Suelos Contaminados con Hidrocarburo" del capítulo 5 del libro de Remediación de Suelos y Acuíferos Contaminados en México: Bases Teóricas y Experiencias Reales de la UAQ – CONCyTEQ – FUNDAp - GIZ, indican que el TEC es una tecnología para restaurar suelos contaminados que se basa en la generación de un campo eléctrico a partir de imponer corriente directa mediante el empleo de electrodos, tanto ánodo como cátodo, y en presencia de un electrolito soporte (sal inerte) para mejorar las condiciones de conducción del campo eléctrico como lo indican los documentos de patente AU2003285830B2, CA2307961, CN102527707, ES2031583, ES2061425T1, RU2125122C1, US005476992A, US006120579A, US20030210957, US20040208706, US6214189, WO2005/053866. La acción del electrolito permite transportar el contaminante hacia los pozos en donde será extraído.

Reddy R. K. y Camesselle C. (2009) en "Electrochemical Remediation Technologies for Polluted Soils, Sediments and Groundwater" por A Jonh Wiley & Sons, Inc. EUA, indican que el TEC de suelo involucra factores como el flujo de fluidos, electricidad y procesos químicos, bajo la influencia de gradientes hidráulicos, eléctricos y químicos. En primera instancia, un gradiente eléctrico es una fuerza motriz más efectiva que un gradiente hidráulico para mover un fluido, por ejemplo, los valores de conductividad hidráulica de diferentes suelos pueden variar en órdenes de magnitud (de 1×10^{-9} a 1×10^{-4} cm s⁻¹, ya que varía con el tamaño de poro); por otro lado los valores de

coeficientes de conductividad electro-osmótica se mantienen en un rango entre 1×10^{-5} a 1×10^{-6} $\text{cm V}^{-1} \text{s}^{-1}$ y es relativamente independiente del tipo de suelo. Además, De la Rosa P. D., Teutli L. M. y Ramírez I. M. (2007), Prasad M., Sajwan K. y Naidu R. (2006) en "Trace Elements in the Environment, Biogeochemistry, Biotechnology and Bioremediation" por Taylor & Francis, EUA, y Bustos E. (2012) indican que los mecanismos principales por los cuales el campo eléctrico conduce los contaminantes hacia los electrodos son: electro-migración (movimiento de iones), electro-ósmosis (movimiento de moléculas sin carga) y electro-foresis (movimiento de coloides), siendo los dos primeros los que ejercen la mayor influencia en el transporte del contaminante. Otros fenómenos de transporte de masa que ocurren durante el proceso de electro-remediación, son la difusión que es el movimiento de las especies debido a los gradientes de concentración, así como la advección generada por gradientes hidráulicos.

Prasad M., Sajwan K. y Naidu R. (2006), Méndez E. y Bustos E. (2010), así como Bustos E. (2009 y 2012) indican también que la electrólisis de agua ocurre sobre la superficie de los electrodos al aplicar una corriente eléctrica, lo que origina una frontera ácida en el ánodo, con un pH cercano a 2, y una frontera básica en el cátodo, con un pH con valor cercano a 12; debido a la generación de H^+ e OH^- respectivamente. Además, cuando la concentración de iones de los electrolitos es alta, se puedan llevar a cabo otros procesos en la superficie de los electrodos como es el depósito de metales en el cátodo y la precipitación de los metales como hidróxidos, óxidos, sulfatos o fosfatos, dependiendo del pH de la solución. Asimismo, estos procesos indican que las reacciones de electrólisis dependen del tipo y disposición de los electrodos, así como las especies químicas y potencial eléctrico que se use durante la electro-remediación.

Es así como Martínez G. A. J. (2001) en "Electro-remediación de Suelos Contaminados con Hidrocarburos" en la Tesis de Licenciatura de la Universidad Autónoma Metropolitana, México, así como Pérez – Corona, M., Cárdenas J., y Bustos E. (2012) en "La Electro-remediación in situ: Una Alternativa más para el Saneamiento de Suelos Contaminados" en la revista de divulgación Nthe, No. 5, p.p. 52 – 55, y Bustos E. (2009 y 2012) indican que en las últimas tres décadas se han

realizado diversas investigaciones a nivel laboratorio, piloto y campo aplicando el fundamento electro-cinético para remover una amplia variedad de contaminantes como los HC.

Es así como en el TEC de suelo contaminado se tienen que considerar varios factores que involucraran los costos de la aplicación de la técnica que comprenden el volumen de suelo a remediar, así como el tipo de contaminante, el tiempo que dure el tratamiento, materiales electródicos, consumo de energía eléctrica. Asimismo, los materiales requeridos para la aplicación de la técnica y la mano de obra del personal involucrado, destacando de este proceso el gasto de inversión inicial requerido pero contrarrestándolo con el tiempo de ejecución que puede llegar a ser mínimo (meses, días e incluso horas), contrastado con otras tecnologías que pueden llegar a durar años.

Los electrodos durante la electro-remediación de suelos pueden ser dispuestos de manera horizontal o vertical en un plano espacial $x-y$. Sin embargo, las investigaciones reportadas se han limitado a conducir el estudio de la configuración de electrodos hacia la eficiencia de la extracción electrocinética. La mayoría de estudios reportados por Alshawabkeh A. N., Yeung A. T. y Brick M. R. (1999) en "Practical Aspects of *in situ* Electrokinetic Extraction" del Journal Environmental Engineering, 125 indican que a escala laboratorio y piloto del TEC se han realizado teniendo una dimensión (1D), es decir un ánodo en frente de un cátodo como se muestra en las patentes ES2031583, RU2125122C1 y US005476992A. Asimismo, en las patentes WO 94/03399 y DE4210949 se muestra el tratamiento *on site* de lodo para remover contaminantes orgánicos mediante el empleo de un reactor de placas paralelas con arreglo 1D de electrodos, el cual usa una mezcla de agentes oxidantes iónicos, no iónicos o anfotéricos como ozono (O_3) o peróxido de hidrógeno (H_2O_2) generados de manera externa al reactor y pasan entre el ánodo y cátodo teniendo el compuesto orgánico en solución y destruyéndolo.

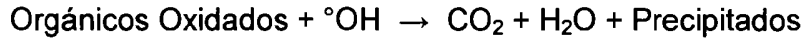
En cuanto a los tratamientos *on site* de suelo contaminado con HC, en la patente mexicana con número de registro PA/a/2006/007260 se indica un método para la

remediación de suelos contaminados con HC empleando oxidación avanzada asistida con energía ultrasónica, en el cual dicho suelo se pone en contacto con una solución acuosa formando una suspensión caracterizado porque contiene un catalizador tipo Fenton con un intervalo de concentración de 0 a 0.12% en peso; un precursor de un agente oxidante generado por la descomposición de H_2O_2 que se encuentra en un intervalo de concentración en la suspensión de 0 a 7.0% en peso; agua desionizada en un intervalo de concentración de 45 a 60% en peso; y suelo contaminado en un intervalo de concentración de 25 a 50% en peso; y que durante el proceso, se aplica energía ultrasónica con una frecuencia entre 15 kHz y 2.5 MHz, para favorecer la desorción de los HC contenidos en el suelo para transferirlos a la fase acuosa, y, al mismo tiempo acelerar el proceso de oxidación de los mismos HC contenidos en la fase acuosa hasta convertirlos en óxidos de carbono.

Por otra parte, de acuerdo con Richard J. Bigda (1996) en The Technotreat Corp., "Fenton's Chemistry: An Effective Advanced Oxidation Process", Environmental Technology, May / June p.p. 34 - 39, las oxidaciones del sistema basado en los reactivos Fenton (peróxido de Hidrógeno, H_2O_2 , en presencia de una sal ferrosa, $FeSO_4$) se ha utilizado para el tratamiento de sustancias orgánicas e inorgánicas bajo condiciones de laboratorio, así como para efluentes reales de diferentes orígenes como son de manufacturas de especialidades químicas, aguas de procesos de explosivos, insecticidas, tintes, fotoquímicas, tratamiento de desechos peligrosos, farmacéuticos, productos químicos, desechos de refinерías de petróleo, terminales de combustibles, máquinas, limpieza de metales, tratamiento de aguas subterráneas y remediación de sitios, ya que este proceso ha resultado efectivo para degradar compuestos alifáticos y aromáticos clorados, PCBs, nitroaromáticos, colorantes azo, clorobenceno, PCP, fenoles, fenoles clorados, octacloro-p-dioxina y formaldehído, ácido fórmico, fenol, 2.4 - diclorofenol, 4 - clorofenol y nitrobenzeno como lo reporta Xavier Doménech, Wilson F. Jardim y Marta I. Litte en Procesos Avanzados de Oxidación para la Eliminación de Contaminantes en la página electrónica www.cnea.gov.ar/xxi/ambiental/cyted/06ca01.pdf. Es así como, son muy pocos los compuestos que no pueden ser atacados por este reactivo, entre ellos la acetona, el

ácido acético, el ácido oxálico, las parafinas y los compuestos organoclorados, siendo útil como pre-tratamiento de compuestos no biodegradables.

De acuerdo a R. Andreozzi, V. Caprio, A. Insola, R. Marotta (1999) en *Advanced Oxidation Processes (AOP) for Water Purification and Recovery de Catalysis Today* 53, p.p. 51–59 indican que analizando varios procesos de oxidación avanzada (POA) han concluido que los basados en el H_2O_2 para promover la formación del radical hidroxilo ($^{\circ}OH$) suelen ser muy prometedores para la destrucción de contaminantes refractarios y tóxicos presentes en las aguas residuales, además de que estos no involucran el uso de compuestos químicos peligrosos, teniendo un funcionamiento simple, relativamente económico, poco impacto ambiental negativo, así como la nula formación de compuestos clorados como en otras técnicas oxidantes, y la inexistencia de limitaciones de transferencia de masa por tratarse de un sistema homogéneo y sencillo de implementar, como también lo señala R. J. Bigda (1995) en *Chem. Eng. Progress*, p.p. 63-65. El proceso de oxidación Fenton en su reacción involucra al H_2O_2 como oxidante, y un catalizador como el ion fierro (Fe^{+2}), en donde varios estudios aseguran que este catalizador es la mejor opción que el ion Fe^{+3} de acuerdo a F. Haber y J. Weiss (1934) en *The Catalytic Decomposition of Hydrogen Peroxide by Iron Salts* en *Proc. R. Soc. Series A* 147, 332, así como M. C. Pereira, L. C. A. Oliveira y M. Murad (2012) en *Iron Oxides Catalysts: Fenton and Fenton - Like Reactions – A Review* en *Clay Minerals*, September, Vol. 47, No. 3, p.p. 285-302. El reactivo de Fenton se define como la generación de radicales hidroxilos ($^{\circ}OH$) de la reacción en cadena mediante la combinación de Sulfato Ferroso ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) y el Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2), mostrando una eficaz oxidación en los compuestos tóxicos y compuestos orgánicos persistentes, donde el mecanismo de la reacción es según Anat A. Lev y Vithal V. (1997) en *Deshpande, "Chemical Oxidation, Technologies for the Nineties"*, W. W. Eckenfelder, A. R. Bowers y J.R. Roth Editores. Vol. 6, Technomic Publication:



- 5 El proceso Fenton es potencialmente útil para destruir contaminantes debido a la efectividad que posee para la generación de ${}^\circ\text{OH}$, pero un exceso de iones Fe^{+2} puede atraparlos, al igual que los halógenos, el mismo H_2O_2 o el radical perhidroxilo de acuerdo a F. Hunter (1997) en "Chemical Oxidation, Technologies for the Nineties", W. W. Eckenfelder, A. R. Bowers y J. R. Roth Editores. Vol. 6, Technomic
- 10 Publication. Además, existen varias patentes en donde se emplea el proceso Fenton, como:
- El documento de patente US4321143 muestra un proceso para disminuir el contenido de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) de diversos efluentes tratándolos con H_2O_2 en la presencia de un compuesto de un metal de transición. La relación molar utilizada de H_2O_2 al metal de transición es de 30:1 a 3:1, llevando el pH entre 2 y 9, manteniendo el efluente entre 5 a 100°C.
 - El documento de patente US4370241 protege un proceso para purificar aguas residuales conteniendo fenol, derivados de fenol y fenol más formaldehído tratándolas con H_2O_2 y utilizando ya sea hierro, cobre o de sales complejas de sodio y hierro (III) de etilenamida tetraacetato.
 - El documento de patente US4604214 describe un proceso para remover trinitrocresoles y ácido pícrico contaminantes presentes en una corriente de agua residual generada en la producción de nitroaromáticos (dinitrotolueno) por la técnica de mezclado ácido. Cuando las concentraciones de las sales solubles de trinitrocresoles y ácido pícrico son suficientes, este efluente es tratado con ácido para reducir el pH entre 3 y 4, enseguida la solución se pone en contacto con
- 15
- 20
- 25

H₂O₂ y ion hierro (Fe⁺²) para la oxidación del trinitrocresol a ácido carboxílico, ácido nítrico y dióxido de carbono.

- El documento de patente US4724084 proporciona un sistema para remover compuestos tóxicos orgánicos como fenol, cloruro de metilo y tolueno de aguas residuales. Además el sistema remueve otros contaminantes como son metales incluyendo cadmio, cromo, cobre, plomo, níquel, plata y zinc. La invención proporciona un proceso en dos etapas donde el pH de la corriente del proceso de manufactura es ajustado a 5 y el FeSO₄•7H₂O es continuamente adicionado basado en la concentración de fenol del efluente. El FeSO₄•7H₂O es adicionado para proporcionar el Fe⁺², el cual cataliza al H₂O₂. La adición de los reactivos ocurre en un primer reactor mezclado y donde se oxida al fenol. Posteriormente la corriente es clarificada ajustando el pH en un rango de 8.5 a 9.5 usando cal. Seguido del agregado de un polímero para provocar la floculación produciendo una cierta cantidad de lodo. El lodo es espesado y removido completando la primera etapa del proceso. La segunda etapa del proceso inicia con el ajuste de pH a 5.0 y agregando 1 000 ppm de FeSO₄•7H₂O y la adición continua de H₂O₂ en un segundo reactor mezclado basado en el potencial de óxido-reducción y la concentración de fenol existente en el efluente. Nuevamente el efluente tratado del segundo rector mezclado el pH es ajustado entre 8.5 a 9.5; enseguida se le adiciona polímero y el efluente se vuelve a clarificar resultando en una segunda producción de lodos. El efluente clarificado es agotado con aire con el propósito de bajar cualquier concentración remanente de compuestos orgánicos volátiles, el cual complementa la segunda etapa final del tratamiento. Este sistema se emplea para la industria aeronáutica para los efluentes generados en el área de pintura y recubrimientos.
- El documento de patente US4804480 utiliza un proceso para destruir nitrofenoles o sus sales o mezclas de ellos presentes en un desecho tratándolo con H₂O₂ en la presencia de compuestos de hierro soluble a pH menor de 4 y a una temperatura mayor a 45°C.

- El documento de patente US5610065 protege un proceso para tratar HC aromáticos polinucleares e HC polihidroclorinados que están en materiales sólidos, integrando un tratamiento químico y biológico. Para el tratamiento químico se utiliza H_2O_2 en la presencia de Fe^{+2} en solución líquida a una temperatura entre 10 a $100^\circ C$, oxidando el material del HC aromático polinuclear y el HC policlorinado produciendo material de HC más biodegradable y biodigeriendo estos productos por biodigestión aerobia o anaerobia.
- El documento de patente US7666315B2 señala que en esta invención se protege un método, dispositivo y agentes químicos para purificación de aguas residuales mediante una reacción de oxidación de los contaminantes orgánicos en las aguas residuales conocida como Fenton. El propósito del tratamiento es reducir la DQO de los efluentes incrementando la biodegradabilidad. El método es caracterizado por una completa automatización bajo condiciones seguras del sistema. También es caracterizado porque la reacción Fenton se lleva a cabo a una temperatura de aproximadamente 110 a $120^\circ C$ y una presión de 1.0 a 1.5 Kg cm^{-2} . La instalación consiste de cuatro zonas: preparación de efluente, preparación de agentes químicos, reacción, neutralización y filtración.
- El documento de patente EP0022525 define un proceso para disminuir la DQO de efluentes tratándolos con agua oxigenada en la presencia de un metal de transición.
- El documento de patente DE4314521 describe un proceso de operación continua o por lotes para purificación de aguas residuales industriales contaminadas con materia orgánica por medio de la adición de H_2O_2 y un catalizador homogéneo, preferiblemente agente Fenton. La reacción Fenton se lleva a cabo entre 35 y $40^\circ C$.
- La patente US6596176B1 combina el uso de H_2O_2 y coagulantes metálicos. La combinación de estos compuestos crea un efecto sinérgico que engrandece la actividad desinfectante del H_2O_2 y promueve coagulación de los contaminantes

oxidados. Los contaminantes oxidados coagulan y son filtrados o sedimentados. Un polímero aniónico también se puede agregar para engrandecer la coagulación. La invención no produce olores desagradables y coloración. Evita la formación de sustancias peligrosas y oxida adecuadamente el agua tratada. Esta invención puede ser adaptada a plantas de tratamiento existentes. Los productos químicos que utiliza son económicos y seguros de manejar.

- El documento de patente WO1999021801A1 protege un método para purificación de agua basado en la reacción Fenton ajustando el pH entre 2.0 a 4.0, empleando $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en una cantidad de 0.05 a 0.40% en peso, y H_2O_2 en una cantidad de 0.03 a 0.45% en peso, mezclándolos de 60 a 90 minutos a una temperatura de 10 a 30°C, y dejándolo reaccionar de 10 a 35 minutos adicionales a la finalización de la reacción. Posteriormente, el efluente tratado es neutralizado a pH entre 7 a 8 agregando un floculante base poliacrilamida y un coagulante en una cantidad de 0.01 a 1.5% en peso con agitación constante. La mezcla se deja sedimentar entre 0.5 a 3 horas, después el agua limpia es separada de los sedimentos producidos. El método puede ser llevado en estado estacionario, en equipos semicontinuos y continuos.

De esta manera, el TEC de suelo contaminado con el proceso Fenton puede acoplarse para tener un sistema integral, como lo reportado por Bustos, E., Cárdenas, J., Ochoa, B. y Pérez M. en "Equipo y Proceso de Tratamiento Electrocinético con un Arreglo de Electrodo Circular para la Rehabilitación Biológica de Suelo Contaminado con Compuestos Orgánicos *in situ* y *on site* en el documento de patente MX/a/2014/000833. Es así como esta patente a diferencia de la MX/a/2014/000833 emplea un reactor electroquímico tubular en flujo que favorece el transporte de masa para la remoción de hidrocarburo a lado del sitio contaminado, con el fin de lograr el TEC de suelo con poca accesibilidad para su tratamiento y reducción de los tiempos de los trabajos de la rehabilitación del suelo.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

A diferencia de lo descrito en el estado de la técnica, la presente invención consiste en efectuar el TEC *on site* de suelo contaminado con HC empleando un reactor electroquímico tubular en flujo con dos electrodos sólidos entre 0.5 y 1.0 m de diámetro en sus extremos, separados entre 0.5 y 1.0 m entre ellos; ambos electrodos con perforaciones homogéneas y radiales en toda su superficie para permitir el paso del flujo hidráulico del electrolito soporte (ES) que se adicione, teniendo como ánodo un electrodo de Ti de superficie modificada con óxidos de metales de transición tales como Ir y Ta, y el cátodo es de Ti. Además, es importante mencionar que para efectuar el TEC es recomendable que el reactor electroquímico tubular conteniendo al suelo contaminado sea llenado entre un 70 y 90% de su capacidad, así como saturar el reactor con el ES al menos 12 horas antes de comenzar el TEC, el cual estará compuesto de una solución de hidróxido de sodio (NaOH) con una concentración entre 0.05 y 1.0 M para remover HC, aplicando un campo eléctrico entre 1 y 3 V cm⁻¹ de 8 a 10 horas.

Al final del TEC *on site* para remover HC de suelo contaminado, el agua residual se trata mediante un reactor para el proceso de oxidación Fenton donde la reacción comprende adicionar entre 1 000 a 18 000 mg L⁻¹ de FeSO₄•7H₂O, así como H₂O₂ entre 400 a 45 000 mg L⁻¹ en un reactor con agitación constante con el fin de degradar y/o transformar los compuestos orgánicos, los cuales posteriormente pasan a un sedimentador y finalmente a un filtro de arena y grava para generar agua con calidad de descarga de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996.

25

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

Las figuras que se anexan se explican de la siguiente manera:

- La Figura 1 es una vista completa en isométrico de un reactor electroquímico tubular con el arreglo cilíndrico *on site* de electrodos descrita en la presente invención, y el reactor del proceso de oxidación Fenton acoplados para el proceso de tratamiento y la degradación de la solución generada que contiene los HC removidos por el TEC *on site* del suelo.
5
- La Figura 1a es una representación esquemática de una vista superior que muestra cómo están interconectados en un reactor electroquímico tubular con el arreglo cilíndrico *on site* de electrodos y el reactor del proceso de oxidación Fenton acoplados, las bombas peristálticas, los tanques y el rectificador.
- 10 – La Figura 1b es una representación esquemática de una vista frontal que muestra cómo están interconectados mediante mangueras el reactor electroquímico tubular con el arreglo cilíndrico *on site*, el tanque de electrolito y el reactor del proceso de oxidación Fenton.
- La Figura 1c es una representación esquemática de una vista lateral derecha que muestra las válvulas de alimentación y de salida del reactor electroquímico tubular con el arreglo cilíndrico *on site* de electrodos.
15
- La Figura 1d es una representación esquemática de una vista lateral izquierda que muestra el arreglo del reactor del proceso de oxidación Fenton, tablero eléctrico y sedimentador de placas paralelas.
- 20 – La Figura 1e muestra un corte transversal A–A' izquierdo del ánodo de Ti de superficie modificada con óxidos de metales de transición tales como el Ir y Ta colocado en su compartimiento anódico, y el cátodo de Ti colocado en su compartimiento catódico, del suelo contaminado a tratar y del reactor electroquímico tubular con el arreglo cilíndrico *on site* de electrodos.
- 25 – La Figura 2 muestra el reactor electroquímico tubular con el arreglo cilíndrico *on site* de electrodos mostrando sus componentes internos y externos.
- La Figura 2a muestra un corte transversal A – A' izquierdo del reactor electroquímico tubular con el arreglo cilíndrico *on site* de electrodos mostrando la zona de separación entre el ánodo de Ti de superficie modificada con óxidos de metales de transición tales como el Ir y Ta y el cátodo de Ti.
30

- La Figura 3, 3a, 3b, 3c y 3d muestran la secuencia de TEC *on site* y el reactor del proceso de oxidación Fenton empleado.
- La Figura 4, 4a, 4b y 4c muestran al reactor del proceso de oxidación Fenton en conjunto con todas sus partes internas utilizado para la generación *in situ* de los radicales hidroxilos para la degradación de los contaminantes orgánicos removidos en el TEC *on site*.
- Las Figuras 5, 5a y 5b muestran al separador de placas coalescentes en conjunto con todas sus partes internas, el cual es empleado para separar las grasas y aceites en el agua residual por diferencia de densidad.
- La Figura 6 y 6a muestran al sedimentador de placas paralelas empleado en la sedimentación de los lodos producidos del proceso de oxidación Fenton.
- La Figura 7 muestra el filtro de grava y arena empleado para mejorar la calidad del efluente tratado.

15

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

La presente invención se refiere a un equipo y proceso de TEC *on site*, es decir a lado del sitio contaminado, con un arreglo tubular en flujo con un par de electrodos para suelo contaminado con compuestos orgánicos como los HC, el cual consta de diversos componentes que a continuación se describen a detalle de acuerdo con las siguientes figuras.

Las Figuras 1, 1a, 1b, 1c, 1d y 1e corte transversal A – A' muestran esquemáticamente el equipo para el TEC *on site* en flujo que se refiere en la presente invención utilizado para el tratamiento de suelo contaminado con compuestos orgánicos como los HC de fracción intermedia y pesada, dicho equipo consta de un reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos (11) que puede ser de un material plástico tal como son el acrílico, PVC y polietileno de alta densidad, conformada por una primera media celda inferior del

reactor electroquímico tubular (107) en donde un ánodo de Ti con óxidos de metales de transición tales como el Ir y Ta (109) es colocado en su compartimento anódico (104) que está en el extremo opuesto de un cátodo de titanio (110) que también es colocado en su correspondiente compartimento catódico (105). La segunda media

5 celda superior del reactor electroquímico tubular (1) cuenta con una protuberancia con una pluralidad de orificios de la media celda superior (92) sobre la primera media celda inferior del reactor electroquímico tubular (107) que también cuenta con una protuberancia con una pluralidad de orificios de la media celda superior (83) haciéndolos coincidir y sellándose ambas con el empaque de neopreno de las

10 medias celdas (113) y fijándose con los tornillos para unir las medias celdas (114) y las tuercas para unir las medias celdas (115). En el equipo al ánodo de Ti de superficie modificada con óxidos de metales de transición tales como Ir y Ta (109) se le instala el borne anódico de acero (7) con la cuerda del borne anódico (95) y se le inserta en la parte superior del borne anódico de acero (7) el sello del borne anódico

15 (96). Asimismo, en el equipo al cátodo de Ti (110) se le instala el borne catódico de acero (9) con la cuerda del borne catódico (97) y se le inserta en la parte superior del borne catódico de acero (9) el sello del borne catódico (98) para lograr un sello hermético del reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos (11) que se soporta en la base de acero del reactor electroquímico tubular

20 (103). Para que se inicie el TEC con el equipo, los electrodos son conectados a una fuente de poder (10) mediante la conexión de un primer extremo del cable eléctrico (3) a la parte superior del borne anódico de acero (7) para el ánodo de Ti de superficie modificada con óxidos de metales de transición tales como el Ir y Ta (109) y el segundo extremo del cable eléctrico (3) al polo negativo de la fuente de poder

25 (10) y la conexión de un primer extremo del cable eléctrico (4) a la parte superior del borne catódico de acero (9) para el cátodo de Ti (110) y el segundo extremo del cable eléctrico (4) al polo positivo de la fuente de poder (10), la cual es alimentada con un voltaje principal entre 50 y 200 volts, con el fin de iniciar el proceso de TEC del suelo contaminado con HC a tratar (106). El reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos (11) cuenta con dos pares de barreras

30 físicas de celulosa (35 y 36) que separa al suelo contaminado con HC a tratar (106) y

al ánodo de titanio con óxidos de metales de transición tales como el Ir y Ta (109) y al cátodo de Ti (110) para evitar que las perforaciones de los electrodos se obstruyan y no dejen pasar el flujo. En el reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos (11) el suelo contaminado con HC a tratar (106) se

5 agrega manualmente mediante la abertura de las puertas de alimentación del reactor electroquímico tubular (2, 5 y 8) y al quedar totalmente lleno el reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos (11) del suelo contaminado con HC a tratar (106) se le colocan nuevamente las puertas de alimentación del reactor electroquímico tubular (2, 5 y 8) sellándolas con el empaque de neopreno de las

10 puertas de alimentación (111) y fijándolas con los tornillos de las puertas de alimentación (112). Posteriormente a través del reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos (11) se hace recircular el ES de NaOH entre 0.05 y 1.0 M mediante la utilización de una bomba peristáltica del ES (12) al reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos (11), la cual

15 utiliza la manguera del ES (81) conectada a la válvula de alimentación (108). De esta manera, el ES es succionando de un tanque contenedor de la solución de NaOH (15) y alimentando mediante la tubería de entrada (93) al interior del reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos (11) mediante la

20 abertura regulada de la válvula de alimentación (108) y manteniendo cerrada la válvula de salida (6), la cual está conectada a la tubería de salida (94). Una vez llenado de solución de ES todo el volumen del reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico de electrodos (11) se cierra la válvula de alimentación (108) y se

25 deja de operar la bomba peristáltica del ES (12). Posteriormente, el suelo contaminado con HC a tratar (106) que se encuentra dentro del reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico de electrodos (11) se deja humectar totalmente durante 18 horas, terminado el tiempo se abre la válvula de salida (6) que

30 está conectada a la tubería de salida (94) y a la manguera del tanque de almacenamiento del ES con los HC (80), la cual es utilizada por la bomba peristáltica para succionar el ES con los HC (13) que enseguida es encendida para succionar y recircular a un tanque de la captación del ES + HC (14); al mismo tiempo se enciende nuevamente la bomba peristáltica del ES (12) y se abre la válvula de

alimentación (108) para succionar del tanque contenedor de la solución de NaOH (15) y dar inicio en forma continua al TEC. El TEC del reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos (11) y el reactor del proceso de oxidación Fenton (18) inicia con la remoción de los contaminantes en solución

5 empleando la bomba peristáltica para succionar el ES con los compuestos orgánicos (13) utilizando la manguera del tanque de almacenamiento del ES con los HC (80) conectada a la válvula de salida (6) y que vienen del reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos (11) acumulando la solución en el tanque de la captación del ES + HC (14), el cual se alimenta posteriormente

10 mediante la bomba peristáltica de succión del ES con los HC (16) utilizando la manguera para conducir el ES residual con los compuestos orgánicos del TEC (84) al reactor del proceso de oxidación Fenton (18). El ES con los HC de fracción intermedia y pesada se envía al separador de placas coalescente (17) previamente acidificado a un valor de pH entre 1.0 y 5.0 con H_2SO_4 en concentración del 50 al 98

15 % que se suministra del tanque de almacenamiento de H_2SO_4 (25) empleando para su alimentación la bomba dosificadora de alimentación de H_2SO_4 grado industrial (61), esto se logra empleando un mezclador estático de H_2SO_4 (62) y en el separador de placas coalescentes (17) se separan las grasas y natas de las aguas residuales que se vierten en el tanque colector de grasas y natas (31). Posteriormente, el agua

20 contaminada con los HC llega por gravedad al reactor del proceso de oxidación Fenton (18) y del tanque de almacenamiento del $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ (24) se adiciona este reactivo en una concentración de 1 000 a 18 000 $mg L^{-1}$ utilizando la bomba dosificadora para alimentar $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ grado industrial (20). Al mismo tiempo, en el reactor del proceso de oxidación Fenton (18) se agrega del tanque de

25 almacenamiento del H_2O_2 (23) con una concentración de 400 a 45 000 $mg L^{-1}$ succionado por la bomba dosificadora para alimentar H_2O_2 (19) para lograr la generación de los radicales hidroxilos. La reacción en el reactor del proceso de oxidación Fenton (18) se lleva a cabo en un tiempo de aproximadamente 5 horas establecido para la degradación de los HC y en agitación continua mediante el

30 agitador tipo RZR1, 115V, 60 Hz, 70 Watts (30) a 120 rpm, el cual está unido a un

copla de propela y flecha del reactor del proceso de oxidación Fenton (63). El efluente del reactor del proceso de oxidación Fenton (18) se neutraliza a un pH entre 6.0 y 7.0 mediante el empleo de NaOH de 0.5 a 1.0 M a un flujo de 1.33 mL min^{-1} que se succiona del tanque de almacenamiento de NaOH (22) utilizando para su alimentación la bomba dosificadora para suministrar NaOH grado industrial (21), y mediante el uso de un mezclador estático de NaOH (26). El efluente tratado sigue hacia el sedimentador de placas paralelas (27), en donde se sedimentan los sólidos suspendidos presentes en el efluente oxidado que posteriormente son vertidos al tanque de lodos (32) y se obtiene el líquido clarificado en el tanque de almacenamiento del líquido clarificado (28) mediante el empleo de la bomba centrífuga horizontal (33). Este efluente tratado se envía a través del filtro de grava y arena (29), hasta obtener un efluente sin sólidos suspendidos, el cual utilizando la manguera para la salida del líquido extraído del filtro de grava y arena (86) conectada a la salida del filtro de grava y arena (29) se devuelve al tanque contenedor de la solución de NaOH (15) para que mediante la bomba peristáltica del ES (12), y la manguera del ES (81) se envíe nuevamente al reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos (11) para ser reusado en el tratamiento, o bien se envía a una planta biológica para su posterior tratamiento, o se emplea para riego del suelo circundante. El reactor del proceso de oxidación Fenton (18) cuenta con un tablero eléctrico (34) y con ruedas del bastidor del reactor del proceso de oxidación Fenton (37) para su desplazamiento.

Las Figuras 2 y 2a son una representación esquemática de los componentes internos y externos del reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos (11) donde se muestra como se ensambla cada componente para iniciar el TEC. El equipo está integrado por una media celda inferior del reactor electroquímico tubular (107) que se soporta por una base de acero del reactor electroquímico tubular (103) y que cuenta con dos medias lunas anódica y catódica de la media celda inferior del reactor electroquímico tubular (101 y 102) de acero y que se emplean para sujetar la segunda media celda superior del reactor electroquímico tubular (1) que también utiliza dos medias lunas anódica y catódica de la media celda superior del reactor electroquímico tubular (99 y 100) de acero

fijándose las cuatro mediante tornillería. Antes de unir la media celda inferior del reactor electroquímico tubular (107) con la media celda superior del reactor electroquímico tubular (1) con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos (11), se fija en la media celda inferior del reactor electroquímico tubular (107) utilizando la guía del compartimento anódico (38). De esta manera, el ánodo de Ti de superficie modificada con óxidos de metales de transición tales como Ir y Ta (109) en su compartimento anódico (104) y mediante la guía del compartimento catódico (78), se fija el cátodo de Ti (110) en su correspondiente compartimento catódico (105). Posteriormente, se colocan las barreras físicas de celulosa del ánodo (35) en ambas caras del ánodo de Ti de superficie modificada con óxidos de metales de transición tales como Ir y Ta (109) sostenidas mediante las guías de plástico flexible anódicas (116) que presionan contra la guía del compartimento anódico (38) y de igual manera se colocan las barreras físicas de celulosa del cátodo (36) en ambas caras del cátodo de Ti (110) sostenidas mediante las guías de plástico flexible catódicas (117) que presionan contra la guía del compartimento catódico (78) de manera que la media celda inferior del reactor electroquímico tubular (107) está lista para ser ensamblada con la media celda superior del reactor electroquímico tubular (1). De tal manera que en el reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos (11) la media celda inferior del reactor electroquímico tubular (107) se ensambla con la segunda media celda superior del reactor electroquímico tubular (1) a través de una protuberancia con una pluralidad de orificios de la media celda superior (92) y colocándola sobre la primera media celda inferior del reactor electroquímico tubular (107), la cual también cuenta con una protuberancia con una pluralidad de orificios de la media celda inferior (83) haciéndolos coincidir y sellándose entre ambas con empaque de neopreno de las medias celdas (113) y fijándose con los tornillos para unir las medias celdas (114) y tuercas para unir las medias celdas (115). Ensamblado el reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos (11), en la parte superior al ánodo de Ti de superficie modificada con óxidos de metales de transición tales como Ir y Ta (109) se le instala el borne anódico de acero (7) con la cuerda del borne anódico (95) utilizando el orificio anódico (79), a la cual se le inserta en la parte superior del borne anódico de

acero (7) el sello del borne anódico (96). Asimismo, en el reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos (11) en la parte superior al cátodo de Ti (110) se le instala el borne catódico de acero (9) con la cuerda del borne catódico (97) utilizando el orificio catódico (82), y se le inserta en la parte superior del

5 borne catódico de acero (9) el sello del borne catódico (98) para lograr un sello hermético del reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos (11). En el reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos (11) el suelo contaminado con HC a tratar (106) se agrega

10 manualmente con un recipiente a través de las aberturas de las puertas de alimentación del reactor electroquímico tubular (2, 5 y 8) para llenar la primera parte que corresponde a la media celda inferior del reactor electroquímico tubular (107), y la segunda parte que corresponde a la media celda superior del reactor electroquímico tubular (1). Una vez lleno el reactor electroquímico tubular con un

15 arreglo cilíndrico *on site* de electrodos (11) del suelo contaminado con HC a tratar (106) se le colocan nuevamente las puertas de alimentación del reactor electroquímico tubular (2, 5 y 8) sellándolas con empaque de neopreno de las

puertas de alimentación (111) y fijándolas con tornillos de las puertas de alimentación (112). El reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos (11) cuenta con una válvula de alimentación (108) conectada a la tubería de entrada

20 (93) y una válvula de salida (6) conectada a la tubería de salida (94).

La Figura 2a es una representación esquemática de un corte transversal A - A' del reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos (11) donde se muestra como quedan instalados internamente el ánodo de Ti de superficie modificada con óxidos de metales de transición tales como Ir y Ta (109) con su borne

25 anódico de acero (7) y el Cátodo de Ti (110) con su borne anódico de acero (9). Asimismo, las zonas del reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos (11) que corresponden al compartimento anódico (104) y al compartimento catódico (105), así como principalmente a la zona de separación

entre los electrodos (118) que son el ánodo de Ti de superficie modificada con óxidos

30 de metales de transición tales como Ir y Ta (109) y el cátodo de Ti (110), mostrando en esta figura como debe de quedar distribuido en todo el volumen el suelo

contaminado con HC a tratar (106) en el reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos (11).

Las Figuras 3, 3a, 3b, 3c, 3d son representaciones esquemáticas donde se muestra la secuencia del reactor del proceso de oxidación Fenton (18) empleado incluye una

5 bomba peristáltica de succión del ES con los HC (16) para conducir la solución generada que contiene los HC removidos por el TEC *on site* del suelo, esta solución es el líquido extraído de aguas residuales del TEC utilizando la manguera para conducir el ES residual con los compuestos orgánicos del TEC (84) hacia el

10 mezclador estático de H_2SO_4 (62) con ayuda de una bomba dosificadora de alimentación de H_2SO_4 grado industrial (61). En este lugar, se adiciona el ácido en una concentración del 50 al 98%, el cual es succionado del tanque de almacenamiento de H_2SO_4 (25), con el fin de ajustar el pH entre 1.0 y 5.0 para la reacción en el reactor del proceso de oxidación Fenton (18). Posteriormente, la solución una vez acidificada pasa a un separador de placas coalescentes (17) donde

15 las grasas y aceites son separados del agua residual por diferencia de densidad y vertidos en el tanque colector de grasas y natas (31). Enseguida la solución pasa al reactor del proceso de oxidación Fenton (18), donde se emplea la bomba dosificadora para alimentar $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ grado industrial (20), el cual es succionado del tanque de almacenamiento del $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ grado industrial (24); de la misma

20 manera, se emplea la bomba dosificadora para alimentar el H_2O_2 (19) para administrar este agente oxidante del tanque de almacenamiento del H_2O_2 (23) que alimentados en conjunto a través del tubo sumergido para mezclar $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ y H_2O_2 (39) reaccionan agitándolos mediante el agitador tipo RZR1 115V, 60 Hz, 70 watts (30) y la propela de agitador (67) para producir *in situ* los radicales hidroxilos

25 empleados para la oxidación de la materia orgánica en el reactor del proceso de oxidación Fenton (18) y durante la reacción de oxidación se producen natas y espumas que se retiran a través del colector cónico de natas y espumas (41). Posteriormente, utilizando la bomba dosificadora para suministrar NaOH grado industrial (21) con una concentración del 50% como máximo contenido adicionado

30 del tanque de alimentación de NaOH (22) con el que se neutraliza la solución

oxidada que sale de dicho reactor del proceso de oxidación Fenton (18) hasta un pH entre 6.0 y 7.0 mediante el empleo del mezclador estático de NaOH (26). Enseguida, el efluente oxidado pasa al sedimentador de placas paralelas (27) donde se sedimentan los sólidos suspendidos en el fondo y que al acumularse posteriormente son drenados como lodos al tanque de lodos (32) y el líquido clarificado que se vierte en la parte superior del sedimentador de placas paralelas (27) se almacena en el tanque de almacenamiento del líquido clarificado (28), el cual posteriormente es bombeado mediante la bomba centrífuga horizontal (33) para ser filtrada en un filtro de grava y arena (29). De esta manera, el agua filtrada puede ser descargada utilizando la manguera para la salida del líquido extraído del filtro de grava y arena (86) a una planta biológica convencional o se recircula para preparar nueva solución de ES empleado en el TEC como es el NaOH, o bien, una vez verificada la calidad del agua de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996 esta puede emplearse para riego del suelo circundante. Toda esta distribución del equipo se emplea para tratar los efluentes de la industria de los HC de fracción intermedia y pesada con compuestos orgánicos generados del TEC como se ilustra en las Figuras 3, 3a, 3b, 3c y 3d, el cual va acoplado al proceso de TEC del suelo contaminado con HC a tratar (106) ubicado en la celda electrocinética con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos (11) como se ilustra en las Figuras 1, 1a, 1b, 1c, 1d, 1e, 2 y 2a. El reactor del proceso de oxidación Fenton (18) tiene un bastidor móvil (85), el cual emplea ruedas del bastidor del reactor del proceso de oxidación Fenton (37) para su desplazamiento y fijación, también cuenta con un tablero eléctrico (34) para el accionamiento de los equipos.

En relación a las Figuras 4, 4a, 4b y 4c se muestra esquemáticamente en sus partes internas el reactor del proceso de oxidación Fenton (18), en donde el agua residual con compuestos orgánicos generada en el TEC previamente acidificada con H_2SO_4 entre pH 1.0 y 5.0 entra en la boquilla del reactor del proceso de oxidación Fenton (48), el cual dispone de un tubo sumergido para mezclar $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ y H_2O_2 (39) que sirve para lograr la mezcla de estos compuestos químicos en una relación molar de Fe^{+2}/H_2O_2 de 0.05 a 0.4 que se agregan en el agua residual que está entrando al

reactor para ser tratada con los radicales hidroxilos que se generan. En el interior del reactor del proceso de oxidación Fenton (18) también se tiene un colector cónico de natas y/o espumas (41) que son producidas durante la reacción de oxidación y enviadas por la boquilla del colector de natas y/o espumas (42) como desecho.

5 Además, los baffles del reactor del proceso de oxidación Fenton (40) logran un mezclado uniforme de la reacción de oxidación y evita zonas sin reacción. El mezclado se realiza mediante un agitador tipo RZR1 115 V, 60 Hz, 70 watts (30) que cuenta con una base del agitador (64) mediante el que se fija sobre el soporte del agitador (65), el cual, tiene ajustado una flecha del agitador (66) que lleva una

10 propela del agitador (67) unidos mediante el cople de propela y flecha del reactor del proceso de oxidación Fenton (63) para agitar la solución en un rango de 30 minutos a 10 horas de manera suave y constante la solución durante la reacción. Este reactor del proceso de oxidación Fenton (18) cuenta también con un fondo cónico (47) y una boquilla de descarga de lodos (46) producidos en la reacción que son utilizados

15 durante su mantenimiento. El efluente oxidado sale por el conducto de descarga del reactor del proceso de oxidación Fenton (68) y que vierte por la boquilla de descarga del efluente (43) para seguir su posterior tratamiento con el proceso Fenton. Se muestra también los cartabones (44) y el cincho (45) que son utilizados para la fijación del reactor del proceso de oxidación Fenton (18).

20 En relación a las Figuras 5, 5a y 5b se muestra el separador de placas coalescentes (17) para la separación de grasas y aceites que funciona con el principio de diferencia de densidad, donde se muestran todas las partes internas que intervienen en este componente, en donde el agua residual con compuestos orgánicos extraída del TEC previamente acidificada con H_2SO_4 a un pH entre 1.0 y 5.0 entra a través del

25 orificio del separador de placas coalescentes (49) hacia el separador de placas coalescentes (17) por la pared lateral del separador de placas coalescentes (57), que en su interior tiene un empaque coalescente (60) que sirve para incrementar la separación de grasas y aceites mediante el aglomerado de burbujas de aceite que se van hacia la superficie. Este separador de placas coalescentes (17) cuenta en su

30 interior con un orificio de descarga de grasas y aceites del separador de placas coalescentes (52) por donde se drenan las grasas y aceites separadas del agua,

además tiene un baffle de descenso (54) con su correspondiente parte superior del baffle de descenso (51) para asegurar que las grasas y aceites se separen y el efluente acidificado libre de aceite se dirija hacia la parte inferior del separador de placas coalescentes (58) hasta el fondo del separador coalescente (50), y otro baffle de ascenso (55) que obliga que este mismo efluente se dirija hacia el borde superior del separador de placas coalescentes (56) asegurando la separación de las grasas. Finalmente el efluente con compuestos orgánicos extraído del TEC acidificado y donde se separaron las grasas y aceites, sale por el orificio del efluente del separador de placas coalescentes (53) hacia el tratamiento siguiente. Además, en la Figura 5a se muestra el fondo cónico del separador de placas coalescentes (59) donde se acumulan los lodos sedimentados del agua previamente acidificada. El separador de placas coalescentes (17) cuenta con un borde superior del separador de placas coalescentes (56) para su fijación.

En las Figuras 6 y 6a se describe el sedimentador de placas paralelas (27) utilizado en este equipo, en donde se observa la trayectoria que sigue la solución del clarificado oxidado mediante radicales hidroxilos y que fue neutralizado entre pH 6.0 y 7.0, el cual entra por la boquilla del sedimentador de placas (71) hacia el canal de alimentación del sedimentador de placas (70), el cual viaja hacia la parte superior a través de la sección de placas paralelas (69) que están instaladas a 45° con respecto a la horizontal y donde los lodos procedentes del reactor del proceso de oxidación Fenton (18) se van sedimentando en el fondo cónico del sedimentador de placas (74) como se ilustra en la Figura 6. La Figura 6a muestra todos los componentes del sedimentador de placas paralelas (27), donde el líquido oxidado con sólidos suspendidos que viene neutralizado entre pH 6.0 y 7.0 entra por la boquilla del sedimentador de placas (71) para introducirse en la sección del canal de alimentación del sedimentador de placas (70) que obliga al efluente conducirse hacia la parte inferior del sedimentador de placas para entrar en el compartimento de soporte de placas paralelas (72) donde se encuentra la sección de placas paralelas (69) instaladas a 45° con respecto a la horizontal, dirigiéndose finalmente el efluente libre de sólidos como líquido clarificado hacia la parte superior de esta zona en donde se encuentran los orificios del vertedor del sedimentador de placas (77) y

finalmente saliendo por la boquilla del sedimentador de placas (76) hacia su posterior tratamiento o almacenamiento. Se muestra también el fondo cónico del sedimentador de placas (74) en donde se acumulan los lodos que se van separando, así como la boquilla de descarga de los lodos del sedimentador de placas (75) de los mismos y los cartabones (73) para fijar el equipo en el proceso de oxidación Fenton. La Figura 7 describe el filtro de grava y arena (29) que se emplea para mejorar la calidad final del efluente previamente tratado mediante el proceso de oxidación Fenton que se encuentra neutralizado a pH entre 6.0 y 7.0, y en donde aparecen las diferentes capas utilizadas del material filtrante, en donde se emplea una mezcla de sólidos que considera una proporción de 15% de grava gruesa (87) con tamaños de partícula de 16 a 32 mm, 15% de grava mediana (88) con tamaños de partícula de 8 a 16 mm, 15% de grava fina (89) con tamaños de partícula de 4 a 8 mm, 15% (90) de arena fina con tamaños de partícula de 125 a 250 μm y 15% de carbón activado (91), el resto del porcentaje es volumen vacío del filtro de grava y arena (29) para asegurar la separación de sólidos suspendidos remanentes. El filtro de grava y arena (29) opera a una carga hidráulica de 100 a 120 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$.

Un proceso para el TEC *on site* en flujo de suelo contaminado con HC que emplea el equipo descrito anteriormente donde el proceso comprende los siguientes pasos:

- a) Tamizar el suelo con HC compuestos orgánicos a un tamaño de malla de 12.5 mm y eliminar cualquier material superior a este tamaño, así como partes metálicas y plásticas que se encuentren en el mismo y que pueden interferir en el TEC.
- b) Homogeneizar el suelo y colocarlo en forma manual en el interior del reactor electroquímico tubular.
- c) Utilizar un reactor electroquímico tubular con flujo hidráulico estando presente dos electrodos sólidos perforados de 0.5 a 1.0 m de diámetro y un espesor de 5 a 10 mm.

- d) Instalar los electrodos, teniendo como ánodo de Ti de superficie modificada con óxidos de metales de transición tales como Ir y Ta, así como el cátodo al Ti para el tratamiento de suelo con HC.
- e) Colocar el suelo contaminado a tratar dentro de un reactor electroquímico tubular en su compartimento anódico y entre la zona de un ánodo de Ti de superficie modificada con óxidos de metales de transición tales como el Ir y Ta, así como un cátodo de Ti en el compartimento catódico para HC.
- f) Utilizar los electrodos (ánodo y cátodo) con perforaciones homogéneas de 5 a 20 mm de diámetro en toda su superficie para permitir el paso del flujo hidráulico.
- g) Colocar los electrodos con una separación de 1.0 a 1.5 metros de distancia (ánodo con respecto al cátodo).
- h) Colocar barreras físicas de celulosa que separan al suelo contaminado con HC del ánodo de Ti de superficie modificada con óxidos de metales de transición tales como el Ir y Ta y al cátodo de Ti.
- i) Conectar un borne de acero al ánodo de Ti de superficie modificada con óxidos de metales de transición tales como Ir y Ta, al polo positivo de una fuente de poder con un rectificador de corriente.
- j) Conectar un borne de acero al cátodo de Ti al polo negativo de una fuente de poder con un rectificador de corriente.
- k) Preparar una solución denominada ES empleando NaOH de 0.01 a 0.1 M en un tanque para humectar el suelo contaminado con HC.
- l) Humectar el suelo contaminado con compuestos orgánicos a tratar con el electrolito soporte en el volumen correspondiente donde se encuentra el compartimento anódico, el compartimento catódico y el volumen donde se encuentran separados el ánodo y el cátodo durante 18 horas con el NaOH 0.01 a 0.1 M.

- m) Aplicar una corriente en el reactor electroquímico tubular entre 5 y 15 A por al menos 8 horas, para generar un campo eléctrico entre 1 000 y 1 500 A cm⁻¹.
- n) Realizar el tratamiento de la solución generada que contiene los HC removidos por el TEC *on site* DEL SUELO con el proceso de oxidación Fenton generado *in situ* para degradar o transformar los HC y producir agua tratada y lodos.
- o) Reciclar el agua tratada para producir nueva solución de electrolito NaOH utilizado en el proceso.
- p) Recuperar los lodos a partir del proceso de oxidación Fenton que podrán ser nuevamente reutilizados como reactivo.

10

Con el propósito de ilustrar la composición y método de la presente invención, se muestran los siguientes ejemplos para ilustrar el método, sin embargo no es una condición límite de la invención.

15

EJEMPLOS

Ejemplo 1. Tratamiento Electrocinético on site en Flujo de Suelo tipo Vertisol pélico Contaminado con Hidrocarburos.

20 Se efectuó un muestreo de suelo limpio y contaminado con HC con base a la normal NMX2-12/1-1987 y el Capítulo 9 de la serie SW82-EPA. De esta manera, la toma de muestras de suelo contaminado se realizó dentro de un área de confinamiento de residuos peligrosos en una zona industrial hasta una profundidad de 61 cm en donde se localizó el segundo horizonte (roca madre). El suelo limpio se tomó de una zona
25 dedica al cultivo a 20 Km aproximadamente de la zona industrial, en donde se realizó una perforación. Estas muestras se secaron bajo la obscuridad en un lugar cerrado

para evitar que les diera el aire exterior y el sol, con el fin de evitar se contaminaran o volatizaran los HC semivolátiles. Posteriormente estas muestras se trituraron, se tamizaron y se homogeneizaron por el método de cuarteo, con el fin de determinarles el pH en H₂O y KCl bajo el método AS-11-1997 y AS-13-1997 respectivamente, así como el color con las tablas de Munsell bajo el método AS-07-1997, materia orgánica (M.O.) con el método de Walkley y Black modificado, textura con la técnica del hidrómetro de Bouyoucos, la densidad aparente y real con el método AS-15-2007, la capacidad de intercambio catiónico total (CIC), los iones por espectroscopía de ICP según la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, así como la extracción de HC no volátiles a partir del método de extracción por Soxhlet según la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 y NMX – AA – 005 – SCFI - 2000.

Una vez caracterizado edafológicamente el suelo limpio se determinó que era un Vertisol pélico por ser un suelo ligeramente ácido, el cual tiende a la neutralidad conforme aumenta su profundidad por el alto contenido en M.O. manteniendo un color oscuro al humedecer el suelo tipo arcilloso (52.54 % arcilla, 22.16 % limo y 25.30 % arena), con una densidad aparente de 1.7 g cm⁻³ y una densidad real de 2.5 g cm⁻³ con 32 % de poros y una CIC de 38.2 meq / Kg de suelo. Para el caso del suelo contaminado con 112 800 mg HC / Kg de suelo base seca, los resultados mostraron que el pH era completamente neutro y la variación entre las determinaciones es menor que en la muestra limpia porque el contenido de HC en el suelo acumula las partículas de arcilla presentes en él en los primeros horizontes y reduce el contenido de M.O., lo cual impidió que se tuviera un mayor intercambio de iones y a su vez imposibilitando el libre movimiento de los H⁺ que se encontraban en el suelo tipo franco – arcilloso (19.18 % arcilla, 16.85 % limo y 63.97 % arena), lo que generaba colores claros del suelo con una densidad aparente de 1.7 g cm⁻³ y una densidad real de 1.99 g cm⁻³ con 14.57 % de poros, así como una disminución de especies cargadas (Ca⁺², Na⁺, Mg⁺², entre otros) presentes en las arcillas de 15.68 meq / Kg suelo.

De esta manera, el suelo Vertisol pélico contaminado con HC se empleó para el TEC *on site* empleando un reactor electroquímico tubular y horizontal de acrílico. El

reactor electroquímico tubular tenía un par de tapas, una a cada lado respectivamente con las mismas dimensiones en cuanto a los diámetros señalados, esta parte del reactor corresponde al compartimiento anódico y catódico. En la zona de unión del cuerpo del reactor y las tapas se empleó papel filtro y un empaque de hule, el uso del papel filtro se realizó con la finalidad de evitar que el flujo del electrolito arrastrara y depositara el suelo en el compartimiento catódico o anódico del reactor, así como lograr un adecuado confinamiento del suelo. Los empaques de neopreno entre los compartimentos se colocaron para evitar posibles fugas y sellar la unión tapa-área de confinamiento de suelo. En el reactor se emplearon válvulas, los cuales iban unidos a las tapas de manera lateral que es por donde se tenía la alimentación del ES al compartimiento del ánodo y saliera por el lado del cátodo. Dos conectores más iban unidos en la parte superior de las tapas, a través de los cuales salía el extremo de los electrodos por donde se conectaban a la fuente de poder para posteriormente aplicar un potencial constante y efectuar el TEC.

Para crear la diferencia de potencial entre los electrodos, se empleó una fuente de poder, y la corriente de salida se estuvo monitoreando empleando un multímetro digital. El flujo de alimentación se hizo pasar con la ayuda de una bomba peristáltica. En el TEC se empleó como ánodo un electrodo de Ti de superficie modificada con óxidos de metales de transición tales como el Ir y Ta, y como cátodo un electrodo de Ti. Es así como de acuerdo con los resultados de remoción del contaminante se estableció que al aplicar un potencial de trabajo de 20 V con un flujo de NaOH 0.1 M en donde los compuestos que mayor remoción presentaron fueron el lindano, seguido del 1-metil-naftaleno con una remoción del 87.93 y 72.04% respectivamente en 6 horas.

La solución producida del ES NaOH con HC de la aplicación del TEC al suelo Vertisol pélico contaminado con HC a la salida del reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos presentó una concentración de Demanda Química de Oxígeno (DQO) de 8 800 mg L⁻¹ debido a la alta concentración de contaminantes removidos y un pH de 12. De esta manera, al ES con HC se le aplicó en continuo el tratamiento de oxidación avanzada con el equipo del reactor del proceso de oxidación Fenton acoplado al TEC para lograr una eficiencia de remoción

del 76 %. El bombeo de la solución producida del ES NaOH con HC fue con un flujo de 0.7 L min^{-1} , y la alimentación de las sustancias químicas para producir los °OH para la oxidación de la materia orgánica en el reactor del proceso de oxidación Fenton correspondieron a una relación en peso (w/w) de $14.43 \text{ H}_2\text{O}_2 / \text{Fe}^{+2}$ que equivale a una concentración de 14.43 g L^{-1} de H_2O_2 y 5 g L^{-1} de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $3.32 \text{ H}_2\text{O}_2 / \text{DQO}$ removida, $0.23 \text{ Fe}^{+2} / \text{DQO}$ removida durante un tiempo de reacción de 90 minutos. Esta reacción se efectuó con una agitación constante en el reactor del proceso de oxidación avanzada Fenton de 120 rpm, el pH de ajuste de la reacción Fenton fue de 3.0 usando H_2SO_4 grado industrial al 99 % con un flujo de 1.54 mL min^{-1} ; la adición de Fe^{+2} fue como $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ grado industrial al 98 %. Este efluente tratado fue ajustado a pH 7.0 usando NaOH al 50 % grado industrial con un flujo de 11.2 mL min^{-1} . Después de precipitarse los sólidos suspendidos utilizando un tiempo de retención hidráulico de 60 minutos en el sedimentador de placas paralelas, se obtuvo el líquido clarificado para posteriormente pasarlo por el filtro de grava y arena a una carga hidráulica de $83 \text{ L m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ estando todo el sistema en estado estable; el efluente tratado tenía el valor de DQO de $2\ 112 \text{ mg L}^{-1}$. El efluente final fue reutilizado en la preparación del ES de NaOH entre 0.01 a 1 M que se utiliza en el TEC *on site*.

20 **Ejemplo 2. Tratamiento Electrocinético on site en Flujo de Suelo tipo Gleysol Contaminado con Hidrocarburos.**

La muestra de suelo contaminado se obtuvo de una estación de re-bombeo de petróleo crudo que se encuentra cerca de la comunidad de Nuevo Teapa, al sureste del estado de Veracruz ($17^\circ 59'$ latitud norte y $94^\circ 21'$ longitud oeste), de igual forma la muestra para el suelo limpio se tomó de la comunidad de Nuevo Teapa ubicada a 20 Km de la zona de re-bombeo. Para la caracterización de ambas muestras se secaron y se homogenizaron para su posterior trituración y tamizado para llevar a cabo la correspondiente caracterización, realizando la determinación de los parámetros fisicoquímicos de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000 como pH con la técnica AS-02-2000, conductividad eléctrica (CE) con la técnica AS-18-2000, M.O.

mediante el método de Walkley y Black de la técnica AS-07-2009, textura por el método de Bouyoucus de acuerdo a la técnica AS-09-2007, CIC con la técnica AS-12-2000, identificación de metales por ICP con la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2204, cuantificación de HC de acuerdo a la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 y NMX-AA-134-SCFI-2006, así como la identificación de los mismos por cromatografía de gases acoplado a un espectrómetro de masas por la NMX-AA-146-SCFI-2008 y NOM-138-SEMARNAT/SS-2003.

Una vez caracterizado el suelo limpio se verificó que era un suelo tipo Gelysol porque mostraba una clase textural franco – arenosa con un pH de 5.21 ± 0.47 , M.O. de 2.57 ± 0.71 , CIC de $10.21 \pm 0.91 \text{ Cmol Kg}^{-1}$ y una CE de 0.101, mientras que el suelo contaminado con HC mostró una textura franco - arcillosa con un pH de 7.21 ± 0.01 con $2.34 \pm 0.59 \%$ de M.O., CIC de $21.21 \pm 1.73 \text{ Cmol Kg}^{-1}$ y una CE $1 \times 10^{-5} \text{ dS m}^{-1}$ con $4\,000 \text{ mg Kg}^{-1}$, lo cual sobrepasa ligeramente el límite máximo para la fracción media y pesada de HC en un suelo agrícola y residencial que es de 1 200 y 3 000 mg Kg^{-1} respectivamente, uso que tiene la zona del derrame y proviene la muestra de suelo. Dentro de los HC encontrados en el suelo contaminado fueron el dodecano, fenantreno, fluoranteno y pireno.

Una vez caracterizado el suelo contaminado edafológicamente, se efectuaron las pruebas de TEC, para lo cual se empleó un reactor electroquímico tubular horizontal de acrílico contando con dos compartimentos, los cuales funcionan como reservorios para los electrodos (anódico y catódico) y paso de flujo tanto de entrada como salida. Estos compartimentos se encontraban sellados por empaques de neopreno para evitar fugas, y en la parte central del reactor se colocó el suelo contaminado para los distintos experimentos. Con esta configuración de celda se usó malla de Ti para el cátodo y electrodo de Ti de superficie modificada con óxidos de metales de transición tales como Ir y Ta como ánodo, teniendo como ES NaOH 0.1 M en un tiempo de 3.5 horas aplicando 17 V y 2 mA, teniendo un 81.85 % de remoción de HC con una textura franco – arcillosa, un pH 9.02 ± 0.058 , M.O. $2.49 \pm 0.33 \%$, CE $0.56 \pm 0.33 \text{ dS m}^{-1}$, y CIC $24.53 \pm 0.92 \text{ Cmol Kg}^{-1}$, es decir, sin cambio de propiedades edafológicas de suelo.

Una vez efectuado el TEC *on site* con el reactor electroquímico tubular de acrílico, el tratamiento electroquímico mostró una toxicidad moderada Deltatox (40 %). Además del análisis anterior se realizó una prueba adicional de toxicidad, la cual consistió en sembrar una semilla de frijol (*Phaseolus vulgaris*) en 5 g de muestra de suelo tratado durante un período de 21 días, a las cuales se les agregaba diariamente 2 mL de agua para su crecimiento y estuvieron expuestas al sol, con lo cual se logró un máximo crecimiento de raíz, tallo y hoja en el día 14, en comparación con un suelo tratado biológicamente con cultivo sólido que no se logró el crecimiento de la semilla, y lavado de suelo con surfactante Triton 114. Por lo que se observó que el TEC mejoró las propiedades edafológicas del suelo debido a que los fenómenos electrocinéticos ayudaron a disponer los micronutrientes que requirió la semilla de frijol de especie *Phaseolus vulgaris* para su adecuado crecimiento y desarrollo, en comparación el lavado de suelo y el cultivo sólido, indicando también la ausencia de un suelo estéril debido al tratamiento en menor tiempo (3.5 h) y mayor eficiencia (81.9 %) con toxicidad moderada (40 %), que el lavado (5 h, 11.9 % y 86 %) y biológico (360 h, 44.4 % y 31 %).

Después del TEC del suelo contaminado con HC de la estación de re-bombeo de petróleo crudo que se encuentra cerca de la comunidad de Nuevo Teapa, en el reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos se acopló el sistema del reactor del proceso de oxidación Fenton para el tratamiento del líquido extraído, el líquido del ES NaOH con los HC removidos tenía una DQO de 276 mg L⁻¹, pH de 12.22 y conductividad eléctrica de 5.642 mS cm⁻¹. De esta manera, el ES con los HC se le aplicó en continuo el tratamiento de oxidación avanzada con el equipo del reactor del proceso de oxidación Fenton, el cual estaba acoplado el TEC que mostró una eficiencia de remoción de HC del suelo contaminado de 53.26 %. Es así como el bombeo de la solución producida del ES NaOH con HC fue con un flujo de 0.7 L min⁻¹, la alimentación de las sustancias químicas para producir los °OH para la oxidación de la materia orgánica en el reactor del proceso de oxidación Fenton correspondieron a una relación en peso de 1.52 H₂O₂ / Fe⁺² equivalente a un flujo de 0.414 g L⁻¹ de H₂O₂ y 1.36 g L⁻¹ de

$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $1.5 \text{ H}_2\text{O}_2$ / DQO removida del ES NaOH con HC y un tiempo de reacción de 60 minutos, con una agitación en el reactor del proceso de oxidación avanzada Fenton de 120 rpm, el pH de ajuste de la reacción Fenton fue de 3.0 usando H_2SO_4 grado industrial al 98 % con un flujo de 1.54 mL min^{-1} , la adición de Fe^{+2} fue como $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ grado industrial al 98 %; este efluente tratado fue ajustado usando NaOH al 50% grado industrial a un flujo de 11.2 mL min^{-1} para alcanzar un pH de 7.38, después de precipitarse los sólidos suspendidos utilizando un tiempo de retención hidráulico de 60 minutos en el sedimentador de placas paralelas y obtener el líquido clarificado para posteriormente pasarlo por el filtro de grava y arena a una carga hidráulica de $83 \text{ L m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ estando todo el sistema en estado estable; el efluente tratado tenía el valor de DQO de 129 mg L^{-1} y conductividad eléctrica de 4.584 mS cm^{-1} . Este efluente final se reutilizó en la preparación del ES NaOH entre 0.01 a 1 M que se utiliza en el TEC *on site*, así como se exceso se empleó para irrigar el suelo circundante ya que cumple con los valores de los límites máximos permisibles de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996, en donde la DQO no se menciona en la lista de los parámetros, sin embargo el Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) menciona que lo permisible en DQO es de 40 a 200 mg L^{-1} .

20

LISTA DE COMPONENTES Y SUS REFERENCIAS

- (1) Media celda superior del reactor electroquímico tubular.
- (2) Puerta de alimentación del reactor electroquímico tubular.
- (3) Cable eléctrico de conexión del cátodo al polo negativo de la fuente de poder.
- 25 (4) Cable eléctrico de conexión del ánodo al polo positivo de la fuente de poder.
- (5) Puerta de alimentación del reactor electroquímico tubular.
- (6) Válvula de salida.
- (7) Borne anódico de acero.
- (8) Puerta de alimentación del reactor electroquímico tubular.
- 30 (9) Borne catódico de acero.

- (10) Fuente de poder con un rectificador de corriente.
- (11) Reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico on site de electrodos.
- (12) Bomba peristáltica del ES.
- (13) Bomba peristáltica para succionar el ES con los compuestos orgánicos.
- 5 (14) Tanque de la captación del ES + HC.
- (15) Tanque contenedor de la solución de NaOH.
- (16) Bomba peristáltica de succión del ES con los HC.
- (17) Separador de placas coalescentes.
- (18) Reactor del proceso de oxidación Fenton.
- 10 (19) Bomba dosificadora para alimentar H₂O₂.
- (20) Bomba dosificadora para alimentar FeSO₄•7H₂O grado industrial.
- (21) Bomba dosificadora para suministrar NaOH grado industrial.
- (22) Tanque de almacenamiento del NaOH.
- (23) Tanque de almacenamiento del H₂O₂.
- 15 (24) Tanque de almacenamiento del FeSO₄•7H₂O grado industrial.
- (25) Tanque de almacenamiento del H₂SO₄.
- (26) Mezclador estático de NaOH.
- (27) Sedimentador de placas paralelas.
- (28) Tanque de almacenamiento del líquido clarificado.
- 20 (29) Filtro de grava y arena.
- (30) Agitador tipo RZR1 115 V, 60 Hz, 70 watts.
- (31) Tanque colector de grasas y natas.
- (32) Tanque de lodos.
- (33) Bomba centrífuga horizontal.
- 25 (34) Tablero eléctrico.
- (35) Barrera física de celulosa del ánodo.
- (36) Barrera física de celulosa del cátodo.
- (37) Ruedas del bastidor del reactor del proceso de oxidación Fenton.
- (38) Guía del compartimento anódico.
- 30 (39) Tubo sumergido para mezclar FeSO₄•7H₂O y H₂O₂.

- (40) Baffles del reactor del proceso de oxidación Fenton.
- (41) Colector cónico de natas y/o espumas.
- (42) Boquilla del colector de natas y/o espumas.
- (43) Boquilla de descarga del efluente.
- 5 (44) Cartabones.
- (45) Cincho.
- (46) Boquilla de descarga de lodos.
- (47) Fondo cónico.
- (48) Boquilla del reactor del proceso de oxidación Fenton.
- 10 (49) Orificio del separador de placas coalescentes.
- (50) Fondo del separador coalescente.
- (51) Parte superior del baffle de descenso.
- (52) Orificio de descarga de grasas y aceites del separador de placas coalescentes.
- 15 (53) Orificio del efluente del separador de placas coalescentes.
- (54) Baffle de descenso.
- (55) Baffle de ascenso.
- (56) Borde superior del separador de placas coalescentes.
- (57) Pared lateral del separador de placas coalescentes.
- 20 (58) Parte inferior del separador de placas coalescentes.
- (59) Fondo cónico del separador de placas coalescentes.
- (60) Empaque coalescente.
- (61) Bomba dosificadora de alimentación de H₂SO₄ grado industrial.
- (62) Mezclador estático del H₂SO₄.
- 25 (63) Cople de propela y flecha del reactor del proceso de oxidación Fenton.
- (64) Soporte del agitador.
- (65) Base del agitador.
- (66) Flecha del agitador.
- (67) Propela del agitador.
- 30 (68) Conducto de descarga del reactor del proceso de oxidación Fenton.
- (69) Sección de placas paralelas.

- (70) Canal de alimentación del sedimentador de placas.
- (71) Boquilla del sedimentador de placas.
- (72) Compartimento de soporte de placas paralelas.
- (73) Cartabones.
- 5 (74) Fondo cónico del sedimentador de placas.
- (75) Boquilla de descarga de los lodos del sedimentador de placas.
- (76) Boquilla del sedimentador de placas.
- (77) Orificios del vertedor del sedimentador de placas.
- (78) Guía del compartimento catódico.
- 10 (79) Orificio anódico.
- (80) Manguera del tanque de almacenamiento del ES con los HC.
- (81) Manguera del ES.
- (82) Orificio catódico.
- (83) Orificios de la media celda inferior.
- 15 (84) Manguera para conducir el ES residual con los compuestos orgánicos del TEC.
- (85) Bastidor móvil.
- (86) Manguera para la salida del líquido extraído del filtro de grava y arena.
- (87) Grava gruesa.
- 20 (88) Grava mediana.
- (89) Grava fina.
- (90) Arena fina.
- (91) Carbón activado.
- (92) Orificios de la media celda superior.
- 25 (93) Tubería de entrada.
- (94) Tubería de salida.
- (95) Cuerda del borne anódico.
- (96) Sello del borne anódico.
- (97) Cuerda del borne catódico.
- 30 (98) Sello del borne catódico.
- (99) Media luna anódica de la media celda superior.

- (100) Media luna catódica de la media celda superior.
- (101) Media luna anódica de la media celda inferior.
- (102) Media luna catódica de la media celda inferior.
- (103) Base de acero del reactor electroquímico tubular.
- 5 (104) Compartimento anódico.
- (105) Compartimento catódico.
- (106) Suelo contaminado con HC a tratar.
- (107) Media celda inferior del reactor electroquímico tubular.
- (108) Válvula de alimentación.
- 10 (109) Ánodo de Ti de superficie modificada con óxidos de metales de transición tales como Ir y Ta
- (110) Cátodo de Ti.
- (111) Neopreno de las puertas de alimentación.
- (112) Tornillos de las puertas de alimentación.
- 15 (113) Neopreno de las medias celdas.
- (114) Tornillos para unir las medias celdas.
- (115) Tuercas para unir las medias celdas.
- (116) Guía de plástico flexible anódica.
- (117) Guía de plástico flexible catódica.
- 20 (118) Zona de separación entre los electrodos.

REIVINDICACIONES

La descripción de la invención se considera como una novedad y por lo tanto se reclaman como propiedad lo contenido en las siguientes cláusulas:

1. Un reactor electroquímico tubular caracterizado porque comprende de un reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos que puede ser de materiales como son el acrílico, PVC y polietileno de alta densidad, conformado por una primera media celda inferior del reactor electroquímico tubular, donde se instala un ánodo de Ti de superficie modificada con óxidos de metales de transición tales como el Ir y Ta que es colocado en su compartimento anódico que está en el extremo opuesto de un cátodo de Ti que también es colocado en su correspondiente compartimento catódico, una segunda media celda superior del reactor electroquímico tubular que cuenta con una protuberancia con una pluralidad de orificios de la media celda superior que se instala sobre la primera media celda inferior del reactor electroquímico tubular que también cuenta con una protuberancia con una pluralidad de orificios de la media celda superior haciéndolos coincidir y sellándose ambas con un empaque de neopreno de las medias celdas y fijándose con los tornillos para unir las medias celdas y tuercas para unir las medias celdas, donde el ánodo de Ti de superficie modificada con óxidos de metales de transición tales como el Ir y Ta, tiene instalado un borne anódico de acero mediante una cuerda del borne anódico y se le inserta en la parte superior del borne anódico de acero un sello del borne anódico, el cátodo de Ti tiene instalado un borne catódico de acero mediante una cuerda del borne catódico y se le inserta en la parte superior del borne catódico de acero el sello del borne catódico para lograr un sello hermético del reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos y que se soporta en una base de acero donde se coloca el reactor electroquímico tubular, los electrodos están conectados a una fuente de poder mediante la conexión de un primer extremo de un cable eléctrico a la parte superior del borne anódico de acero para el ánodo de Ti de superficie modificada con óxidos de metales de transición tales como el Ir y Ta, y el segundo extremo de un cable

eléctrico al polo negativo de la fuente de poder y la conexión de un primer extremo del cable eléctrico a la parte superior del borne catódico de acero para el cátodo de Ti, y el segundo extremo del cable eléctrico al polo positivo de la fuente de poder, la cual es alimentada con un voltaje principal entre 50 y 200 volts, el reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos cuenta con dos pares de barreras físicas de celulosa instaladas en su interior que separa al suelo contaminado con HC a tratar y al ánodo de Ti de superficie modificada con óxidos de metales de transición tales como el Ir y Ta, y al cátodo de Ti para evitar que las perforaciones de los electrodos se obstruyan y no dejen pasar el flujo, el suelo contaminado con HC a tratar se agrega manualmente mediante la abertura de tres puertas de alimentación que tiene el reactor electroquímico tubular, y al quedar totalmente lleno del suelo contaminado con HC a tratar se le colocan nuevamente las tres puertas de alimentación del reactor electroquímico tubular sellándolas con el empaque de neopreno de las puertas de alimentación y fijándolas con los tornillos de las puertas de alimentación, el reactor electroquímico tubular cuenta también con una tubería de entrada que tiene instalada una válvula de alimentación donde está conectada una manguera del ES donde se hace recircular el ES de NaOH a una concentración entre 0.01 y 0.1 M para HC a través del reactor electroquímico tubular y el suelo contaminado con HC mediante la utilización de una bomba peristáltica del ES, el ES es succionado de un tanque contenedor de la solución de NaOH y alimentado mediante la tubería de alimentación al interior del reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos mediante la abertura regulada de la válvula de alimentación y manteniendo cerrada la válvula de salida que se encuentra instalada en la tubería de salida en el otro extremo del reactor electroquímico tubular. Una vez llenado de solución de ES todo el volumen del reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico de electrodos se cierra la válvula de alimentación y se deja de operar la bomba peristáltica del ES. Posteriormente, el suelo contaminado con HC a tratar que se encuentra dentro del reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico de electrodos se deja humectar totalmente durante 18 h, el reactor electroquímico tubular

cuenta con la válvula de salida que está conectada a la tubería de salida y a la manguera del tanque de almacenamiento del ES con los compuestos orgánicos, terminado el tiempo de humectación se abre la válvula de salida y mediante la manguera del tanque de alimentación del ES, la cual, es utilizada por la bomba peristáltica para succionar el ES con los compuestos orgánicos que enseguida es encendida para succionar y recircular a un tanque de la captación del ES + HC. Al mismo tiempo se enciende nuevamente la bomba peristáltica del ES, y posteriormente se abre la válvula de alimentación para succionar del tanque contenedor de la solución de NaOH utilizando la manguera del ES y dar inicio en forma continua al tratamiento del TEC mediante el reactor electroquímico tubular descrito.

2. Un equipo para el TEC *on site* en flujo utilizado para el tratamiento de suelo contaminado con compuestos orgánicos como los HC que comprende un reactor electroquímico tubular de acuerdo a la reivindicación 1 y un reactor acoplado al proceso de oxidación fenton donde el inicio del TEC utilizando el equipo se tiene completo conectando el ánodo de Ti de superficie modificada con óxidos de metales de transición tales como el Ir y Ta y el cátodo de Ti del reactor electroquímico tubular conectado a una fuente de poder con un rectificador, y encendiéndola de acuerdo a las condiciones definidas por el TEC descrito en la presente invención. En el equipo el acoplamiento del TEC mediante el reactor electroquímico tubular que contiene el reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos y el reactor del proceso de oxidación Fenton inicia con la remoción de los contaminantes en solución durante la aplicación del TEC al suelo contaminado con compuestos orgánicos como los HC empleando la bomba peristáltica para succionar el ES con los compuestos orgánicos utilizando la manguera del tanque de almacenamiento del ES con los HC conectada a la válvula de salida, la cual viene del reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos acumulando la solución en el tanque de la captación del ES con los HC, el cual se alimenta posteriormente mediante la bomba peristáltica de succión del ES con los HC utilizando la

manguera para conducir el electrolito soporte residual con los compuestos orgánicos del TEC al reactor del proceso de oxidación Fenton. El ES con los HC de fracción intermedia y pesada se envía al separador de placas coalescente previamente acidificado a un valor de pH entre 1.0 y 5.0 con H_2SO_4 al 98 % que se suministra del tanque de H_2SO_4 empleando para su alimentación la bomba dosificadora de alimentación de H_2SO_4 grado industrial, esto se logra empleando un mezclador estático de H_2SO_4 , en el separador de placas coalescentes se separan las grasas y natas de las aguas residuales que se vierten en el tanque colector de grasas y natas. Posteriormente, el agua contaminada con los HC llega por gravedad al reactor del proceso de oxidación Fenton, y del tanque de almacenamiento del $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ se adiciona este reactivo en una concentración de 1 000 a 18 000 mg L^{-1} utilizando la bomba dosificadora para alimentar $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ grado industrial. Al mismo tiempo, en el reactor del proceso de oxidación Fenton se agrega del tanque de almacenamiento del H_2O_2 con una concentración de 400 a 45 000 mg L^{-1} succionado por la bomba dosificadora para alimentar H_2O_2 para lograr la generación de los radicales hidroxilos, la reacción en el reactor del proceso de oxidación Fenton se lleva a cabo en el tiempo máximo de 5 horas establecido para la degradación de los compuestos orgánicos y en agitación continua mediante el agitador tipo RZR1, 115V, 60 Hz, 70 Watts a 120 rpm, el cual está unido a un cople de propela y flecha del reactor del proceso de oxidación Fenton. El efluente del reactor del proceso de oxidación Fenton se neutraliza a un pH entre 6.0 y 7.0 mediante el empleo de NaOH de 0.01 a 1 M con un flujo de 1.33 mL min^{-1} que se succiona del tanque de almacenamiento de NaOH utilizando para su alimentación la bomba dosificadora para suministrar NaOH grado industrial y mediante el uso de un mezclador estático de NaOH, el efluente tratado sigue hacia el sedimentador de placas paralelas, en donde se sedimentan los sólidos suspendidos presentes en el efluente oxidado que posteriormente son vertidos al tanque de lodos, y finalmente se obtiene el líquido clarificado en el tanque de almacenamiento del líquido clarificado, mediante el empleo de la bomba centrifuga horizontal este efluente tratado se envía a través

del filtro de grava y arena, hasta obtener un efluente sin sólidos suspendidos, el cual utilizando la manguera para la salida del líquido extraído del filtro de grava y arena conectada a la salida del filtro de grava y arena se devuelve al tanque contenedor de la solución de NaOH para que mediante la bomba peristáltica del ES, y la manguera del ES se envíe nuevamente al reactor electroquímico tubular con un arreglo cilíndrico *on site* de electrodos para ser reusado en el tratamiento del TEC *on site* en flujo utilizado para el tratamiento de suelo contaminado con compuestos orgánicos como los HC, o bien se envía a una planta biológica para su posterior tratamiento, o se emplea para riego del suelo circundante.

10

3. Un proceso para el tratamiento electrocinético *on site* caracterizado porque utiliza el equipo de conformidad con la reivindicación 2, caracterizado porque el proceso comprende las siguientes etapas:

a) Tamizar el suelo con HC compuestos orgánicos a un tamaño de malla de 12.5 mm y eliminar cualquier material superior a este tamaño, así como partes metálicas y plásticas que se encuentren en el mismo y que pueden interferir en el TEC.

15

b) Homogeneizar el suelo y colocarlo en forma manual en el interior del reactor electroquímico tubular.

20

c) Utilizar un reactor electroquímico tubular con flujo hidráulico estando presente dos electrodos sólidos perforados de 0.5 a 1.0 m de diámetro y un espesor de 5 a 10 mm.

d) Instalar los electrodos, teniendo como ánodo de Ti de superficie modificada con óxidos de metales de transición tales como Ir y Ta, así como el cátodo al Ti para el tratamiento de suelo con HC.

25

e) Colocar el suelo contaminado a tratar dentro de un reactor electroquímico tubular en su compartimento anódico y entre la zona de un ánodo de Ti de

superficie modificada con óxidos de metales de transición tales como el Ir y Ta, así como un cátodo de Ti en el compartimento catódico para HC.

- 5
- f) Utilizar los electrodos (ánodo y cátodo) con perforaciones homogéneas de 5 a 20 mm de diámetro en toda su superficie para permitir el paso del flujo hidráulico.
- g) Colocar los electrodos con una separación de 1.0 a 1.5 metros de distancia (ánodo con respecto al cátodo).
- h) Colocar barreras físicas de celulosa que separan al suelo contaminado con HC del ánodo de Ti de superficie modificada con óxidos de metales de transición tales como el Ir y Ta y al cátodo de Ti.
- 10
- i) Conectar un borne de acero al ánodo de Ti de superficie modificada con óxidos de metales de transición tales como Ir y Ta, al polo positivo de una fuente de poder con un rectificador de corriente.
- j) Conectar un borne de acero al cátodo de Ti al polo negativo de una fuente de poder con un rectificador de corriente.
- 15
- k) Preparar una solución denominada ES empleando NaOH de 0.01 a 0.1 M en un tanque para humectar el suelo contaminado con HC.
- l) Humectar el suelo contaminado con compuestos orgánicos a tratar con el electrolito soporte en el volumen correspondiente donde se encuentra el compartimento anódico, el compartimento catódico y el volumen donde se encuentran separados el ánodo y el cátodo durante 18 horas con el NaOH 0.01 a 0.1 M.
- 20
- m) Aplicar una corriente en el reactor electroquímico tubular entre 5 y 15 A por al menos 8 horas, para generar un campo eléctrico entre 1 000 y 1 500 A cm⁻¹.
- 25
- n) Realizar el tratamiento de la solución generada que contiene los HC removidos por el TEC *on site* del suelo con el proceso de oxidación Fenton

generado *in situ* para degradar o transformar los HC y producir agua tratada y lodos.

o) Reciclar el agua tratada para producir nueva solución de electrolito NaOH utilizado en el proceso.

5 p) Recuperar los lodos a partir del proceso de oxidación Fenton que podrán ser nuevamente reutilizados como reactivo.

4. El Proceso para el TEC de suelo contaminado con HC de conformidad con la reivindicación 2 y 3, caracterizado porque el tiempo de humectación del suelo con el electrolito antes del TEC es de al menos 18 h.

10 5. El Proceso para el TEC de suelo contaminado con HC de conformidad con la reivindicación 2 y 3, caracterizado porque el electrolito de humectación es el NaOH.

15 6. El Proceso para el TEC de suelo contaminado con HC de conformidad con las reivindicaciones 2 a 5, caracterizado porque la concentración del NaOH es entre 0.01 y hasta 1 M.

7. El Proceso para el TEC de suelo contaminado con HC de conformidad con las reivindicaciones 2 a 6; caracterizado porque el ánodo y cátodo circulares van en un arreglo en dirección perpendicular al flujo hidráulico con una separación entre ellos de 1.0 y 1.2 m.

20 8. El Proceso para el TEC de suelo contaminado con HC de conformidad con las reivindicaciones 2 a 7, caracterizado porque los ánodos y el cátodo son sólidos de 0.5 a 1 m de diámetro.

25 9. El Proceso para el TEC de suelo contaminado con HC de conformidad con las reivindicaciones 2 a 8, caracterizado porque el ánodo es de Ti de superficie modificada con óxidos de metales de transición tales como el Ir y Ta.

10. El Proceso para el TEC de suelo contaminado con HC de conformidad con las reivindicaciones 2 a 9, caracterizado porque el cátodo sólido es de Ti.
11. El Proceso para el TEC de suelo contaminado con HC de conformidad con las reivindicaciones 2 a 10 caracterizado porque el ánodo y cátodo tienen una pluralidad de perforaciones entre 5 a 10 mm.
12. El Proceso para el TEC de suelo contaminado con HC de conformidad con las reivindicaciones 2 a 11, caracterizado porque en la fuente de poder con un rectificador de corriente, en donde la corriente aplicada al tratamiento es entre 1 a 10 Amperes con un campo eléctrico generado entre 1 000 y 1 500 A cm⁻¹.
13. El Proceso para el TEC de suelo contaminado con HC de conformidad con las reivindicaciones 2 a 12, caracterizado porque el tiempo del proceso de TEC en que se aplica la corriente es de al menos 8 h.
14. El Proceso para el TEC de suelo contaminado con HC de conformidad con las reivindicaciones 2 a 13, porque el TEC se encuentra acoplado por medio de una bomba peristáltica de succión a un reactor del proceso de oxidación Fenton para el tratamiento de degradación o transformación de las aguas con contaminantes orgánico extraído.
15. El Proceso para el TEC de suelo contaminado con HC de conformidad con las reivindicaciones 2 a 14, con un proceso de oxidación Fenton acoplado al TEC de suelos, el cual está conformado por: (a) bomba peristáltica de succión, (b) separador de placas coalescente, (c) mezclador estático de H₂SO₄ para ajuste de pH en un rango de 1.0 a 5.0 mediante H₂SO₄, (d) bomba dosificadora de alimentación de H₂SO₄ grado industrial, (e) tanque de almacenamiento de H₂SO₄, (f) reactor del proceso de oxidación Fenton circular con un tiempo de reacción entre 1 y 5 h con agitación tipo RZR1 115 V, 60 Hz, 70 watts a una velocidad de 120 rpm, (g) bomba dosificadora para alimentar Fe₂SO₄•H₂O grado industrial para agregado de catalizador de Fe⁺² en forma líquida, (h) tanque de almacenamiento del FeSO₄7•H₂O grado industrial, (i) bomba dosificadora para

- alimentar H_2O_2 en forma líquida, (j) tanque de almacenamiento del H_2O_2 , (k) mezclador estático de NaOH para neutralización de la solución mediante NaOH, (l) tanque de almacenamiento del NaOH recuperado, (m) bomba dosificadora para suministrar NaOH grado industrial, (n) sedimentador de placas paralelas, (o) filtro de grava y arena, (p) tanque colector de natas y grasas, (q) tanque de lodos, (r) tanque de almacenamiento del líquido clarificado y (s) bomba centrifuga horizontal.
- 5
16. El Proceso para el TEC de suelo contaminado con HC de conformidad con las reivindicaciones 2 a 15, donde las condiciones del proceso de oxidación Fenton para alcanzar una eficiencia de remoción entre 60 y 90% de DQO y de toxicidad Deltatox para el tratamiento de los líquidos extraídos del proceso de TEC de suelo con HC, son de acuerdo a las siguientes relaciones de productos químicos industriales empleados en la reacción química del proceso de oxidación Fenton: entre 0.1 y 1 Kg de Fe^{+2} como catalizador / Kg de DQO removida, entre 0.1 y 1 Kg H_2O_2 al 30 % / Kg de DQO removida y entre 1 y 21 Kg H_2O_2 / Kg Fe^{+2} de catalizador a una temperatura y presión ambiente.
- 10
- 15

RESUMEN DE LA INVENCION

La presente invención consiste en efectuar un tratamiento electrocinético (TEC) *on site* en flujo de suelo contaminado con hidrocarburos (HC) y su posterior degradación o transformación química o electroquímica con el reactivo de Fenton en solución para líquidos extraídos con compuestos orgánicos. Las pruebas efectuadas a nivel piloto comprueban remociones mayores del 80% en al menos 8 horas para un volumen de suelo contaminado de al menos un metro cúbico de suelo base seca, así como evitando la alteración fisico-química del suelo y la reutilización de los electrodos modificados con óxidos superficiales por la resistencia mecánica que muestran.

Los resultados de las pruebas experimentales al acoplar el reactor del proceso de oxidación Fenton para el tratamiento de los líquidos extraídos resultantes del proceso del TEC con HC comprueban remociones máximas entre 50 y 90% para la Demanda Química de Oxígeno (DQO) empleando un tiempo de reacción del proceso de oxidación Fenton entre 1 y 5 horas, proporcionando un efluente que puede ser reciclado para la preparación de electrolito en la electrorremediación, o bien disponerla como agua residual tratada a una planta biológica, o bien empleando el agua para regar el suelo circundante. Los lodos obtenidos después de este tratamiento también pueden ser reutilizados como catalizador Fe^{+2} en el reactor del proceso de oxidación Fenton.

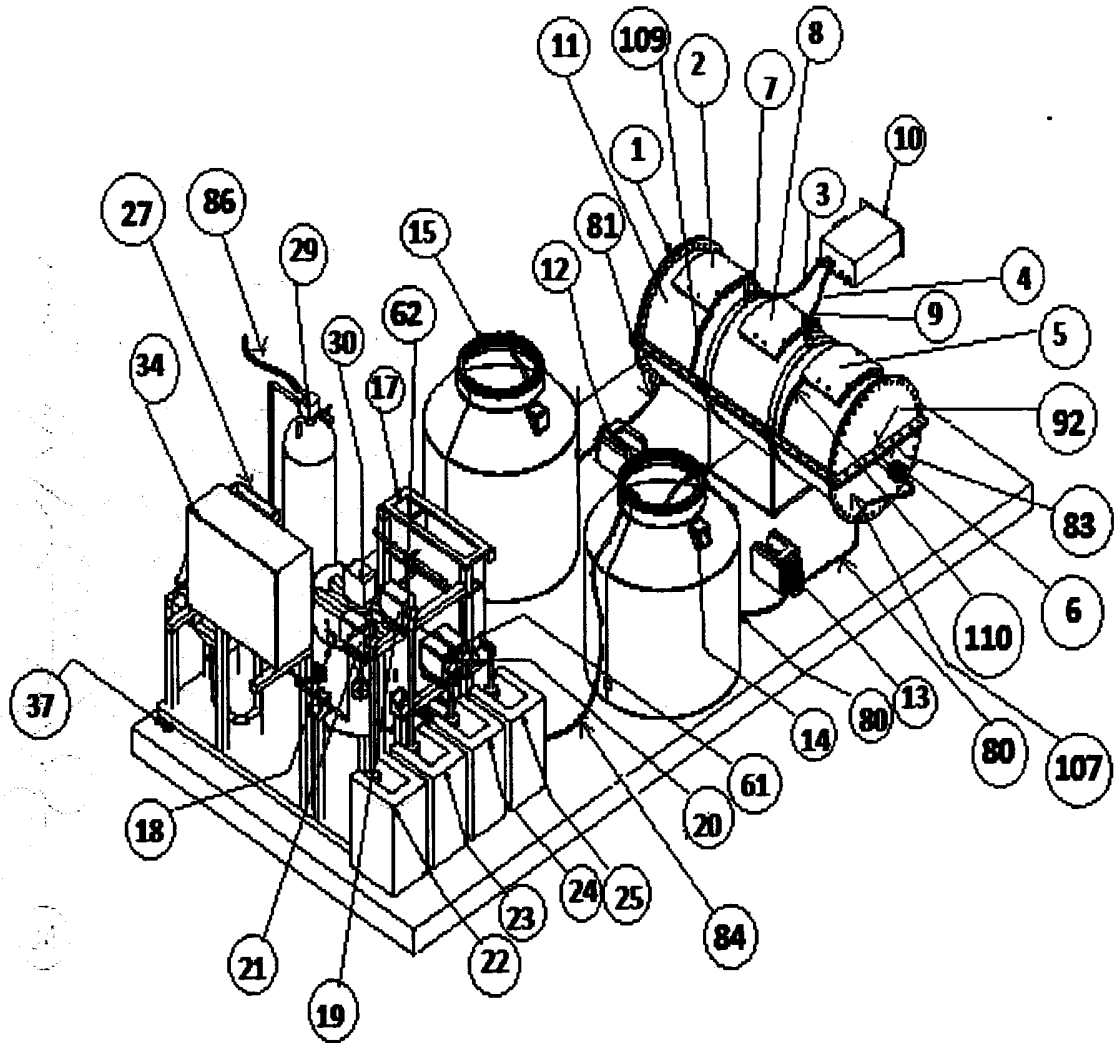


Figura 1

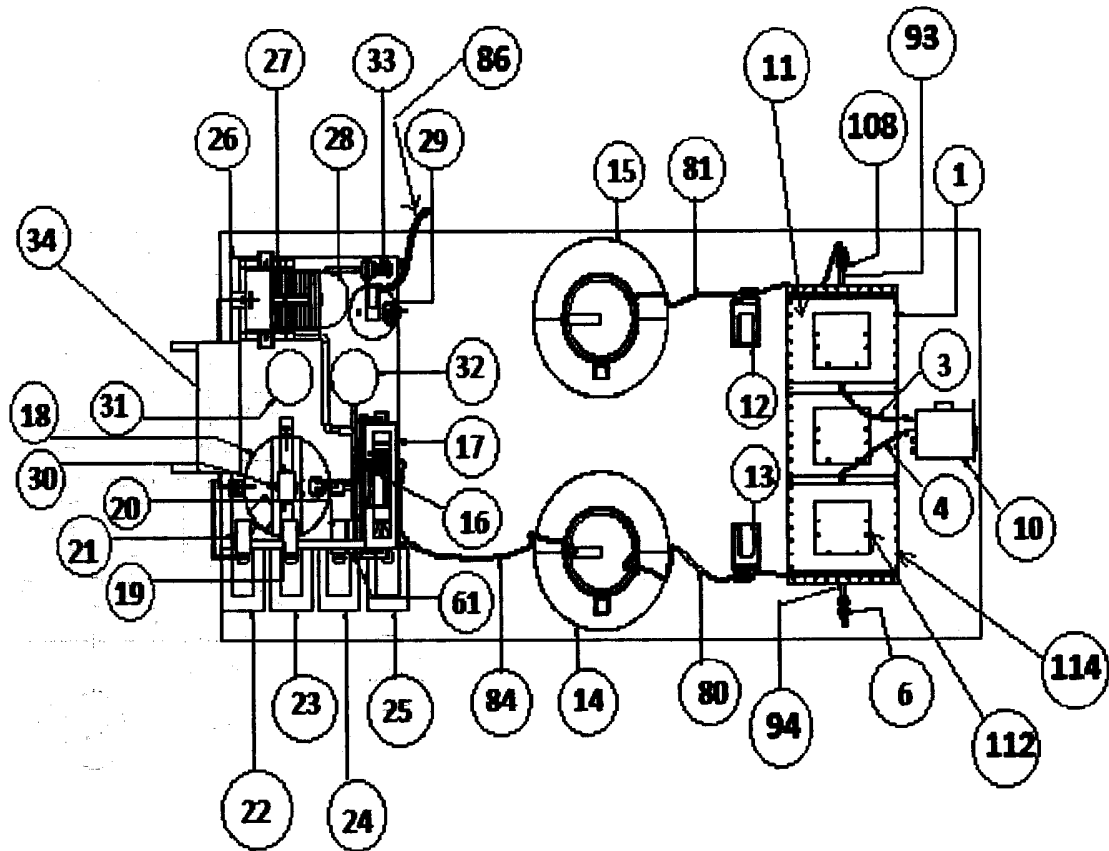


Figura 1a

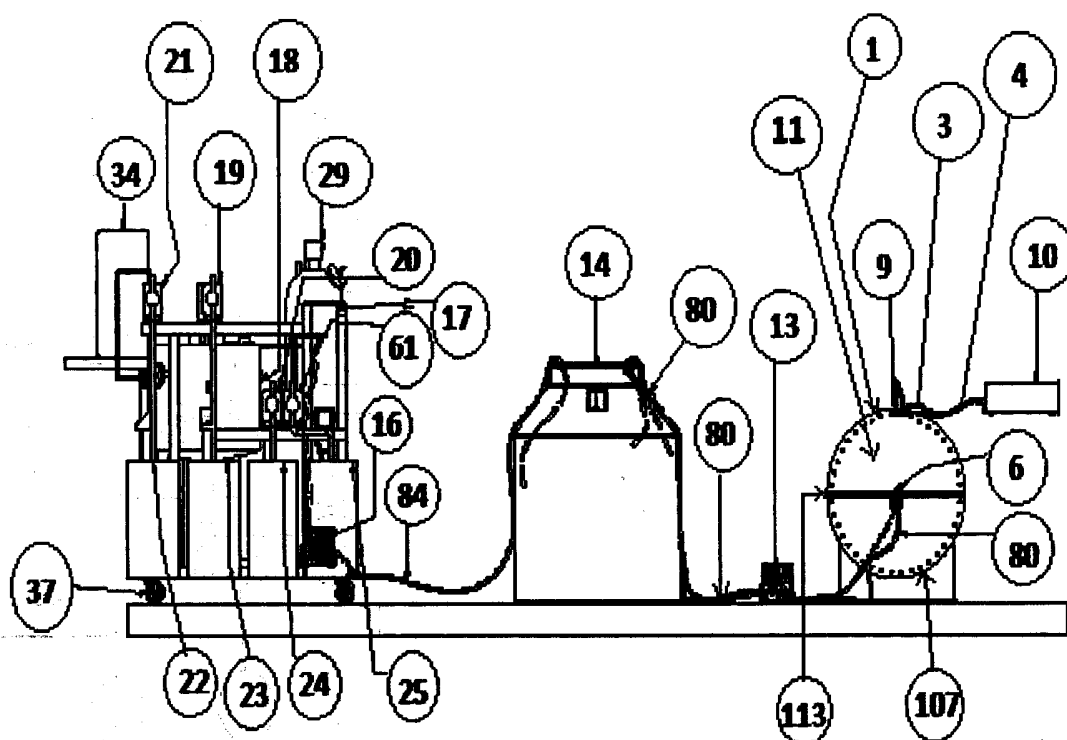


Figura 1b

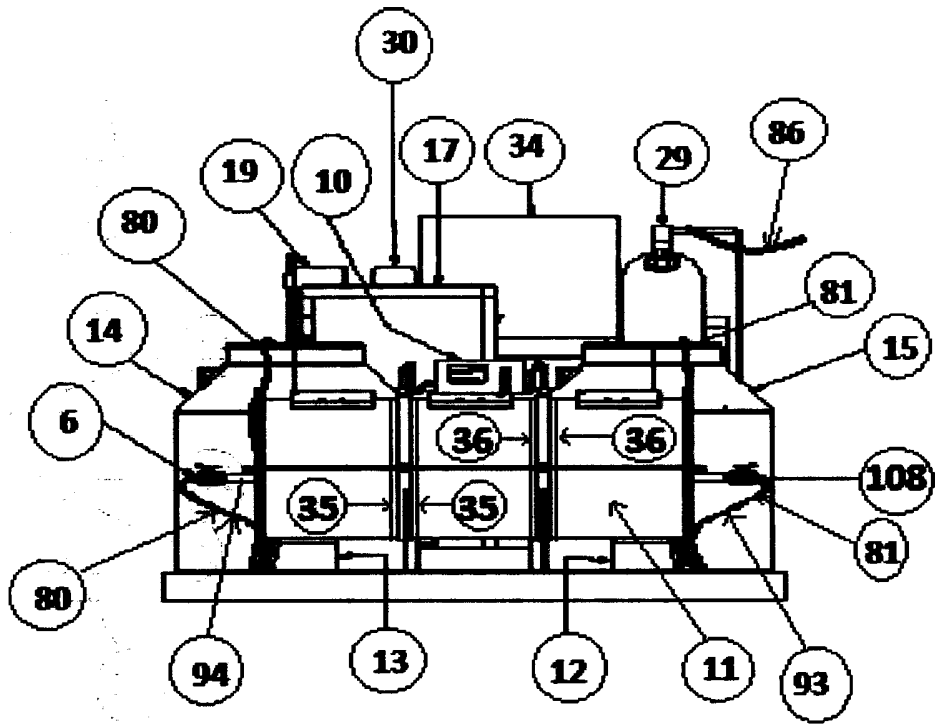


Figura 1c

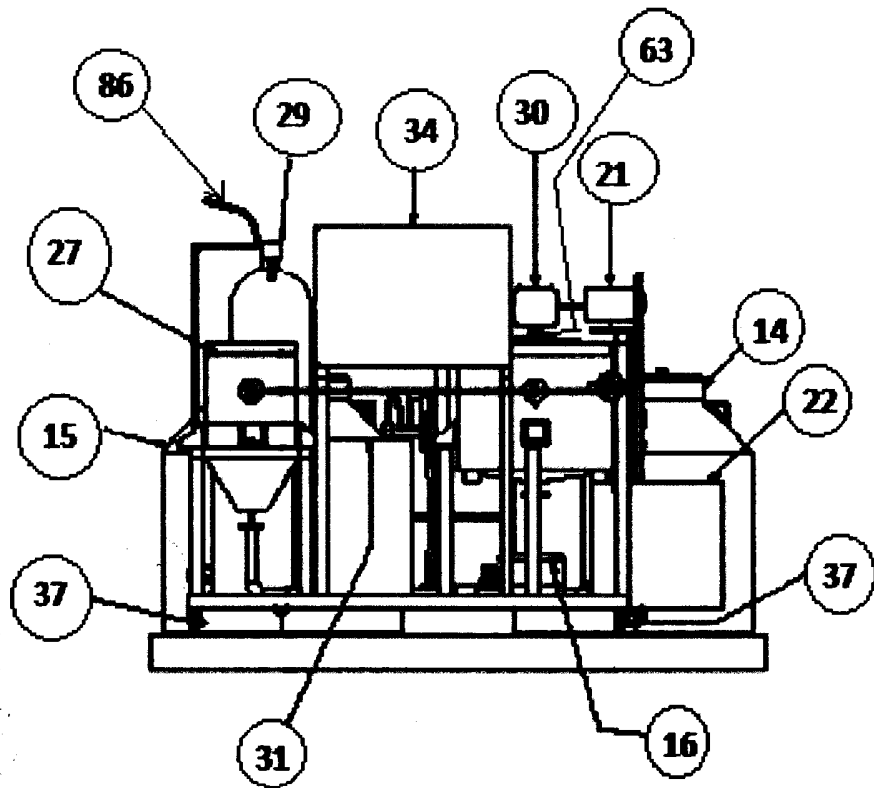


Figura 1d

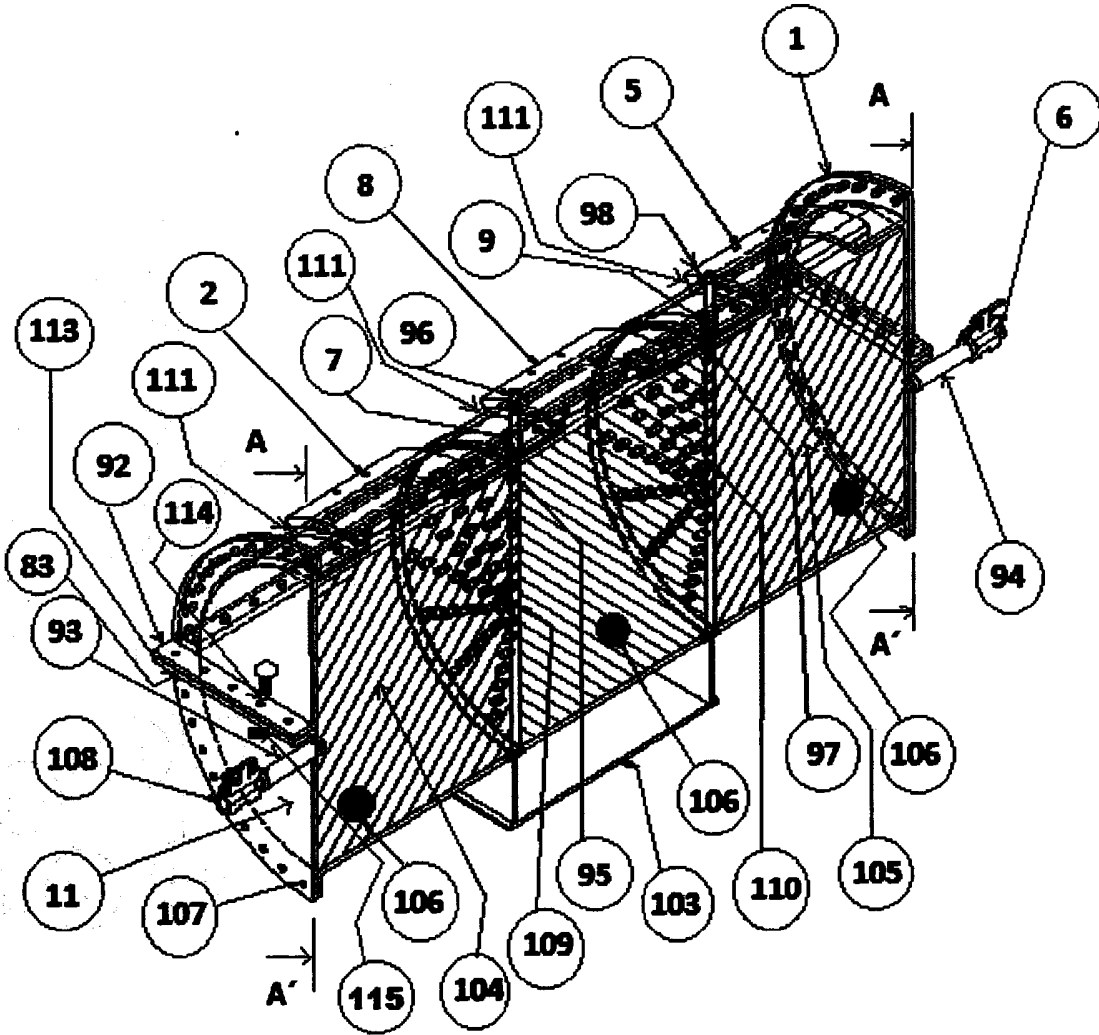


Figura 1e

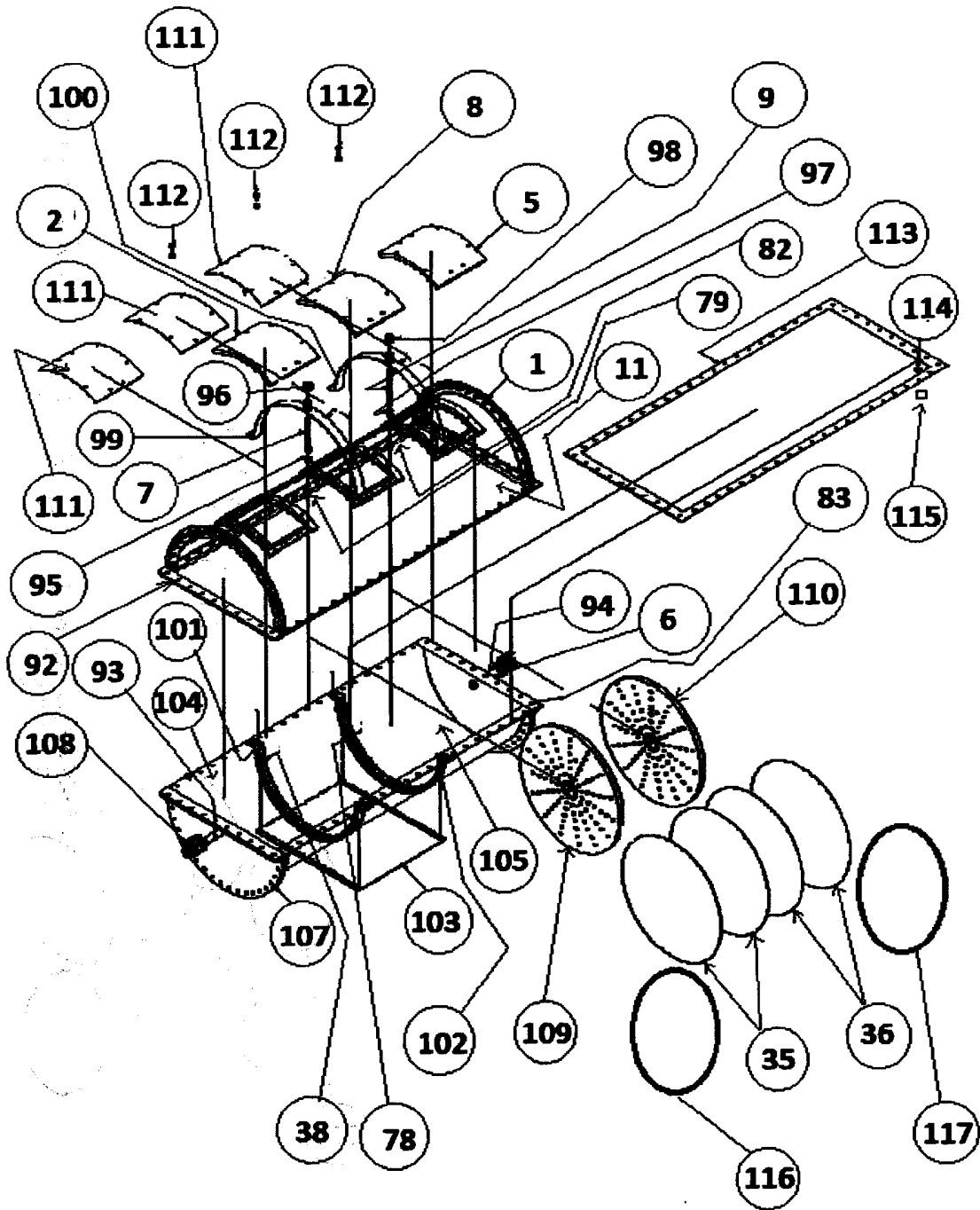


Figura 2

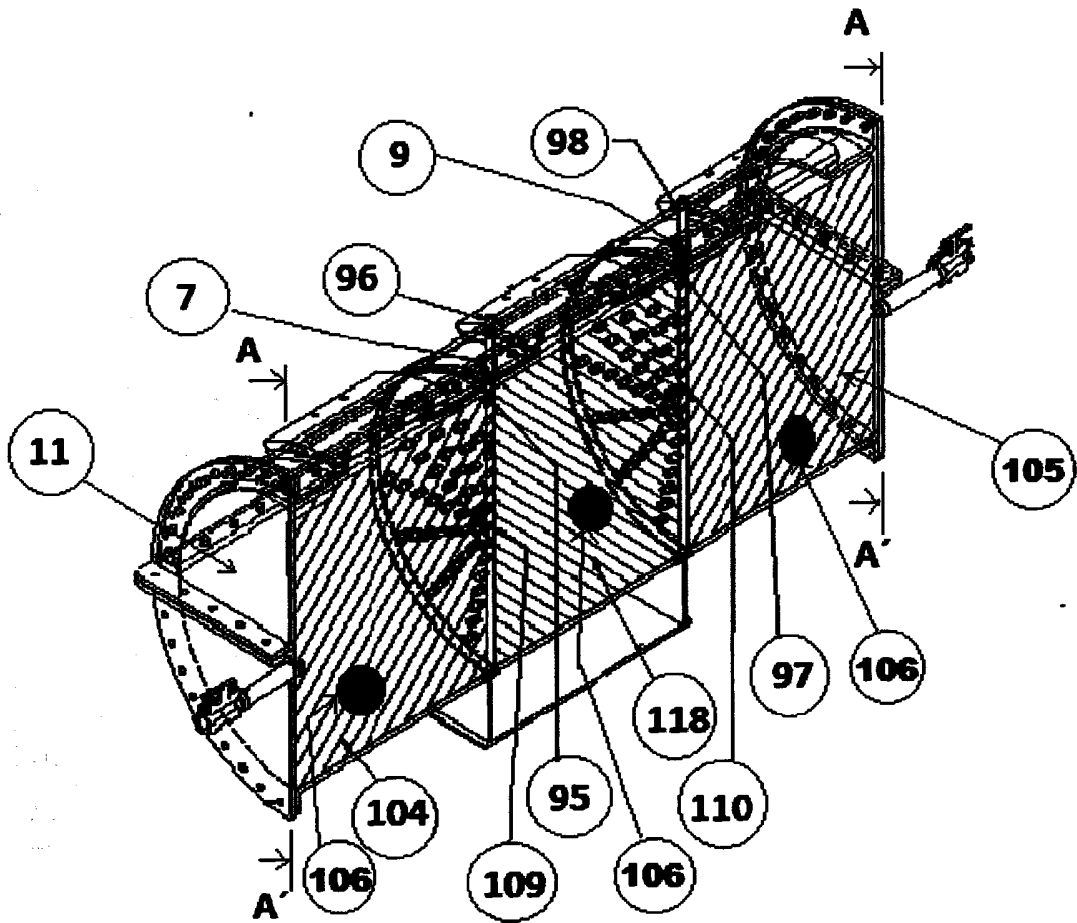


Figura 2a

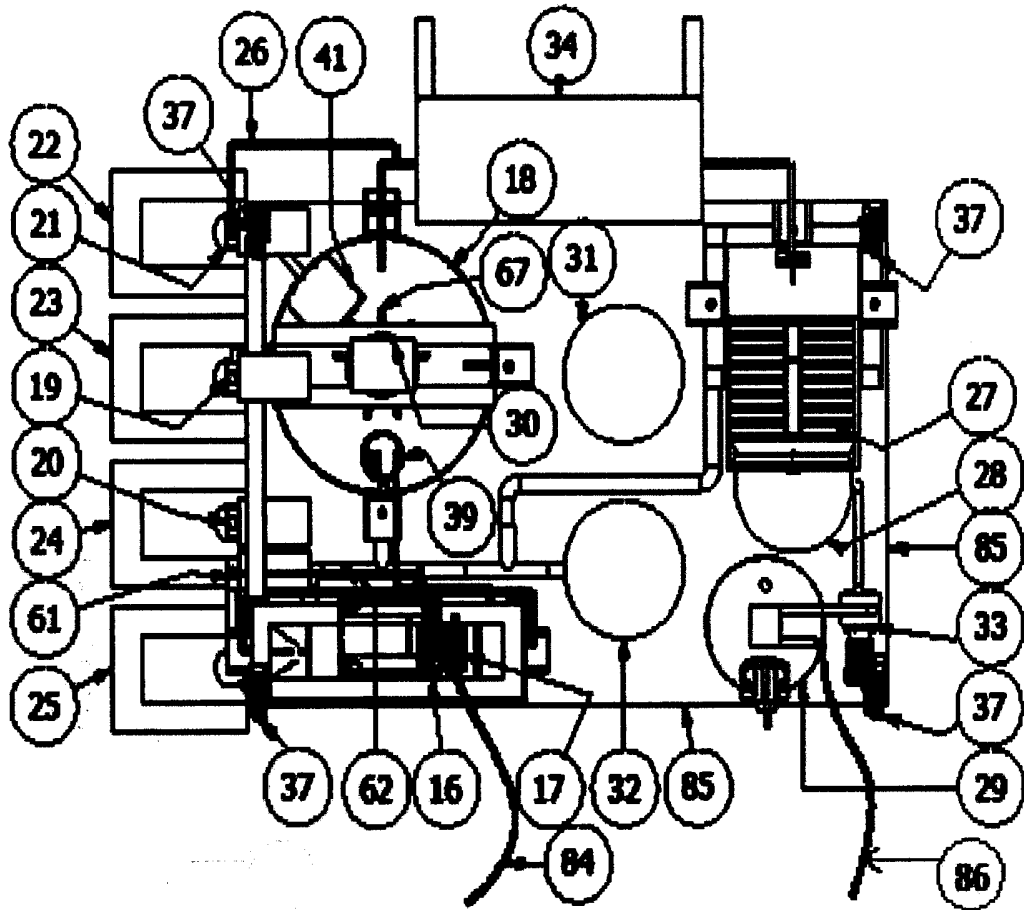


Figura 3

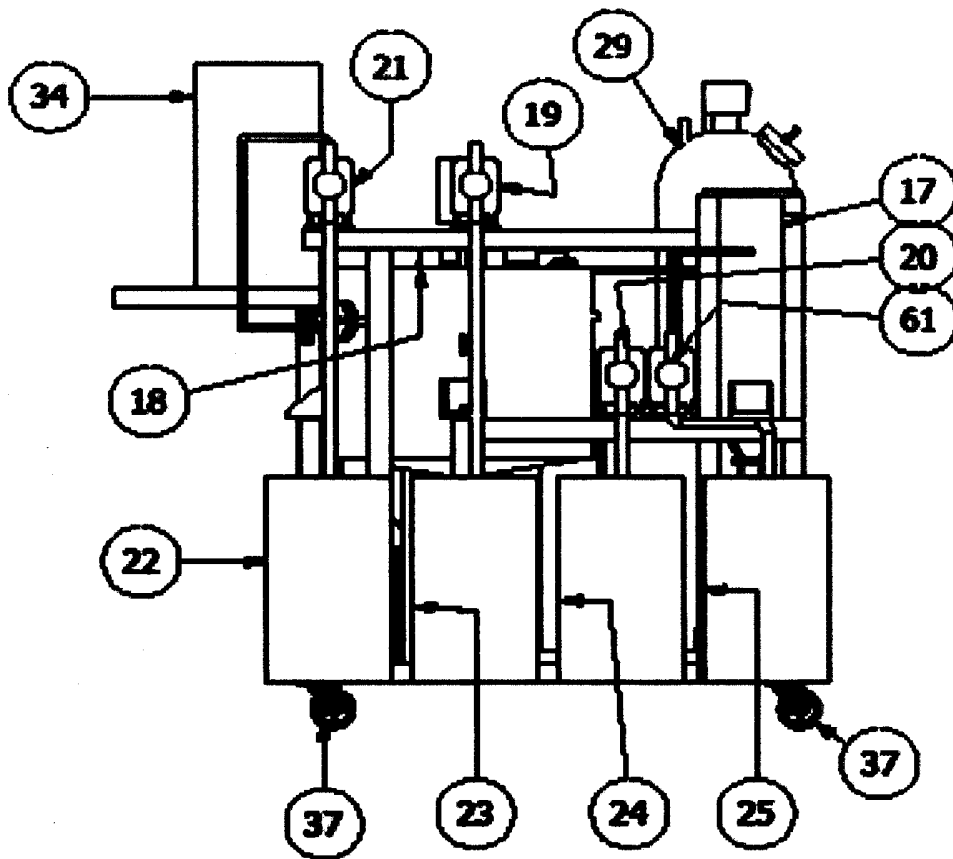


Figura 3a

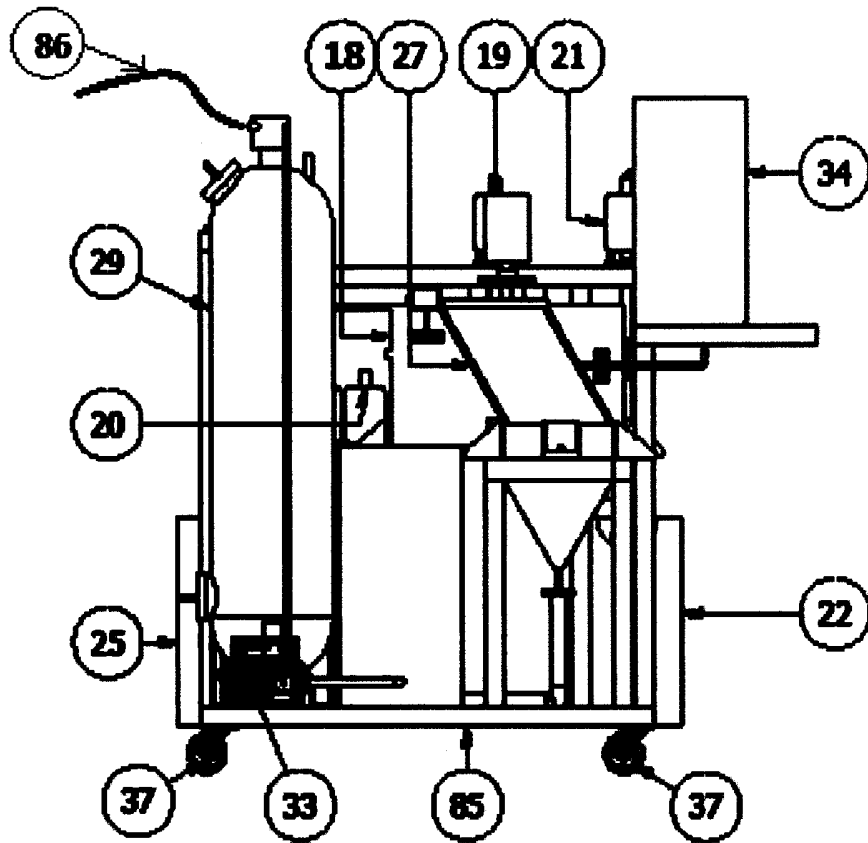


Figura 3b

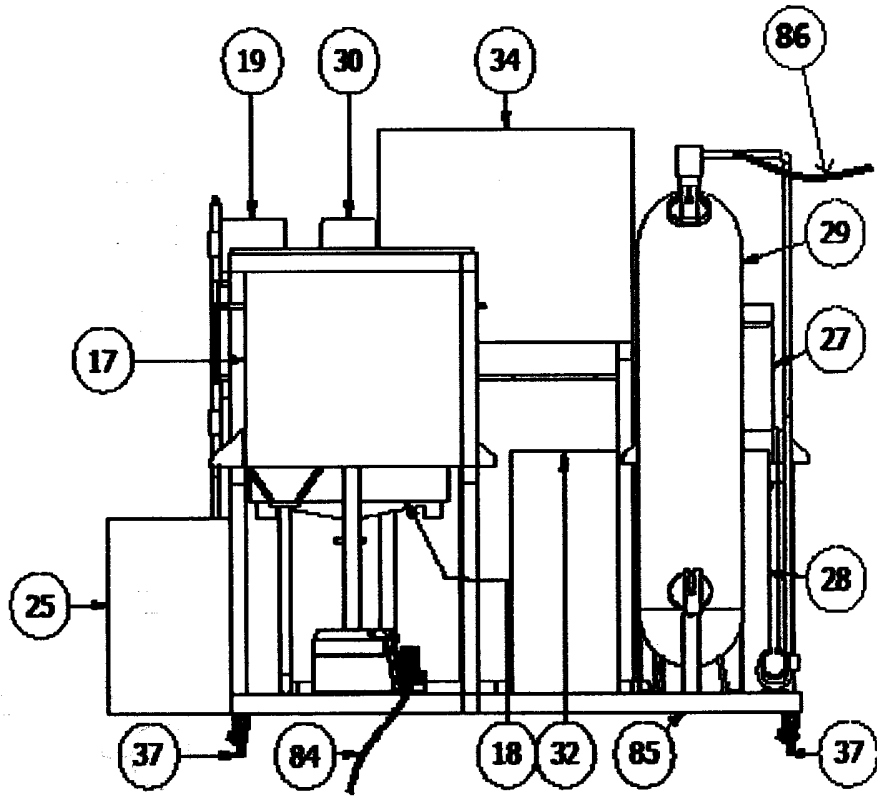


Figura 3c

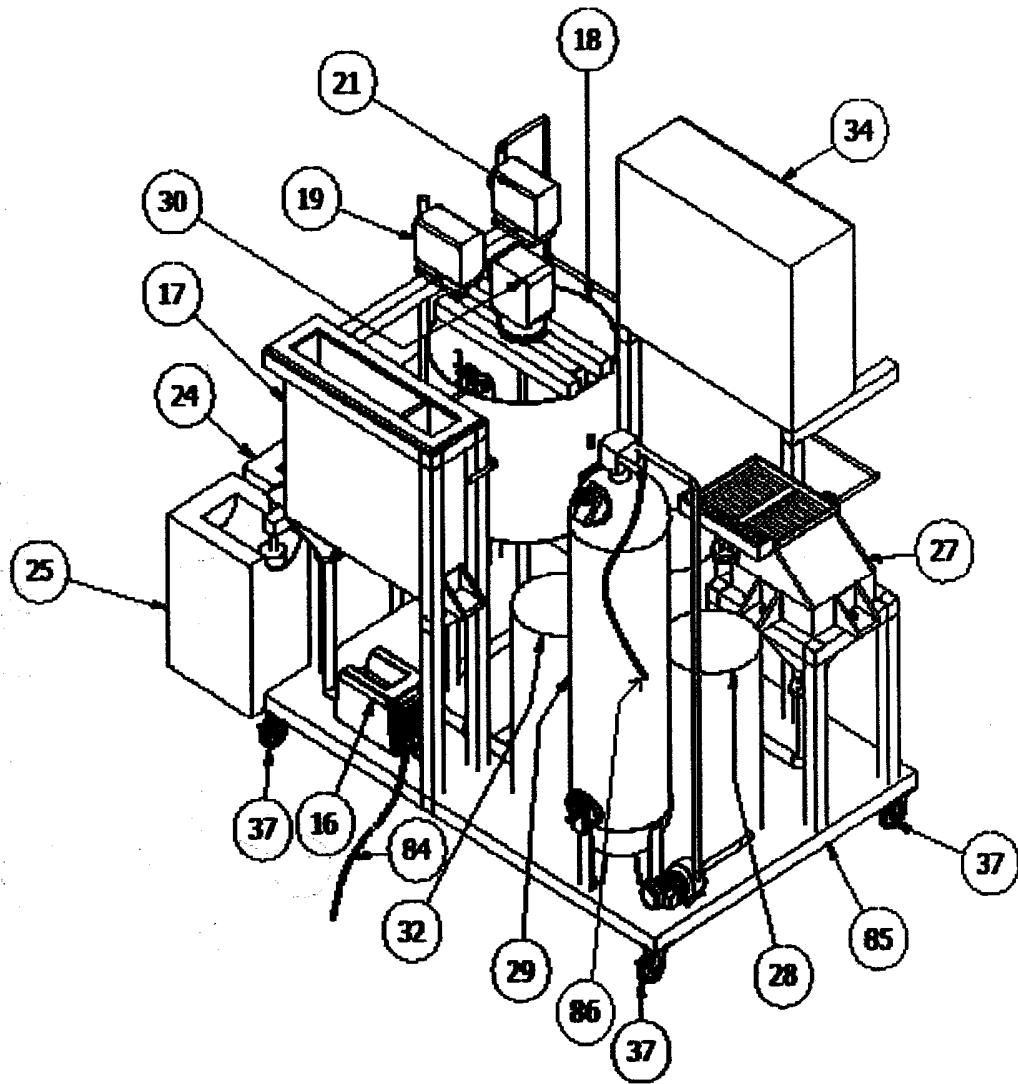


Figura 3d

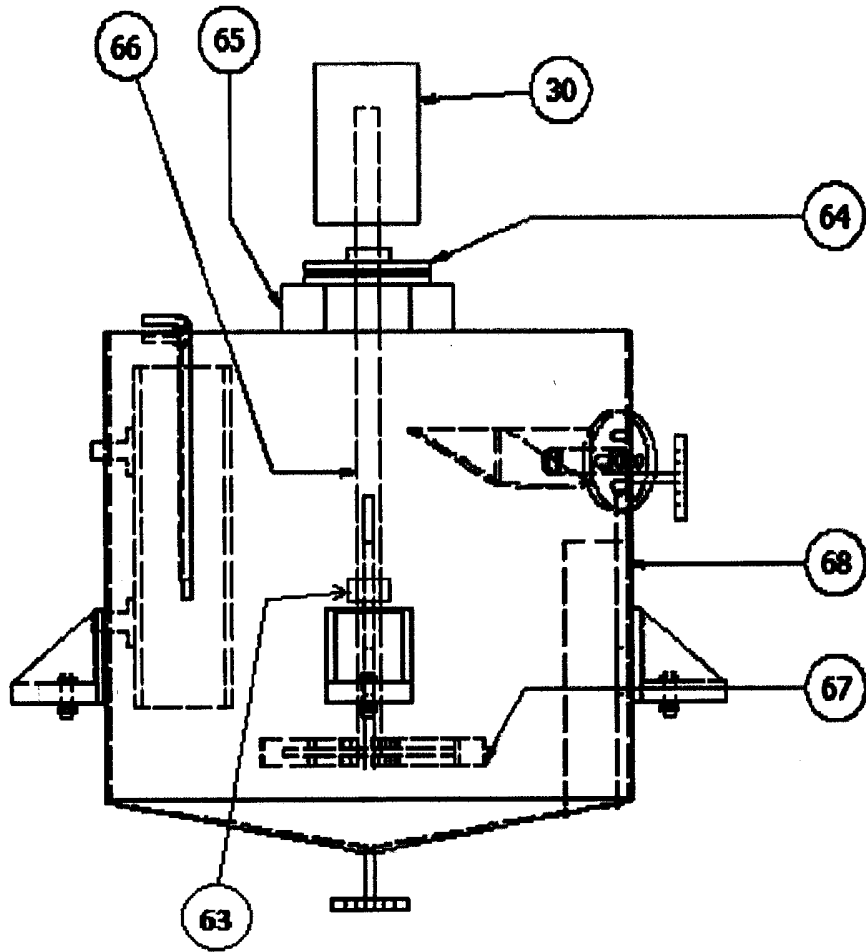


Figura 4

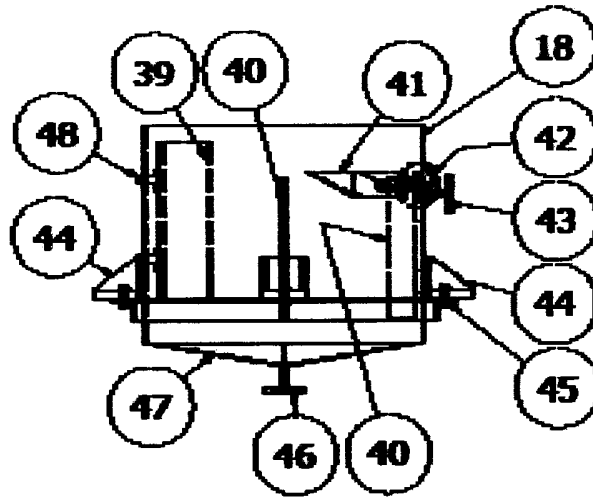


Figura 4a

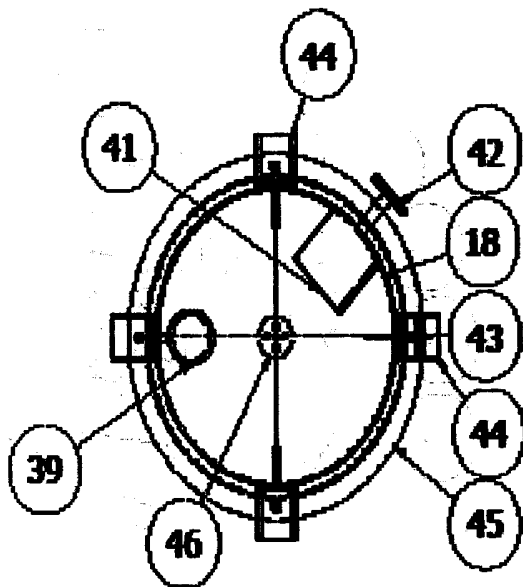


Figura 4b

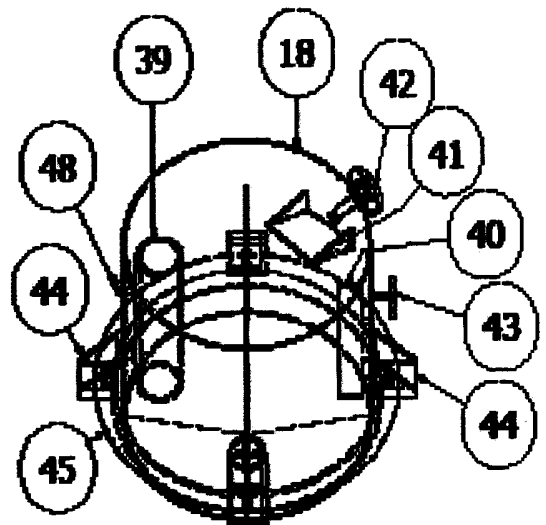


Figura 4c

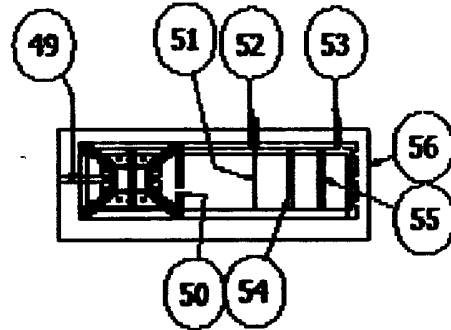


Figura 5

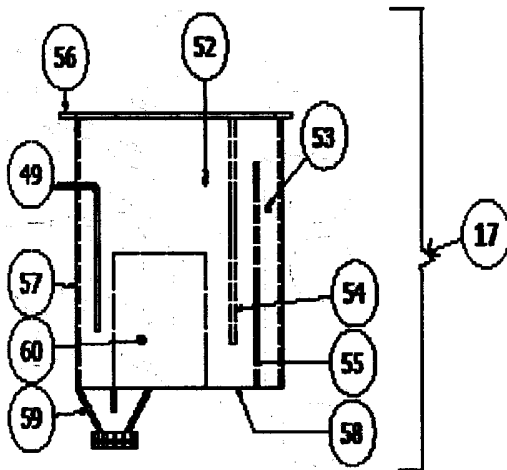


Figura 5a

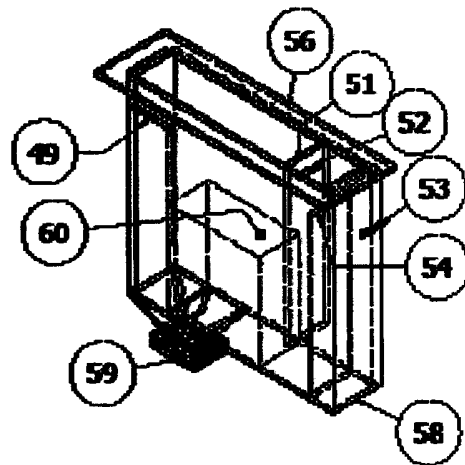


Figura 5b

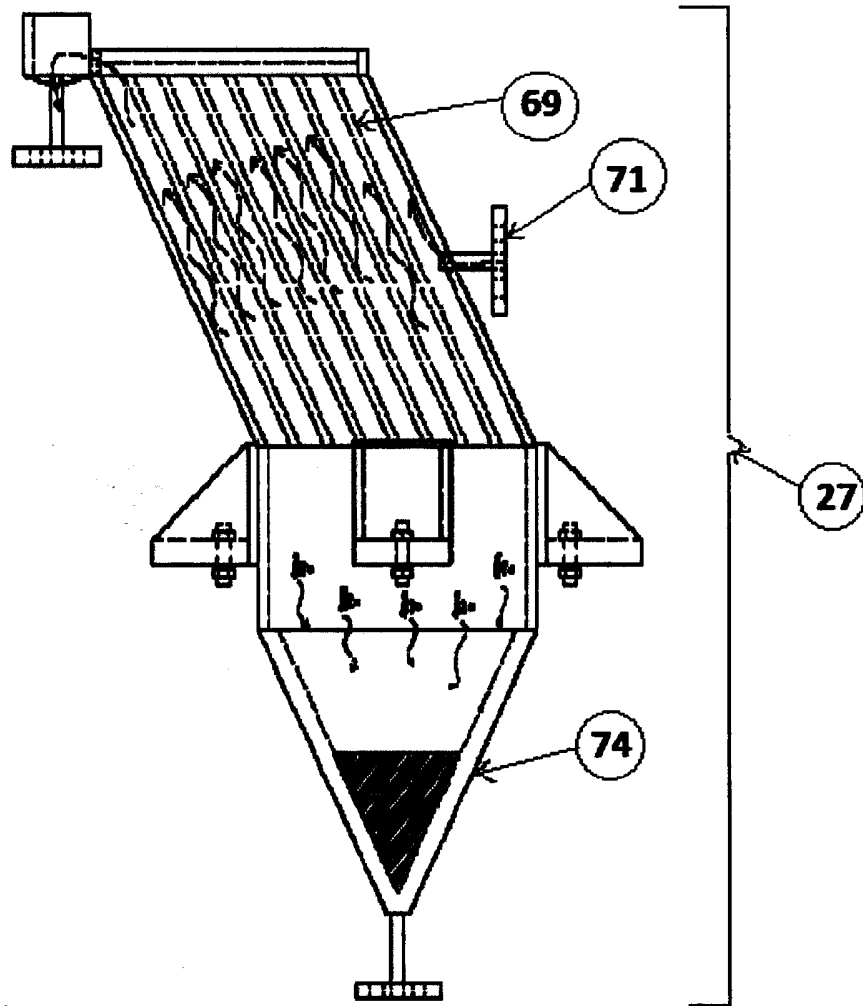


Figura 6

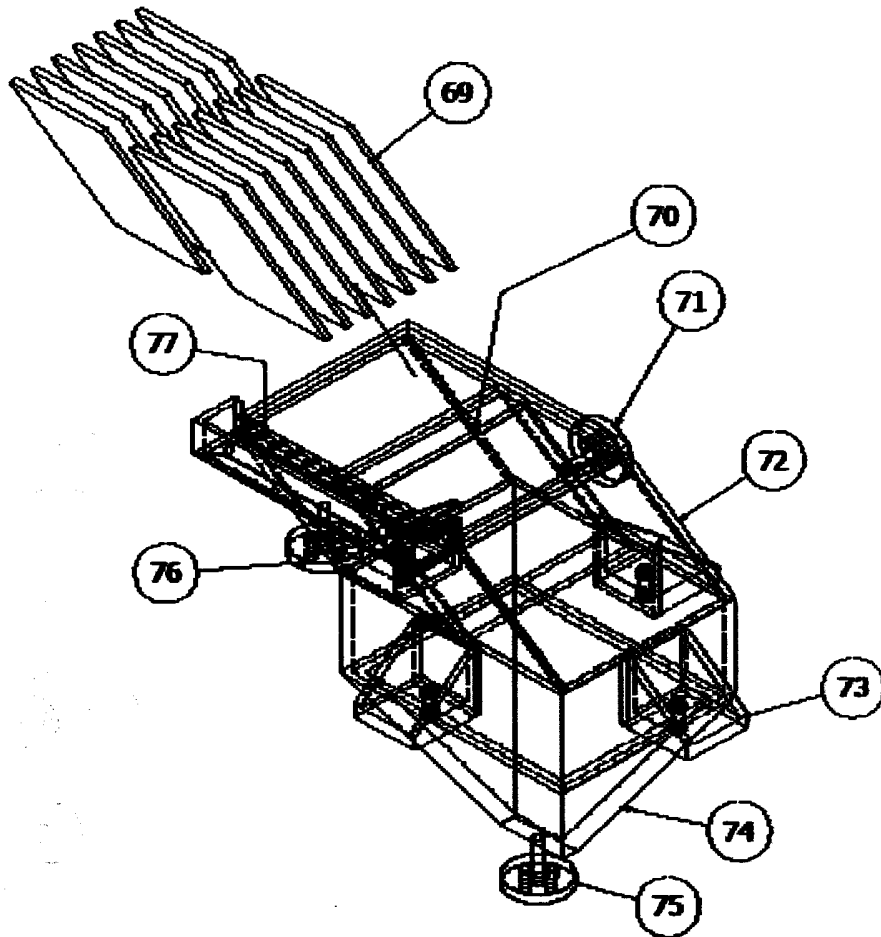


Figura 6a

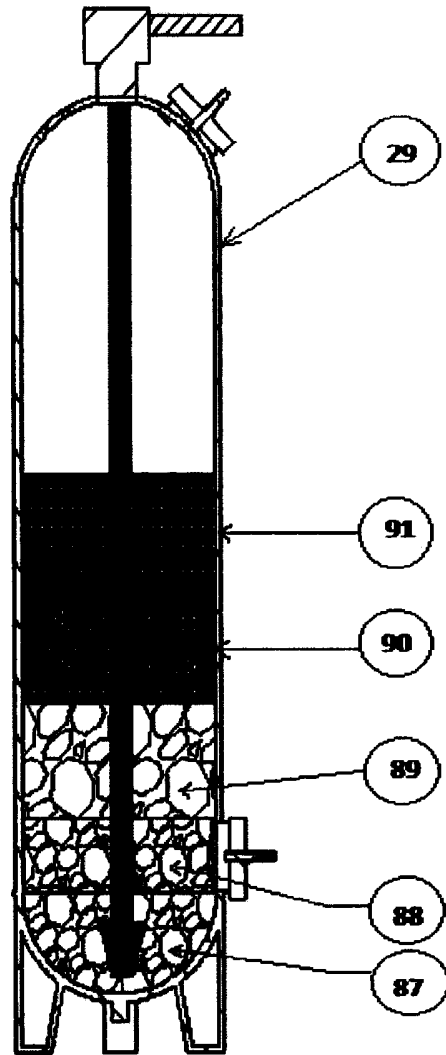


Figura 7