

126
29.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN REACTOR EXPERIMENTAL PARA TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A :
FERNANDO OSORIO PICHARDO



MEXICO, D. F.



EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA

1998.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

263248



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado asignado:

Presidente Prof. GONZÁLEZ ARREDONDO LETICIA MA. DE LOS A

Vocal Prof. TORRES BARRERA RODOLFO

Secretario Prof. LUNA PABELLO VÍCTOR MANUEL

1er. suplente Prof. RAMÍREZ BURGOS LANDY IRENE

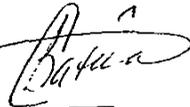
2do. suplente Prof. DURÁN DOMÍNGUEZ MA. DEL CARMEN

Sitio donde se desarrollo el tema: Laboratorio 301, Programa de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental. Edificio E.

Asesor del tema: Dr. LUNA PABELLO VÍCTOR MANUEL



Supervisor técnico: Dra. MA. DEL CARMEN DURÁN DOMÍNGUEZ



Sustentante: OSORIO PICHARDO FERNANDO



AGRADECIMIENTOS

A mis padres.

Pedro y Guadalupe por apoyarme en este largo trayecto de mi vida.

A mis hermanos y sobrinos

Mary, Pedro, Adriana, así como a mis sobrinos Itzel Ariadna, Emma Ivonne, Pedro Moisés y Joshua, por ver en todos ellos el incentivo para seguir adelante.

A Emy

Por su confianza, paciencia y fe puesta en mí para lograr terminar la carrera.

A los Doctores

A la Dra. Carmen Durán de Bazúa, por su apoyo para la realización de la presente tesis.

Al Dr. Víctor Manuel por darme la confianza, tener la paciencia y por todo el apoyo que me brindó para la realización de esta tesis.

A la GTZ, por su apoyo a través de una beca para llevar a buen término este proyecto.

A la Facultad de Química y a la UNAM por todo lo que me han dado desde mi ingreso hasta el final de la carrera.

A mis amigos

A René, Enrique, Memo, Lalo, Toño y al profesor Ezequiel con los que conviví más tiempo, y por toda la ayuda que me brindaron.

Al señor Víctor y Juan por su ayuda y colaboración en la construcción del reactor.

A TODOS ELLOS MUCHAS GRACIAS

Solo el hombre que ha pasado por el más grande de los infiernos conocerá el triunfo supremo.

ALEJANDRO DUMAS

RECONOCIMIENTOS

Se hace un amplio reconocimiento al apoyo financiero otorgado por parte del **PAIP** 5290 -12. y por el **PADEP** 005003 partida 411, subproyecto *Ingeniería Ambiental* de la Facultad de Química de la UNAM. Asimismo, se reconoce el apoyo económico obtenido por parte del Proyecto **FIES - IMP 96F-48-VI**.

ÍNDICE

	Pág.
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II. MARCO DE REFERENCIA	3
II.1.- Aspectos históricos relativos a la industria petroquímica	3
II.2.- Breve reseña sobre técnicas fisicoquímicas para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos	6
II.3.- Técnicas físicas y químicas para el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos	7
II.4 - Técnicas de biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos	12
II.5.- Selección de técnicas de remediación	20
II.6.- Costos	21
CAPÍTULO III. OBJETIVOS Y ESTRATEGIA DE TRABAJO	23
III.1- Objetivos	23
III.2- Estrategia de trabajo	23
CAPÍTULO IV. MÉTODOS Y MATERIALES	26
IV.1.- Diseño y construcción del reactor	26
IV.2.- Pruebas de funcionamiento preliminar	48
IV.3.- Pruebas de funcionamiento experimental con suelo no contaminado	50

CAPÍTULO V. RESULTADOS	52
V.1.- Resultados de Etapa 1	52
V.2.- Resultados de Etapa 2	52
V.3.- Resultados de Etapa 3	54
V.4.- Resultados de Etapa 4	55
V.5.- Resultados de la prueba de humedad relativa del suelo	56
CAPÍTULO VI. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	57
VI.1.- Estructura del reactor	57
VI.2.- Pruebas experimentales de funcionamiento	57
CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	60
VII.1.- Conclusiones	60
VII.2.- Recomendaciones	60
CAPÍTULO VIII. BIBLIOGRAFÍA	61
CAPÍTULO IX. ANEXOS	66
IX.1.- Anexo 1. Glosario	66
IX.2.- Anexo 2. Manual de operación del reactor	69
IX.3.- Anexo 3. Manual de mantenimiento del reactor	78
IX.4.- Anexo 4. Técnicas para la obtención de la humedad relativa del suelo	83

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

México cuenta con amplias regiones productoras de petróleo; este recurso es parte fundamental de la economía nacional, así como un medio que permite satisfacer las necesidades energéticas del país.

Además de su abastecimiento, México exporta grandes cantidades de petróleo, por lo cual constantemente se encuentra en la búsqueda de nuevos yacimientos petroleros. Invariablemente, la extracción del petróleo, conlleva a la contaminación de suelos y cuerpos de agua aledaños.

Las diversas tecnologías existentes para la recuperación de suelos y aguas contaminadas, pueden dividirse arbitrariamente en tratamientos *in-situ* (en el sitio) y *ex-situ* (fuera del sitio). Adicionalmente, cada una de ellas se subdivide en tratamientos fisicoquímicos y biológicos.

De manera particular, los tratamientos biológicos para suelos contaminados con hidrocarburos, resultan de gran interés para ser estudiados.

Por tal motivo, el propósito del presente trabajo fue el de diseñar y construir un reactor experimental a escala de laboratorio que permita el estudio del tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos. Este reactor tiene como finalidad permitir la evaluación del fenómeno de biorremediación *ex-situ* de manera más detallada.

A partir de la realización de estudios como el presente, se pretende sentar las bases que permitan la realización de un sistema de tratamiento a escala piloto.

La construcción del reactor experimental a escala de laboratorio, es la parte medular del presente trabajo. No obstante, se tiene contemplada la realización de pruebas preliminares de arranque para el buen funcionamiento del mismo. El diseño incluye los aspectos relacionados con la operación segura del equipo.

Cabe señalar que en la conceptualización de este reactor, se contempló el manejo de las principales variables de operación propias de este tipo de sistemas experimentales.

Asimismo se tienen previstos aditamentos que permitan la obtención de muestras de suelos para que mediante el análisis correspondiente, por ejemplo la desaparición del sustrato y/o aparición de productos en tiempos definidos, pueda evaluarse la calidad operativa del sistema.

Alternativas de tratamiento como la planteada en el presente estudio, buscan promover la restauración del entorno natural impactado negativamente por la explotación del petróleo en territorio nacional.

Para la realización de lo anteriormente señalado, se optó por incluir en el capítulo II, lo relativo a las principales técnicas disponibles para la recuperación de suelos contaminados con hidrocarburos. Y en el capítulo III los objetivos y la estrategia de trabajo correspondientes.

Posteriormente, en el capítulo IV, se da la información detallada sobre el diseño y construcción del reactor.

En el capítulo V, se presentan los resultados de las pruebas de evaluación preliminar de funcionamiento del reactor, los cuales se analizan y discuten en el capítulo VI.

Las conclusiones derivadas del trabajo desarrollado y las recomendaciones para trabajos subsecuentes, se indican en el capítulo VII.

En el capítulo VIII, se presenta la bibliografía citada en el presente texto.

Finalmente, en el capítulo IX, se encuentran los anexos que se consideró pertinente incluir. El primero, relativo a un glosario; el segundo corresponde a un manual de modo de operación del reactor y de las medidas de seguridad para el operario; el tercero trata sobre un manual de mantenimiento y el cuarto anexo tiene lo referente a la técnica empleada en la determinación de la humedad relativa de un suelo no contaminado.

A continuación se desarrollará cada uno de los capítulos señalados anteriormente.

CAPÍTULO II. MARCO DE REFERENCIA

II.1 Aspectos históricos relativos a la industria petroquímica

En la industria petroquímica se encuentra una de las actividades más versátiles de la economía del país, lo que ha modificado tal vez más notablemente los hábitos de consumo mexicano. La petroquímica básica tiene su aparición en 1951 cuando la **Refinería de Poza Rica** empezó a elaborar azufre, producto proveniente del gas amargo de los yacimientos del área. Después, en 1971, se inició la elaboración del polietileno (plástico de múltiples usos que proviene del gas etileno).

Puede decirse que el comienzo de la petroquímica básica en México, ocurrió en la década de los años 50, cuando en 1959 arranca la **Refinería de Azcapotzalco** y con ello la producción de dodecibenceno, el cual es la materia prima empleada para la fabricación de detergentes domésticos, uno de los productos de mayor consumo popular.

La década de los años 60 fue muy importante para el crecimiento de la petroquímica estatal, ya que aparecieron 9 complejos, pasando de 65,000 toneladas métricas anuales de productos básicos en 1960, a cerca de 2 millones en 1970. Con el incremento de los recursos petroquímicos se aseguró el abastecimiento de este importante recurso (El Petróleo. Memorias de PEMEX, 1996).

El amoníaco, es cual es empleado principalmente en la elaboración de fertilizantes, es otro producto que alcanzaría un desarrollo extraordinario. Su aparición en la nómina de los petroquímicos básicos fue poco después de fundado, en 1962, el **Complejo de Cosoleacaque**. Este complejo siguió ampliando su capacidad productora, tanto para el amoníaco como para los otros productos que procesa, abriendo en 1981 un total de 8 plantas. También en 1981, el complejo petroquímico establecido en Cd. Madero Tamaulipas, inicia sus actividades con el procesamiento de varios productos en 8 plantas industriales, entre ellos el azufre, dodecibenceno y estireno (El Petróleo. Memorias de PEMEX, 1996).

En 1964, se creó el **Complejo de Minatitlán**, el cual se dedicó a la elaboración de 9 productos diferentes, entre ellos el etilbenceno y benceno. El primero de estos productos es utilizado para fabricar hule sintético, en tanto que el benceno, que es un producto más versátil, es aprovechado en su mayor parte dentro de la misma industria petroquímica para la elaboración de dodecibenceno y ciclohexano. El excedente producido es usado como solvente en pinturas, lacas, barnices o bien como materia prima en algunas síntesis orgánicas (El Petróleo. Memorias de PEMEX, 1996).

Adicionalmente, en el **Complejo de Minatitlán**, se crearon plantas productoras de aromáticos, sustancias que sirven para la recuperación de bencenos, toluenos, etilbencenos y ortoxilenos, de los cuales a su vez se extraen nuevos productos intermedios y de uso final.

En el año de 1966, inicia su operación el **Complejo de Reynosa**, en Tamaulipas, con distintas plantas de adsorción, etileno y polietileno, entre otras. En la planta de adsorción se recupera el etano del gas natural, siendo a su vez materia prima para la obtención del etileno. De este modo se obtiene el polietileno de baja densidad, material para la fabricación de utensilios plásticos.

Entre otros complejos petroquímicos aparecidos en la década de los años 60, destaca **Pajaritos**, en el estado de Veracruz, localizado a 4 kilómetros de la desembocadura del río Coatzacoalcos. La importancia estratégica de Pajaritos, reside en que es la terminal portuaria más grande del país, lo que permite la entrada y salida de productos al extranjero. En este complejo, el etileno es el producto más importante ya que suministra materia prima a varias plantas de transformación que trabajan a partir de él. Desde su creación, en 1967, ha tenido ampliaciones importantes, siendo la más reciente en 1984.

La última instalación realizada en la década de los años 60 fue la de **San Martín Texmelucan**, en Puebla, cuyo inicio de operaciones data de 1969, siendo su finalidad la de producir metanol, el cual es un alcohol utilizado en la elaboración de gasolina, a efecto de mejorar la combustión así como la reducción de emisiones contaminantes.

El metanol también se emplea en la formación de solventes para lacas y pinturas. Por otra parte, la industria petroquímica secundaria lo utiliza en la elaboración de formaldehído, compuesto que sirve para la producción de plásticos, resinas, fibras textiles, adhesivos y pegamentos. En 1978, entró en operaciones una segunda planta de metanol con una capacidad de producción de 150,000 toneladas por año, con lo cual se suprimieron las importaciones, iniciándose a su vez la exportación.

En el sureste del país, donde se encuentran los yacimientos de explotación de petróleo más importantes de los últimos diez años, en esa región surgieron dos complejos petroquímicos de capital importancia: **Cactus** y **Nuevo PEMEX**, ambos en la misma región.

El **Complejo Cactus**, se halla a 45 kilómetros de Villahermosa, e inició operaciones en 1974 con el procesamiento de azufre. Cactus recupera el gas amargo que proviene de los yacimientos de la región colindante de los estados de Chiapas y Tabasco. Las plantas que componen el complejo se dedican al proceso de endulzamiento del gas amargo que, posteriormente, es tratado en plantas de adsorción y criogénicas que recuperan productos licuables como etano, propano, butano y gasolinas. En 1982, se instaló en el **Complejo Cactus** la más reciente planta endulzadora de líquidos, completando el número total de plantas a trece, de las cuales once son endulzadoras de gas.

Del **Complejo Nuevo PEMEX**, que se encuentra ubicado a 5 kilómetros de Reforma, Chiapas, su inicio de operaciones data de 1984 y cuenta con plantas endulzadoras de gas y recuperadoras de azufre, de las cuales se obtienen diversos gases y naftas.

Hoy en día se considera que el Complejo Petroquímico más importante es el de la **Cangrejera**, situado a 8 kilómetros al este de Coatzacoalcos, en Veracruz, el cual dio inicio a sus operaciones en abril de 1981. Este complejo cuenta con 19 plantas para la producción de gasolina amarga, oxígeno, nitrógeno, óxido de etileno, diversos gases, naftas, paraxilenos, benceno, etileno y polietileno, entre otros productos.

La industria petroquímica continua en aumento y para 1986 entra en operaciones el **Complejo Independencia**, ubicado en el poblado de Santa María Mayotzingo, en el estado de Puebla.

Finalmente, para 1988, es cuando se ponen en operación las primeras plantas del **Complejo Morelos**, ubicado en el estado de Veracruz.

La anterior reseña, da una idea muy general de la versatilidad con que se encuentran organizados los diferentes tipos de procesamiento de hidrocarburos, dentro de los complejos petroquímicos, teniendo como punto de partida tanto al petróleo como el gas natural.

Derivadas de las diferentes actividades de la industria petroquímica, se ocasiona contaminación ambiental. Tal es el caso de la emisión de hidrocarburos volátiles y los derrames en el suelo.

Cabe señalar que en caso de derrames en suelo, no sólo afectan flora y fauna de la región, sino que se dañan los mantos acuíferos. Debe tenerse presente que al dañar tanto el agua como al suelo, se está afectando también a las poblaciones humanas y otros seres vivos que habitan en esa zona.

Por tal motivo en 1983, se establece un convenio firmado entre PEMEX y la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. En este convenio la institución petrolera asume la obligación de proteger, controlar y restaurar el medio afectado por sus actividades industriales, y por las comunidades y poblaciones donde opera (El Petróleo. Memorias de PEMEX, 1996).

Dicho convenio establece que PEMEX realizará los esfuerzos necesarios y aplicará los recursos económicos requeridos para resolver los problemas derivados de sus actividades.

Asimismo, PEMEX se compromete a la restauración de los terrenos afectados por los derrames de los hidrocarburos. Existen zonas afectadas por actividades industriales que tienen carácter prioritario, como sucede en los estados de Veracruz, Tabasco, Campeche y Chiapas, en donde es más intenso el trabajo petrolero. En estas zonas se presta atención especial sobre todo porque se han generado conflictos que, siendo inicialmente ambientales, han derivado hacia problemas de orden social y político (El Petróleo. Memorias de PEMEX, 1996).

Por lo mencionado anteriormente, el restaurar el suelo que ha sido contaminado por hidrocarburos ha cobrado una gran importancia. Para solucionar este problema se han elaborado una serie de técnicas, que al ser aplicadas en este tipo de suelos promueven su recuperación, buscando hacerlos útiles nuevamente. En consecuencia, dada la importancia de los procedimientos empleados en la recuperación de los suelos contaminados con hidrocarburos, se ampliará la información al respecto.

II.2 Breve reseña sobre técnicas fisicoquímicas para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos

Este tipo de técnicas se han desarrollado basándose en los enlaces químicos que hay cuando se forman los compuestos fenólicos y anilínicos al ponerse en contacto con el material húmico que existe en el suelo, así como también considerando las propiedades físicas del mismo. Los compuestos que se forman son xenobióticos pero su similitud con las sustancias precursoras de los ácidos húmicos naturales, permiten que se incorporen al humus. A partir de esta unión, se disminuye la cantidad de los contaminantes que interactúan con los organismos vivos, reduciendo de esta manera su toxicidad e impidiendo su lixiviación, disminuyendo el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas. Los beneficios se pueden ir incrementando mediante la alteración de las condiciones fisicoquímicas del suelo (Domenech et al., 1993).

Los compuestos xenobióticos interactúan con las sustancias húmicas de diferentes maneras, una de ellas es su adsorción sobre las superficies sólidas, en las cuales se encuentra el material orgánico. Adicionalmente, se llevan a cabo interacciones de corto alcance, son las fuerzas de van der Waals; enlaces de hidrógeno; interacciones hidrofóbicas y de complejación.

La rapidez con la que se adsorben los contaminantes sobre un compuesto xenobiótico, depende fundamentalmente de la naturaleza química y del tipo de estructura molecular del contaminante, así como del tiempo de contacto que ha transcurrido entre el contaminante con el suelo.

Cuando las interacciones son muy fuertes, se hacen muy resistentes a la hidrólisis (ácidas y básicas), así como al tratamiento térmico y a la degradación biológica, recurriéndose entonces a catalización con enzimas o compuestos inorgánicos como son los oxohidróxidos de hierro, aluminio o manganeso, así como a partículas de arcilla. Además, si por añadidura el medio es alcalino, la complejación es espontánea y sin la necesidad de emplear catalizadores. En este caso, sólo se necesita un ambiente aerobio.

Para la recuperación de un suelo deben tenerse en cuenta el clima, el tipo de suelo y prácticas agrícolas, así como las características fisicoquímicas del suelo.

A continuación se describen las técnicas más desarrolladas para el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos.

II.3 Técnicas físicas y químicas para el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos

Barreras de contención

Estas barreras deben ser capaces de contener la pluma contaminante sin dejar escapar los contaminantes que se encuentren en el interior de la barrera, o bien, en el caso de que esto ocurra, dejarlos salir a un determinado flujo, de modo tal que no constituyan un riesgo. Además debe considerarse que el tipo de construcción que se lleve a cabo tiene que ser compatible con la geología del sitio (Calabrese y Kosteji, 1989).

Recuperación con materiales adsorbentes

Para este tratamiento se recomienda colocar en el sitio a tratar materiales como cáscara de coco o material hidrofóbico y oleofílico. Este tipo de materiales tiene como principales características que pueden adsorber fácilmente la pluma contaminante del suelo contaminado (CIGM, 1988). El material adsorbente tendrá que ser dispuesto apropiadamente.

Volatilización

De un 20 a 40% de los residuos pueden ser volatilizados siempre y cuando el suelo esté bien aireado, pero también se debe contar con la temperatura adecuada promedio de 20°C y que esta además se mantenga así por lo menos un mes. Asimismo, la contaminación no debe exceder de 5 a 10 cm de profundidad, ya que cuando es mayor, se aconseja una labranza, o bien, la inyección de aire. La aireación en general es esencial porque favorece a los mecanismos de pérdida física de contaminante (CIGM, 1988). Obviamente, los hidrocarburos volatilizados se van a contaminar la atmósfera.

Lixiviación

La lixiviación es posible, aunque no es muy aconsejable dado que los productos solubles en agua tienden a ser arrastrados a sitios aledaños al derrame. Asimismo, la descomposición química o microbiana de los contaminantes puede conducir a la formación de productos solubles, los cuales eventualmente podrían también contaminar capas más profundas de suelo e inclusive mantos freáticos (, 1988).

Incineración (*in-situ* y *ex-situ*)

La incineración remueve inclusive los últimos residuos de compuestos contaminantes, favoreciendo la volatilización de sustancias altamente tóxicas y dejando en algunos casos una capa de alquitrán. Este es un proceso que se utiliza a un nivel superficial, pero que causa la seria translocación de las sustancias hidrofílicas a través del suelo afectando el movimiento de agua a través del mismo. Se debe tener presente que la incineración imposibilita un posterior uso del suelo como tal, ya que al mismo tiempo implica la pérdida de sus propiedades fisicoquímicas y biológicas.

Cuando la incineración es masiva, el control es difícil (Altamirano, 1996). Por otra parte este método puede también aplicarse de manera *ex-situ*, empleando para ello hornos rotatorios. Puede decirse que este proceso es rápido, muy eficaz y seguro, ya que al someter los contaminantes a temperaturas de entre 900 y 1000°C, se pueden cumplir con las normas más estrictas. Este método garantiza la eliminación, inclusive, de las trazas de contaminantes hasta en un 99.999%. Sin embargo, es un proceso costoso y carente de aceptación pública dado que como se mencionó anteriormente, inutiliza el suelo (CIGM, 1988).

Mezcla o labranza

Este método es ampliamente recomendado para suelos húmedos como los de turba; no obstante, en suelos agrícolas contaminados con petróleo, al ser estos bien drenados se favorece su deshidratación. Además debe cuidarse que el petróleo no se encuentre depositado a más de 20 cm de profundidad ya que ello disminuye la degradación biológica y volatilización de los hidrocarburos. Este proceso se torna muy difícil cuando existe una "costra" de contaminantes. Lo anterior se debe a que la descomposición microbiana es un fenómeno de superficie, por lo que se favorece la depuración al aumentar el área de contacto existente (CIGM, 1988).

Drenaje

Es aconsejable la utilización de este tipo de técnica en suelos húmedos y boscosos. No debe realizarse en suelos agrícolas que son insuficientemente humidificados, ya que hay una gran pérdida de humedad debido a las condiciones climáticas que afectan el proceso.

En consecuencia es utilizable cuando es necesario favorecer el suministro del oxígeno al suelo y la salida de las sustancias volátiles, o bien cuando se facilitan las operaciones de alimentación y extracción del contaminante. Su aplicación debe estar acompañada del uso de fertilizantes y labranza mecánicas (CIGM, 1988).

Desorción térmica

Es un método de separación físico, aunque también ocurren transformaciones químicas, dependiendo de la estabilidad térmica de los compuestos orgánicos y de la temperatura de operación. La desorción puede llevarse a cabo mediante el uso de un horno que es calentado hasta una temperatura cercana al punto de ebullición del contaminante.

Para ello se emplean tiempos de residencia específicos para lograr la fase de vapor de los contaminantes que son enviados a la segunda etapa, consistente de un incinerador secundario acoplado. Cabe destacar que para este segundo proceso se requiere de una menor cantidad de energía y el costo es menor que el de la incineración directa del suelo (Calabrese y Kosteji, 1989).

HMA (Hot Mix Asphalt)

En esta técnica implica la recuperación del suelo contaminado, y su uso en la elaboración de un producto útil. El suelo contaminado con hidrocarburos es sometido a la planta de asfalto para su aprovechamiento en la producción de carpeta asfáltica. Cabe señalar que este tipo de uso está limitado al suelo que contiene arcilla o partículas de tamaño utilizables (Calabrese y Kosteji, 1989).

Extracción al vacío

Este es un proceso de limpieza "in-situ", mediante el cual se puede remover el petróleo de los suelos directamente, de manera rápida y a bajo costo. Su aplicación se ha realizado en horizontes de suelo que van desde tres pulgadas hasta 300 pies, llevándose a cabo no solo la extracción de contaminantes líquidos, sino también de compuestos volátiles (Calabrese y Kosteji, 1989).

Encapsulado (*solidificación/estabilización*)

El proceso de encapsulado, conocido como “ *fijación*” o “*inmovilización*”, consiste en la introducción o encerramiento de los contaminantes en una masa de material estabilizante que lleva a cabo su inmovilización por medio de los enlaces entre el agente inmovilizador y el contaminante. Este método es aplicable a todo tipo de suelos y residuos, incluyendo metales pesados y algunos compuestos semivolátiles. Además de ser económico y rápido, tiene una moderada aceptación legal. No obstante puede requerir largos períodos de monitoreo, sin olvidar que su grado de eficiencia en la remoción de contaminantes es relativamente baja (Harding Lawsons Associates-GRIECO, 1995).

Vitrificación

En este tratamiento se alcanzan temperaturas de 3000°C por lo que se forman estructuras cristalinas con características de lixiviación muy bajas. Los metales que resultan se encapsulan en una estructura de compuestos de silicato fundido y los compuestos orgánicos son fragmentados por el calor, lo que origina el *requerimiento del control de vapores*. Es aplicable a metales, asbestos, compuestos orgánicos y suelos homogéneos.

Este proceso es de muy alta eficiencia para la eliminación de contaminantes, pero no es muy aceptado debido a que es relativamente lento y altamente costoso (Harding Lawsons Associates-GRIECO, 1995).

Excavación y confinamiento “*ex-situ*”

Para este caso, el material que está contaminado es *transportado y llevado* a un relleno para su disposición final. En algunos casos esto no será posible debido a las características fisicoquímicas que presenta cada suelo. Es costoso y las normas no lo aceptan en su totalidad, ya que en realidad no resuelve el problema sino que lo cambia de un lugar a otro (Harding Lawsons Associates-GRIECO. 1995).

Sistema OUUU

Este es un proceso que sirve solamente para eliminar sustancias solubles en agua, que consta de dos etapas. La primera consiste en *remover los contaminantes* empleando agua de alta pureza como solvente. La segunda etapa consiste en dar tratamiento a la solución acuosa con el objeto de convertir los contaminantes en dióxido de carbono, agua y sales *inocuas*.

Para lograr esta transformación se requiere del empleo de ozono (O), luz ultravioleta (U), ultrasonido (U) y agua de alta pureza o ultra pura (U). Este tipo de sistema de tratamiento es portátil y puede ser operado de manera "in-situ" (Calabrese y Kosteji, 1989).

Foto-oxidación

Este tipo de técnica implica el uso de luz ultravioleta y catalizadores para diferentes contaminantes. Este proceso permite que pueda llevarse a cabo posteriormente la descomposición biológica de los contaminantes presente en el suelo. No es en sí de gran importancia, en lo referente al volumen de suelo tratado, ello debido a que solamente puede ser depurado de manera superficial (CIGM, 1988).

Neutralización

En este caso, los contaminantes cáusticos o corrosivos, son neutralizados por medio de los reactivos adecuados(amortiguadores, medios ácidos o alcalinos, según corresponda). Esto es aplicable sobre todo a los contaminantes orgánicos e inorgánicos. Tiene como ventajas ser económico, rápido y bastante aceptable en el ámbito del tratamiento de suelos (Harding Lawsons Associates-GRIECO, 1995).

Deshalogenación

Es la separación del contaminante por medio de bicarbonato de sodio o polietilenglicol alcalino. Una vez que el suelo ha sido procesado, y se calienta, por medio de un horno rotatorio o en un reactor, en donde los contaminantes son descompuestos en forma total o volatilizados en forma parcial. Este proceso es aplicable para pequeños volúmenes de contaminantes, algunos orgánicos y sobre todo para "PCBs"(por las siglas en inglés de los bifenilos policlorados). Alcanza una remoción adecuada y es regularmente aceptable. Sin embargo, requiere de largos períodos de tratamiento, lo que resulta altamente costoso (Harding Lawsons Associates-GRIECO, 1995).

Extracción con solventes

Para la aplicación de esta técnica, se usan los solventes que sean capaces de lograr solubilizar y remover los contaminantes de interés. Por lo regular este tipo de tratamiento se acompaña con solidificación; lavado de suelo o la incineración acoplada con la extracción de los contaminantes. En lo referente a la normatividad tiene una aceptación regular, debido a que tiene una eficiencia moderada. Adicionalmente es bastante lento y sumamente costoso (Harding Lawsons Associates-GRIECO, 1995).

Lavado de suelo

Este tipo de tratamiento se basa en la agitación mecánica del suelo con agua, durante a la cual se le añaden agentes lixiviantes, tensoactivos, amortiguadores o quelantes, los cuales tienen como función principal concentrar los contaminantes y segregarlos del suelo aprovechando la densidad que adquieren. Este método es aplicable a residuos orgánicos, metales pesados, hidrocarburos del petróleo y suelos heterogéneos (mezclas de grava y arcilla). Pueden también usarse para tratamientos posteriores, es decir, una vez que han sido aplicados otros métodos. Cabe señalar que es un método bastante rápido, con una aceptación regular y con un grado de remoción que reduce parcialmente el grado de toxicidad, pero frecuentemente este tratamiento requiere de otros tratamientos adicionales para llegar a la remoción de contaminantes deseada.

Extracción de vapores

Este es un método ampliamente recomendable, el cual puede ser todavía optimizado con la inyección de aire caliente o de calor eléctrico, así como por el aumento de la presión. Los contaminantes son arrastrados a la superficie por lo que se necesita un sistema de captura de gases. Este proceso cumple con las condiciones que establecen las normas, su grado de eficiencia es aceptable, al igual que su costo. (Harding Lawsons Associates-GRIECO, 1995).

II.4 Técnicas de biorremediación para suelos contaminados con hidrocarburos

Antes de conocer las técnicas de biorremediación para el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos a continuación se presenta algunos conceptos básicos sobre este tema.

Biorremediación

Se denomina biorremediación a la descomposición de la materia orgánica natural o sintética por la acción de los microorganismos del suelo o agua para la obtención de moléculas más simples (Albert et al., 1995).

La biorremediación ofrece técnicas de limpieza potencialmente más efectivas y económicas a través de la destrucción parcial o total del contaminante (Bouwer, 1992).

El hecho de que la biorremediación pueda transformar un contaminante vía actividad microbiana a un producto final menos tóxico o no tóxico, es la mayor ventaja de esta técnica sobre otros procedimientos de remediación, los que generalmente sirven únicamente para concentrar, dispersar o reubicar los contaminantes, o bien, inutilizar el suelo para fines productivos.

Para llevar a cabo la biorremediación, se estimula el crecimiento de microorganismos nativos o aclimatados en el ambiente mediante el suministro de condiciones más adecuadas para su proliferación (p.ej. adición de nutrimentos, pH neutro, humedad adecuada, etc). La biotransformación de los contaminantes orgánicos es facilitada por enzimas durante las funciones metabólicas normales de los microorganismos a través de la asimilación del carbono orgánico presente en el sustrato y su conversión a productos inorgánicos.

Durante dicha transformación hay liberación de energía que permite elevar la capacidad biosintética y la incorporación de carbono como constituyente celular, observándose un incremento en número y biomasa de la población. Las ventajas de la biotransformación incluyen la mineralización parcial o total del contaminante y el hecho de que las reacciones enzimáticas mediadas por microorganismos son generalmente más rápidas que realizadas en ausencia de éstos (Alexander, 1981).

Las bacterias capaces de biodegradar hidrocarburos del petróleo habitan comúnmente en el suelo. El proceso de biodegradación ocurre espontáneamente; sin embargo, sin la adición de nutrimentos y una concentración adecuada de oxígeno, ocurrirá con lentitud. En algunos casos, pueden introducirse bacterias satisfactoriamente aclimatadas a un contaminante en particular, disponibles comercialmente, pero aún no es un procedimiento común.

De acuerdo a la atmósfera existente los procesos de biodegradación se dividen en (Tortora et al., 1992):

Aerobios: Se lleva a cabo en ambientes con fuerte aireación. Los principales productos de biodegradación son bióxido de carbono, a partir de la oxidación de materia orgánica; agua debido a la reducción de oxígeno molecular y biomasa.

Anaerobios: En este caso, la concentración de oxígeno es nula. El proceso es ineficiente desde el punto de vista metabólico, ya que los microorganismos dejan grandes cantidades de material orgánico parcialmente digerido en forma de ácidos grasos, alcoholes y otros similares que retienen parte de la DBO original. Se promueve el crecimiento de bacterias anaerobias, especialmente metanogénicas, las cuales degradan los sólidos orgánicos a sustancias solubles y gases (metano y bióxido de carbono).

Los hidrocarburos del petróleo están compuestos por carbono e hidrógeno. Bajo condiciones ideales los productos de biodegradación aerobia finales deben ser agua, bióxido de carbono y biomasa. Bajo condiciones no ideales (concentración de oxígeno inadecuada, falta de nutrientes, etc), los hidrocarburos serán degradados parcialmente y habrá un menor porcentaje de degradación. Si se crean condiciones especiales, podrán aumentar dicho porcentaje.

Desde la década pasada, la biorremediación ha sido aplicada en la recuperación de sitios contaminados (Blackburn y Hafker, 1993). La experiencia acumulada ha permitido generalizar algunas de sus aplicaciones como las siguientes:

- El comportamiento y destino de los contaminantes depende de las características específicas del sitio afectado, por lo que es difícil generalizar los resultados obtenidos de un caso a otro.
- La complejidad de la mezcla de hidrocarburos y el tiempo que han permanecido en el sitio pueden afectar la velocidad y el alcance de los niveles de saneamiento esperados.
- Se han observado altos niveles de variabilidad entre estudios realizados a pequeña y gran escala, por lo que para determinar la efectividad de la biorremediación se requiere el diseño de experimentos que puedan ser analizados estadísticamente.

La tabla II-1 representa el comportamiento de los hidrocarburos con respecto al tratamiento de biodegradación.

Tabla II-1. Clasificación de hidrocarburos de acuerdo a su susceptibilidad de biodegradación (Lyman et al., 1990)

Susceptibilidad	Hidrocarburos
Altamente susceptibles	n- e iso alcanos
Muy susceptibles	1-,2-,5- y 6- cicloalcanos, aromáticos de 1 anillo y aromáticos azufrados
Moderadamente susceptibles	3- y 4- cicloalcanos y aromáticos de 2 y 3 anillos
Muy resistentes	Tetra-aromáticos, esteranos, triterpenos y nafteno-aromáticos
Altamente resistentes	Penta-aromáticos, asfaltenos, resinas

Factores fisicoquímicos y microbiológicos específicos del sitio que influyen en la cinética de biodegradación de hidrocarburos

Antes de aplicar alguna técnica para la biorremediación de suelos es necesario conocer algunas características sobre el sitio como son las siguientes:

- Concentración de oxígeno disponible.
- Temperatura del suelo. La temperatura del suelo aumenta la velocidad de degradación de manera proporcional dentro de un intervalo de 0 a 35°C. Siendo entre 20 y 35°C el considerado como óptimo (Chaîneau et al., 1995; Lyman et al., 1990).
- Humedad del suelo. Este parámetro se considera como óptimo si se encuentra entre un 50 y 80%. Los suelos con esta característica promueven una disolución adecuada del contaminante y contienen suficiente aire para suministrar oxígeno.
- Concentración de nutrientes esenciales (macro y micronutrientes). En algunos casos se adicionan nitrógeno y fósforo, sin embargo la cantidad y composición de los nutrientes que deberán añadirse son difíciles de predecir, ya que otros factores influyen sobre el proceso de biodegradación.
- Concentración de hidrocarburos. Si la concentración de hidrocarburos es muy baja, la bacteria puede utilizar sustratos alternos para su nutrición y si es muy alta, puede ser tóxica para la población bacteriana. Para un tratamiento "in-situ" puede ser suficiente para una concentración de 10 mg/ L.

Los hidrocarburos del petróleo disueltos en agua no suelen encontrarse a concentraciones superiores de 4000 mg/ L; no obstante, los no hidrosolubles suelen constituir el principal problema a resolver.

- pH. Los suelos ligeramente alcalinos son óptimos para la biodegradación, el intervalo de 6.0 a 8.0 se considera aceptable debido a que en muy común encontrar suelos ligeramente ácidos, se hace necesario una previa neutralización o alcalinización del sitio.
- Conductividad hidráulica. La biorremediación "in-situ" no es posible si existe o resulta extremadamente lenta una baja conductividad hidráulica. Lo anterior se debe a que no ocurre de manera adecuada en la zona contaminada, el contacto de los nutrientes y el oxígeno atmosférico.
- Densidad y polaridad del hidrocarburo. De estos parámetros depende la penetración y solubilidad en medio acuoso y que son determinantes para asegurar la migración del contaminante.

La solubilidad tiene efecto en la velocidad de biodegradación, ya que ocurre con mayor rapidez en la fase disuelta del contaminante. Se ha determinado que los contaminantes adsorbidos son también biodegradables, pero a una velocidad menor.

Monitoreo del proceso de biorremediación

Cuando se encuentran zonas que son contaminadas o afectadas con hidrocarburos, es necesario tomar muestras de suelo, recolectarlas y realizar el análisis de aquellos contaminantes de interés. Las concentraciones de bióxido de carbono pueden ser cuantificadas para determinar la actividad biológica existente. Es importante tomar muestras complementarias y analizar el contenido de oxígeno, nutrimentos, pH, potencial redox y poblaciones microbianas para asegurar que se mantienen condiciones óptimas para la biodegradación del contaminante.

Biorremediación de suelos y sedimentos

En este tipo de técnicas se tratan suelos y sedimentos dragados con presencia de aceites pesados, hidrocarburos aromáticos y otros. Se ha demostrado tanto "in-situ" como "ex-situ".

El procedimiento sirve para limpiar suelos que presentan contaminantes peligrosos. La recuperación del suelo orgánico incrementa la biorremediación y mejora las condiciones ambientales (nutrimentos, agua disponible, superficie de adhesión microbiana y contacto interfacial entre compuesto blanco y el microorganismo que realiza la biodegradación) para el incremento de los microorganismos degradadores. Finalmente se optiman los parámetros operativos y se examina el destino de los contaminantes, aunado con el monitoreo y verificación estadística de la eficiencia de tratamiento.

El costo fluctúa entre \$35 y \$125 USD por tonelada de suelo. Actualmente depende del tipo y extensión del contaminante, las condiciones del suelo a remediar y los niveles de remediación que podrían ser alcanzados.

Desarrollo de microorganismos nativos capaces de degradar petróleo

Los microorganismos que son capaces de degradar hidrocarburos pueden ser adaptados con mucha facilidad en el suelo contaminado. Esta tecnología se basa en proporcionar condiciones óptimas para el desarrollo de microorganismos nativos capaces de oxidar petróleo. Incluye la adición de fertilizantes con nitrógeno y fósforo, aumentar la aireación y otros recursos. Los microorganismos más activos han sido identificado como bacterias del género *Acinetobacter*, *Alcaligenes* y *Pseudomonas* (Koronelli, 1996).

Una variante de esta tecnología incluye la excavación del sitio contaminado y su traslado a biopilas donde se llevará a cabo el proceso de biorremediación (**técnica ex-situ**).

Técnicas de biorremediación

Las técnicas de biorremediación a tratar son las siguientes:

Técnica de aspersión de aire

Es un proceso "in-situ" para tratar compuestos orgánicos volátiles y compuestos degradables de manera aerobia. Las sustancias sensibles a este tratamiento incluyen benceno, tolueno, etilbenceno, xileno, hidrocarburos de gasolina, pentacloroetileno, tricloroetileno y compuestos que se degradan en presencia del oxígeno como alcohol isopropílico, metanol, acetona, fenoles y diesel. La capa de suelo contaminado no deberá de exceder más de 10 a 15 cm (5 pulgadas) de espesor en la zona saturada para que la técnica sea efectiva.

La técnica de aspersión de aire crea una región rica en oxígeno que produce porosidad en la zona saturada. Esta zona facilita la volatilización directa de contaminantes del suelo. También mejora la mezcla en la zona contaminada, incrementando el transporte de contaminantes del suelo y aumenta la biodegradación aerobia. Esta técnica se realiza junto con la extracción de vapor del suelo. El sistema reduce los niveles de contaminación entre un 90 y 99% con un tiempo de 6 a 12 meses de operación.

Técnica de biofiltración

Los biofiltros constituyen un método efectivo, barato y ambientalmente seguro para eliminar compuestos orgánicos volátiles, olores y gases inorgánicos de algunas industrias incluyendo plantas para el tratamiento de aguas residuales, refinerías, almacenes de combustibles y fabricación de composta, además facilitan el tratamiento de desechos.

La biofiltración se utiliza para tratar hidrocarburos y emisiones de compuestos orgánicos volátiles y se usa en suelos contaminados provenientes de gasolineras.

Descripción: Una corriente de aire contaminado es bombeado dentro de la red de tubos perforados por un suelo poroso de un biofiltro que contiene una capa de suelo o composta o bien una mezcla de ambos. El aire fluye uniformemente y asciende a través de una capa de suelo, en donde las bacterias y hongos presentes oxidan y degradan los contaminantes a bióxido de carbono, la oxidación se verifica continuamente de acuerdo a la capacidad de adsorción del biofiltro.

Entre las ventajas de los biofiltros se encuentran que no son tóxicos, ni inflamables y no crean contaminantes secundarios. En cuanto a su eficiencia de remoción, se encuentra en el 99.99% de gases fácilmente oxidables tales como cetonas, ácidos orgánicos, aminas y compuestos orgánicos sulfonados. Remueven aproximadamente el 99% de gases inorgánicos tales como NH_3 , NO_x y H_2S así como el 90% de gases como metano, propano y monóxido de carbono.

Este tipo de técnica no es efectiva para hidrocarburos halogenados y generalmente el volumen en un biofiltro requerido es mayor que el de un incinerador.

Costo: La biofiltración es uno de los métodos más económicos. El intervalo del costo de instalación va de 5 a 20 dólares americanos por $7.21\text{E}^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ (pie cúbico estándar por minuto) de desecho gaseoso incluyendo diseño, distribución de la red de tubos, sistemas de ventilación y preparación de las capas.

Un biofiltro móvil puede alquilarse hasta por 2,000 dólares americanos mensuales, incluyendo los fuelles e instalación.

A continuación, debido a la importancia que representa para el trabajo la técnica de tratamiento denominada bioventilación, se dará una explicación más amplia de la misma.

Cabe señalar que este tipo de biorremediación aerobio contiene principios que serán de gran utilidad para explicar la conceptualización realizada relativa al reactor experimental para el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos.

Bioventilación

Es un técnica de remediación “in-situ”, que puede ser aplicada a grandes extensiones de suelos contaminados. Sin embargo debido a lo extenso de las superficies a ser tratadas, las variables involucradas en el proceso no son fáciles de controlar.

Una variable importante es el oxígeno. La falta de este elemento en los sitios contaminados constituye una limitante para el crecimiento microbiano y, consecuentemente, para la velocidad de biodegradación aerobia. Los sistemas de bioventilación tratan los contaminantes principalmente en la zona insaturada del suelo. Para ello es necesario construir pozos conectados a bombas y fuelles que crean el vacío en el suelo e introducir aire atmosférico por medio de succión.

Este tipo de procedimiento no puede aplicarse de igual manera a todas las superficies contaminadas, ya que cada sitio tiene características diferentes a los demás, lo que implica un estudio previo del sitio contaminado.

Dicha actividad requiere el traslado del equipo apropiado hasta el lugar a tratar, lo cual a su vez repercute en el costo para elaborar la propuesta de solución. Además debe considerarse que en algunas zonas dañadas por hidrocarburos la geografía del sitio no permite el fácil acceso.

Entre las ventajas de este tipo de sistema se pueden listar las siguientes:

- Es fácil de trasladar al lugar donde se quiera operar.
- Permite estimar tiempos y variables de operación determinantes para llevar a cabo la biorremediación del suelo. El procedimiento empleado controla variables de interés como son el suministro de aire, adición de nutrientes y recolección de compuestos volátiles (Leahy y Erickson, 1995).

Cabe señalar que los factores que determinan la relación entre la biodegradación y la volatilización del contaminante son:

- Volatilidad y solubilidad del contaminante.
- Velocidad del flujo presión/vacío.
- Tiempo de residencia en el suelo.
- Velocidad de biodegradación intrínseca del contaminante.
- Factores que aumentan la velocidad de biodegradación (oxígeno, nutrientes, pH, tipo de microorganismos depuradores, etc).
- El análisis de factibilidad técnica para el tratamiento biológico de suelos contaminados por hidrocarburos preferentemente debe estar reportado en estudios previos realizados a nivel de laboratorio. Cabe señalar que si bien un posible éxito o fracaso a este nivel de trabajo no constituye una respuesta contundente del camino a seguir, sí aportan información valiosa para el entendimiento del problema que se está abordando y, consecuentemente, en la generación de soluciones viables.
- La humedad excesiva del suelo disminuye la permeabilidad y porosidad del mismo lo que reduce la velocidad de biodegradación.

La bioventilación ha probado ser una tecnología económica y eficiente para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos del petróleo. Su aplicación más extendida es en los suelos de uso industrial; sin embargo, puede tratarse cualquier tipo de contaminante sujeto a biodegradación aerobia.

Existen en la literatura reportes sobre estudios de biodegradación a nivel de laboratorio y pruebas de campo para suelos contaminados con petróleo crudo, tolueno, fenol, cetona, etilbenceno, xileno, gasolina, diesel y aceites, entre otros (Rathfelder et al., 1995).

II.5 Selección de técnicas de remediación

Para la selección de las técnicas de remediación a emplear es fundamental considerar los siguientes puntos:

- **Naturaleza del contaminante.** Deben considerarse sus propiedades fisicoquímicas para el planteamiento de estrategia de solución.
- **Propiedades edafológicas.** Se requiere de una permeabilidad de 10^{-9} cm² y es recomendable contar con una profundidad de entre 92 a 122 cm, a efecto de poder construir los puntos de ventilación y con ello lograr una buena remediación del sitio.
- **Microbiología del sitio.** Generalmente el suelo contiene cantidades adecuadas de microorganismos, los cuales sólo llegan a ser insuficientes en suelos muy contaminados o extremadamente secos lo cual determina la importancia de proporcionar las condiciones adecuadas. Por otra parte, en caso de requerirse la adición de nutrimentos, deberá hacerse por percolación.
- **Legislación ambiental.** Los avances logrados en México a este respecto resultan insuficientes por lo que no hay un criterio uniforme que sirva de guía (Albert et al., 1995).

Costo. Tiene un costo menor, con respecto a los sistemas de ventilación del suelo tradicionales, dado que necesita menor equipo. El aire residual no requiere de tratamiento antes de su descarga, asimismo las bombas y fuelles empleadas son de menor tamaño. El costo total para la biorremediación de suelos contaminados con diesel se ha estimado entre \$10 a 50 por 0.7643 m³ (Rathfelder et al., 1995).

Para la evaluación del sitio y el estudio de la factibilidad de aplicación de esta técnica de remediación, se recomienda considerar las siguientes pruebas (Albert et al., 1995; Alexander et al., 1981):

- **Medición de gases en suelo.** El análisis de gases en el suelo es realizado para determinar si existe limitante de oxígeno, así como el nivel y tipo de contaminantes existentes. El gas del suelo es recolectado para evaluar la concentración del oxígeno y bióxido de carbono presentes, lo cual permitirá determinar la posibilidad de utilizar la bioventilación.

- **Prueba de permeabilidad del suelo.** Se realiza para determinar cuánto aire puede ser inyectado y a qué velocidad puede airearse el suelo. La prueba consta de inyección/recuperación del aire y monitoreo de los cambios de presión en el subsuelo a cortas distancias del sitio de inyección.

Los datos obtenidos son analizados para calcular la permeabilidad del gas en el suelo. Aquellos que presentan una permeabilidad adecuada son los que se consideran como candidatos a la aplicación de esta técnica.

- **Respirometría "in-situ".** Se determina la velocidad de biodegradación en suelos contaminados y se compara con la cinética de respiración en un sitio sin contaminar. La realización de estas pruebas consiste en airear el suelo por un período de 24 horas, realizar la cuantificación de las concentraciones de oxígeno y bióxido de carbono en los gases del suelo, al terminar la inyección del aire. La velocidad de consumo es traducida a degradación de hidrocarburos, la cual puede ser usada para estimar el tiempo que se requerirá para lograr la *remediación del suelo contaminado*.

- **Realización de estudios a escala piloto y a escala real.** Se requieren efectuar pruebas piloto antes de *implantar esta técnica de remediación a gran escala* lo que permite evaluar el comportamiento del contaminante, las características del sitio y realizar un estimado de costos y tiempos de depuración.

II.6 Costos de aplicación de las técnicas

Los métodos mencionados anteriormente son los más empleados a nivel mundial y representan una alternativa para ser usados en el territorio nacional, considerando para ello las características de tipo climático, hídricas, geológicas, etc.

Los costos aproximados (DOD Environmental Technology Transfer Committee 1994), asociados a la aplicación de los diferentes tipos de tratamientos de suelos contaminados con hidrocarburos, pueden observarse en la tabla II-2.

Una vez concluido el contexto sobre la problemática de suelos contaminados con hidrocarburos y sus posibles alternativas de remediación, se proporcionarán en el siguiente capítulo, los objetivos y la estrategia de trabajo planteada para su consecución.

TABLA II-2. Tipo de tratamiento de suelo y costo asociado a la depuración del mismo (DOD Environmental Technology Transfer Committee 1994)

TRATAMIENTO	RELACIÓN COSTO ÁREA TRATADA
Bioventilación	\$ 10-70 por m ³
Lavado de suelos	\$ 120-220 por tonelada métrica.
Extracción de vapores	\$ 10-50 por m ³
Encapsulado (solidificación/estabilización)	\$ 50-80 por m ³
Deshalogenación	\$ 270 por m ³
Desorción térmica	\$ 110-330 por tonelada métrica
Extracción por solvente	\$ 110- 440 por tonelada métrica
Incineración	\$ 220-1110 por tonelada métrica
Vitrificación	\$ 770 por tonelada métrica

Nota: Los costos están sujetos a variación en función del grado de contaminación inicial y el nivel de limpieza deseado.

CAPÍTULO III. OBJETIVOS Y ESTRATEGIA DE TRABAJO

CAPÍTULO III. OBJETIVOS Y ESTRATEGIA DE TRABAJO

Considerando lo anteriormente expuesto, se plantean para el presente trabajo los siguientes:

III.1 Objetivos

Diseñar y construir un reactor experimental a escala de laboratorio para tratamiento “*ex-situ*” de suelos contaminados con hidrocarburos.

Efectuar pruebas de arranque para detectar y eliminar el posible mal funcionamiento del reactor.

Realizar pruebas preliminares del funcionamiento del reactor, empleando suelo no contaminado de *características conocidas*.

Elaborar el manual de operación del reactor.

III.2 Estrategia de trabajo

Para la realización del presente trabajo, se plantearon los puntos que se mencionan a continuación.

Primero. *Obtener la información pertinente sobre el método de remediación usado en la bioventilación, con el objeto de contar con bases teóricas y experimentales sobre la recuperación de suelo contaminado con hidrocarburos. Asimismo, ubicar el nivel de corrosividad, toxicidad y explosividad de dichos contaminantes, lo cual resulta útil para realizar una selección adecuada de los materiales y accesorios con los que se construirá el reactor.*

Segundo. *Efectuar la conceptualización del reactor experimental. A este respecto la idea principal consiste en poder proporcionar un tratamiento controlado a un determinado volumen de suelo contaminado. Dicho tratamiento estará basado en el suministro de aire y nutrientes, lo más homogéneo posible y en cantidades suficientes para favorecer el proceso de transformación. El sistema debe contemplar los accesorios necesarios para efectuar la recirculación y/o purga del exceso de aire, compuestos volátiles y gases metabólicos. También debe tomarse en cuenta la captación y reintroducción de posibles lixiviados generados por la adición excesiva de solución de nutrientes.*

El reactor deberá contar con válvulas de seguridad que permitan la operación sin riesgos del sistema. Dado que es un sistema experimental, deberá contar con puntos de muestreo ubicados estratégicamente y, en general, deberá desmontarse de manera relativamente fácil a efecto de proporcionarle una rápida limpieza en caso de requerirse.

Obviamente el material de construcción a seleccionar deberá ser de larga durabilidad y con el diseño estructural que deberá permitir entender con mayor claridad el tratamiento que se está realizando al suelo.

Tercero. Considerar en el diseño un mecanismo adecuado para el suministro de aire y nutrimentos complementarios, así como dispositivos para la recuperación de los gases y líquidos lixiviados generados durante el tratamiento.

Cuarto. Debido a que el reactor operará con presiones internas variables, como consecuencia del suministro de aire y la gasificación de los contaminantes, se hace necesario considerar un sistema de seguridad para evitar accidentes que afecten al operario y al equipo en general.

Quinto. Tipo de materiales y tamaño del reactor. Como se mencionó anteriormente, el material que se empleará para la construcción deberá ser de larga duración lo que implica ser resistente tanto al tipo de contaminantes introducidos, como a los metabolitos generados durante el proceso de tratamiento.

En cuanto al tamaño el reactor, éste deberá ser de dimensiones manejables y en lo posible, integrado en una sola pieza para facilitar su eventual transportación.

Sexto. Diseño del reactor. Una vez realizado lo anterior, se elaborarán los planos a escala del reactor correspondientes. Durante esta etapa deberán realizarse los ajustes necesarios, desde el punto de vista conceptual, conforme se vaya avanzando la construcción de los equipos, que garanticen la correcta operación del mismo (ubicación de válvulas de seguridad, recirculación, toma de muestra, purga, etc).

Séptimo. Una vez que se haya determinado la forma en la que se construirá el reactor, los accesorios que necesitará, el material del que estará construido para asegurar su buen funcionamiento, se procederá a la adquisición de los mismos y a su construcción.

Octavo. Una vez construido el reactor se efectuarán pruebas que permitan verificar el funcionamiento del sistema de alimentación; recirculación de aire y líquidos; así como la presión máxima de operación. Todo lo anterior a efecto de determinar las medidas de seguridad necesarias para el uso del reactor.

Noveno. Una vez probado todo el equipo, se realizará la simulación de su operación. Para esto se carga al reactor con suelo no contaminado. Este ensayo tiene la finalidad de conocer su comportamiento y detectar posibles fallas de operación, así como para probar el sistema de válvulas de seguridad.

Décimo. Elaborar un manual de operación en donde se especifiquen detalladamente las funciones que desempeña el reactor.

Todo lo mencionado anteriormente, se puede ver gráficamente en la Figura III-1, en la cual se muestra la secuencia de actividades a realizar.

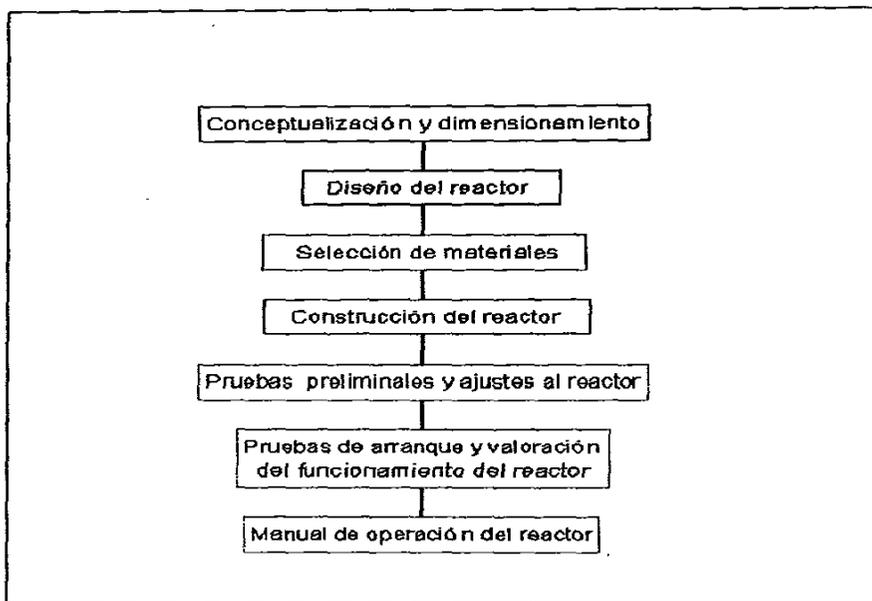


Figura III-1. Secuencia de las actividades contempladas dentro de la estrategia experimental

CAPÍTULO IV. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se presenta la información relacionada con el diseño y construcción del reactor experimental a escala de laboratorio.

IV.1 Diseño y construcción del reactor

Diseño del reactor

Para el desarrollo de esta etapa, en primer término se establecieron las dimensiones básicas del reactor fijándose en 1.26 metros de largo, 0.50 metros de ancho y 0.60 metros de alto, dando un volumen total de 0.378 m^3 , como se verá más adelante.

Para establecer las dimensiones del reactor se tomó como punto general de referencia los criterios que se mencionan a continuación:

- **Largo del reactor** . La longitud seleccionada permita un área de contacto adecuada para el suelo tratado. También se tomó en consideración que los sistemas de alimentación, así como los de recirculación tuvieran la longitud suficiente para su buen funcionamiento.

- **Alto y ancho del reactor** . Se tomó en consideración que proporcionaran el espacio suficiente para el suelo a tratar, que por lo menos se forme una capa de 20 cm de espesor y que quedara por lo menos el triple de espacio para la columna de aire, esto último para permitir la volatilización de los hidrocarburos del suelo y para soportar y controlar el incremento de presión dentro del reactor.

- **El volumen total del reactor se obtuvo del siguiente cálculo:**

$$\text{Volumen total} = (\text{largo}) \times (\text{ancho}) \times (\text{alto})$$

Para el presente caso, el volumen total aproximado del reactor es :

$$\text{Volumen total} = 1.26 \times 0.50 \times 0.60 = 0.378 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen útil de suelo} = 0.12 \times 1.26 \times 0.50 = 0.0756 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de fondo para lixiviados} = 0.10 \times 1.26 \times 0.50 = 0.063 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen colector de gases} = 0.25 \times 1.26 \times 0.50 = 0.157 \text{ m}^3$$

En la figura IV-1 se presenta el esquema que relaciona las dimensiones antes mencionadas sobre la estructura base del reactor.

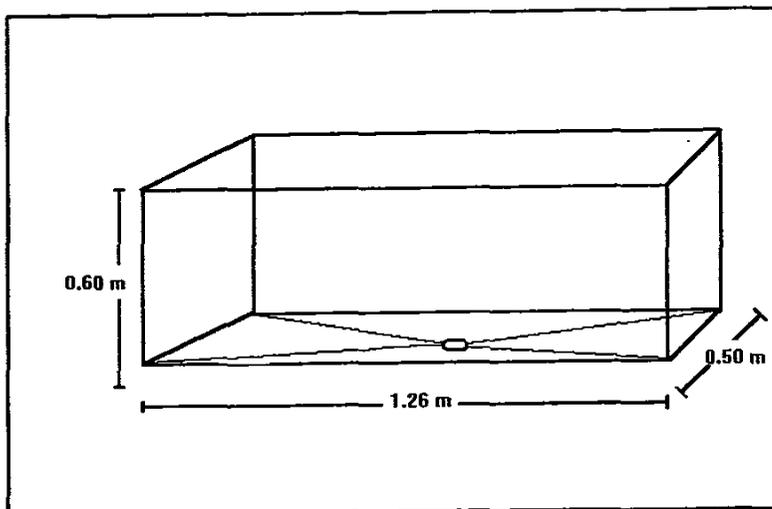


Figura IV-1. Dimensiones del reactor. Acabado en forma de diamante

Selección del material

Como siguiente paso se seleccionó el material apropiado para su construcción, para lo cual se tomó en consideración que se manejarían hidrocarburos, con concentraciones significativas de sulfuros y compuestos aromáticos entre otros, lo que propician la corrosión de los metales; en consecuencia, el material seleccionado fue acero inoxidable.

A este respecto como característica del material, se indica que las placas a utilizarse cuentan con un espesor de 3.2 milímetros (1/8 de pulgada), correspondiendo para este tipo de espesor el calibre número 12. Como principales características del material se presentan las siguientes:

Características del material empleado

- Acero inoxidable tipo 304 con la siguiente composición:

Carbón 0.08% máxima

Manganeso 2.00%

Silicio 1.00%

Cromo 18.0 a 20.0%

Níquel 8.0 a 11.0%

Fósforo 0.04% máxima

Azufre 0.04

Resistencia a la corrosión y altas temperaturas: mayor factor de seguridad que los tipos 410-416-420 y 440. Ácidos minerales y soluciones de sus sales. Prácticamente todos los ácidos orgánicos. Temperatura máxima de trabajo: 870°C.

Forjabilidad: Regular a buena, empezar a forjar entre 1100-1200°C no terminar por debajo de 930°C. Enfriar al aire.

Facilidad de maquinado: Difícil.

Soldabilidad: Muy buena.

Tratamiento térmico necesario para obtener los mejores propiedades mecánicas máxima resistencia a la corrosión: estos tipos de acero inoxidable no adquieren dureza por tratamiento térmico. Se endurecen mediante el trabajo mecánico en frío.

Recocido necesario para piezas soldadas o forjadas: calentar entre 1050 a 1150°C y enfriar en agua para obtener la máxima resistencia a la corrosión y facilidad de trabajo mecánico.

Las ventajas que este material ofrece son: alta resistencia a la corrosión, durabilidad, resistencia a ciertas presiones de aire (la cual provendrá de la alimentación que se suministrará al reactor) que están en función del espesor de la placa seleccionada, lo cual evitará la deformación del reactor.

Algunas consideraciones importantes para el diseño

El suministro de aire, o de algún otro gas como oxígeno y nitrógeno, resulta importante para que las bacterias degraden los hidrocarburos presentes como contaminantes en el suelo.

Conforme se va suministrando la cantidad de nutrientes en agua al reactor, se puede iniciar una acumulación y, por lo tanto, se presenta el problema de una posible lixiviación. Por tal motivo el fondo se diseñó en forma de diamante. De esta manera se asegura que el fondo coleccionará el exceso que pudiera llegar a acumularse.

Para el posterior manejo de los lixiviados, se contempla un sistema de recirculación el cual permitirá reintroducirlos al reactor previo paso por el tanque acumulador y con ello procurar su biodegradación.

Para efectos de evitar fugas de gases y realizar un adecuado balance de materia, el reactor contará con una tapa, la cual también tiene un acabado de diamante, con las siguientes dimensiones: a lo largo 1.26 m, 0.50 m de ancho y 0.10 m de alto. El propósito de este tipo de acabado radica fundamentalmente en el de coleccionar los gases que se desprenden del suelo contaminado, como por ejemplo el dióxido de carbono y gases de los hidrocarburos que se están volatilizand así como la de los gases del aire que no reaccionaron. Este tipo de gases serán recirculados al mismo suelo previo paso por el tanque acumulador o podrán ser extraídos del reactor para realizar algún análisis fisicoquímico, o bien, como purga del mismo.

En la figura IV-2 se representa la forma y las dimensiones de la tapa del reactor.

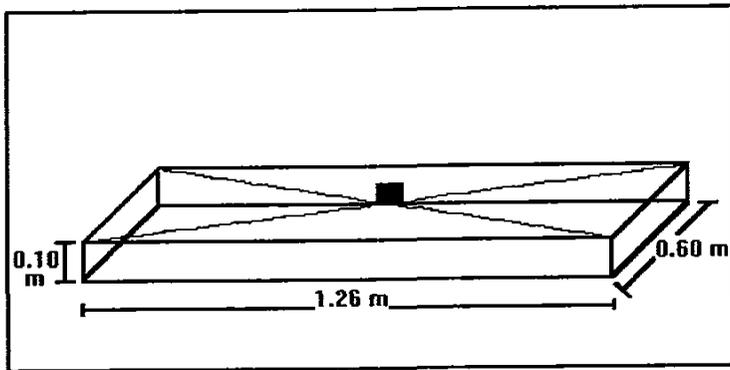


Figura IV-2. Dimensiones de la tapa del reactor con acabado en forma de diamante

Sistema de alimentación de líquidos

El sistema de alimentación es un dispositivo que consta de un tanque acumulador, con una capacidad de 4 litros, el cual contiene en su interior un filtro de malla que está ubicado en la parte superior para evitar algún tipo de basura se deposite en el fondo del tanque.

Este depósito cuenta en la parte superior con una tapa que puede ser quitada al retirar los 4 tornillos que lo fijan a éste. Al tanque acumulador se le acondicionaron 3 conexiones.

La primera conexión, que está ubicada en la parte superior del tanque, es de 12.7 milímetros (½ pulgada) de diámetro fabricada en bronce y su principal finalidad es la de recuperar los lixiviados del fondo del reactor y recircularlos al tanque acumulador. Esto se hace por medio de una bomba que se encuentra conectada a una válvula de bola de acero inoxidable que esta en el fondo del reactor en la parte exterior.

La segunda conexión, que está en la parte inferior del tanque acumulador, es de 12.7 milímetros (½ pulgada) de diámetro fabricada en bronce y tiene como principal función la de alimentar a la bomba, que al ser accionada manda del depósito el líquido al sistema de alimentación, que como se mencionó anteriormente es el encargado de la irrigación dentro del reactor.

La tercera conexión que está en la parte baja del tanque acumulador, es de 6.3 milímetros (¼ de pulgada) de diámetro fabricada en acero inoxidable. Su principal objetivo es el de recibir los gases de recirculación del reactor y como el depósito contiene líquido, estos gases podrán ser absorbidos y por lo tanto biodegradados.

La figura IV-3 representa el sistema antes mencionado.

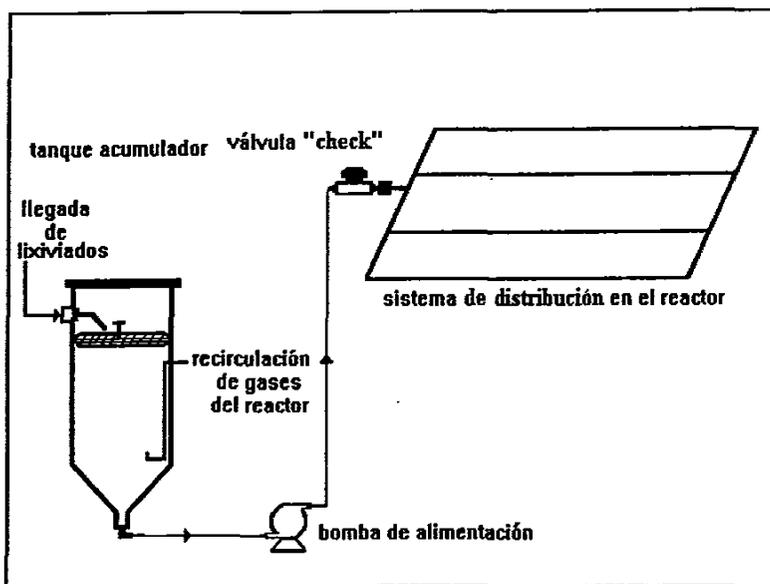


Figura IV-3. Sistema de alimentación de líquidos

Sistema de recirculación de líquidos

Como se mencionó con anterioridad, el reactor cuenta con un fondo para coleccionar el líquido excedente resultado de la adición de la solución de nutrientes. Dicho líquido puede ser reintroducido al reactor para mantener la humedad requerida.

Para tal efecto el sistema consta de un tanque acumulador con una válvula de acero inoxidable. Para evitar el paso de las partículas de suelo, se le incorporó un filtro a base de malla metálica y una conexión de 6.3 milímetros (¼ de pulgada) de diámetro de bronce, la cual es desmontable para el mantenimiento del tanque. El recipiente colector cuenta en el fondo con una salida de 9.5 milímetros (3/8 de pulgada) de bronce; ésta conecta a una bomba de refluo que se encarga de mandar de nueva cuenta el líquido al sistema de riego con el que cuenta el reactor, el cual es un sistema de cuatro tubos de acero inoxidable de 6.3 milímetros (¼ de pulgada) de diámetro y perforados a 1.6 milímetros (1/16 de pulgada). Esto es con el fin de lograr que la presión en el reactor sea la adecuada y homogénea, ya que éste contiene la tierra contaminada con el hidrocarburo.

La figura IV-4 representa el sistema de recirculación de líquidos.

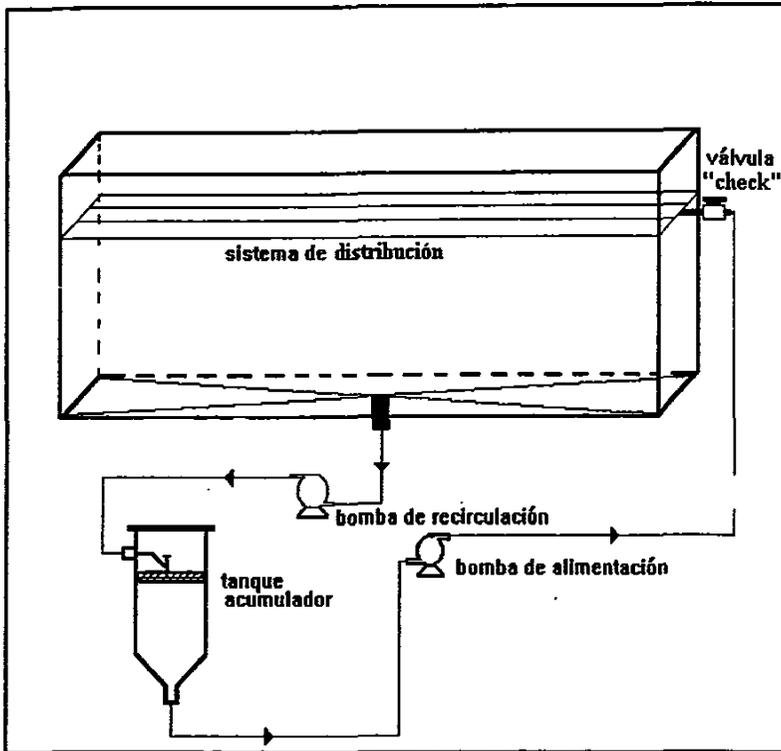


Figura IV-4. Sistema de recirculación de líquidos

Sistema de alimentación de aire

Este sistema está basado en un cilindro que contiene aire a presión, con un "rotámetro" el cual es el encargado del suministro medido de aire de alimentación que va hacia el reactor. mediante una manguera de 6.3 milímetros ($\frac{1}{4}$ de pulgada) de diámetro interno, reforzada con malla de nylon (Figura IV-5).

Se conecta al reactor por medio de una válvula de bola de acero inoxidable; este aditamento es el responsable del paso o corte del suministro de la alimentación. En la parte interior del sistema se encuentra la tubería de alimentación, que consiste en cuatro tubos de 6.3 milímetros ($\frac{1}{4}$ de pulgada) de diámetro y perforados a 1.6 milímetros ($\frac{1}{16}$ de pulgada) cada 10 cm entre ellos que abarcan todo lo largo y ancho del reactor.

La idea principal de este sistema es la de garantizar que la alimentación del aire al equipo sea de la manera más homogénea posible.

Este implemento se conecta al resto del equipo por medio de un cople unión de 12.7 a 6.3 milímetros ($\frac{1}{2}$ a $\frac{1}{4}$ de pulgada), fabricado en bronce.

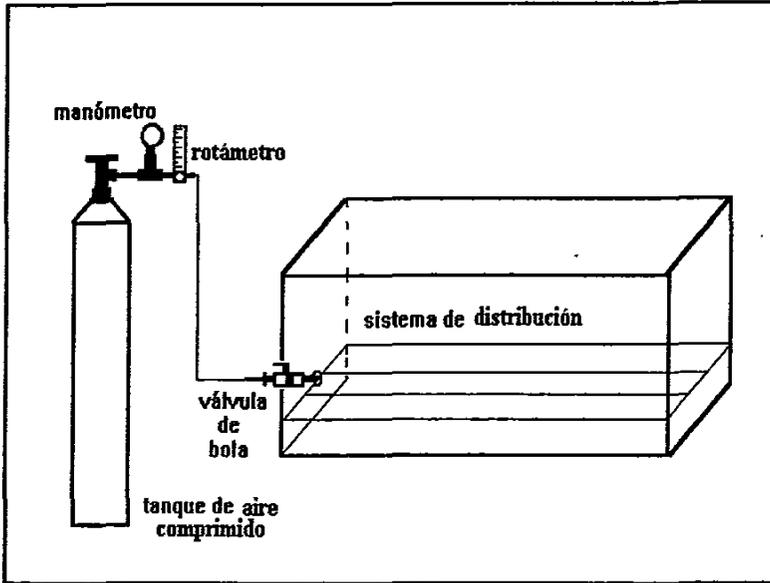


Figura IV-5. Sistema de alimentación de aire

Sistema de recirculación de aire

En este punto, como se mencionó anteriormente, el reactor fue diseñado para soportar la presión de alimentación de aire superior a 15686 Pascales (160 gf/cm^2 presión manométrica). Lo anterior implica que el reactor deberá ser construido de forma tal que al suministrarle la máxima presión de trabajo preestablecida, no presente fugas.

Para ello al reactor se le colocó un empaque de neopreno de 6.3 milímetros ($\frac{1}{4}$ de pulgada) de espesor, que mantiene el reactor sellado. Esto se hace con el fin de evitar posibles fugas de hidrocarburos, ya que estos propician una atmósfera explosiva y tóxica para las personas que lo operan o están cercanas a éste.

Una vez que el reactor no presentó fugas, se dio inicio a la construcción del sistema de recirculación de aire. Para este aspecto operativo, se realizaron las siguientes actividades:

En el sistema de recirculación de aire, primeramente se seleccionó como material de construcción tubo de 6.3 milímetros ($\frac{1}{4}$ de pulgada) de diámetro en acero inoxidable. Esto por lo explicado en lo referente a las características de los suelos que se manejarán. A este tubo se le da la forma de un serpentín que abarca todo el ancho y largo del reactor. Además a dicho dispositivo se le perfora a 1.6 milímetros ($\frac{1}{16}$ de pulgada) cada 10 cm de distancia y con ello se asegura que la redistribución de los gases sea lo más homogénea posible dentro del reactor. Este sistema se acopla al reactor mediante una tuerca unión de 12.7 milímetros ($\frac{1}{2}$ pulgada) fabricada en bronce.

En sí, el propósito en general, es que el sistema suministre en forma homogénea el aire que se recircula en todo el reactor, y que permita la recirculación de los gases desorbidos y el aire excedente. Como el reactor contiene una tapa colectora con forma con acabado tipo diamante, se logra una mejor acumulación de los gases en la parte superior.

Para la recirculación de los gases acumulados, se emplea un compresor, debido a que como el reactor los contiene a la misma presión de suministro, las presiones se igualan y, por lo tanto, los gases no podrían ser recirculados si no es mediante el compresor.

Para la recirculación se construyó un serpentín que abarca lo largo y lo ancho del reactor. Este aditamento como se mencionó anteriormente está fabricado en acero inoxidable de 6.3 milímetros ($\frac{1}{4}$ de pulgada) de diámetro y perforado a 1.6 milímetros ($\frac{1}{16}$ de pulgada) de diámetro a cada 10 cm de separación. El propósito del serpentín es mezclar y recircular los gases lo más homogéneamente posible.

Por otra parte, para evitar que la presión a la que está sometido el reactor afecte la eficiencia del compresor, se colocó una válvula “check” para evitar que la presión regrese al compresor y afecte al sistema. Además de asegurar que la circulación de los gases sea en el sentido correcto y deseado.

La figura IV-6 representa el sistema antes mencionado.

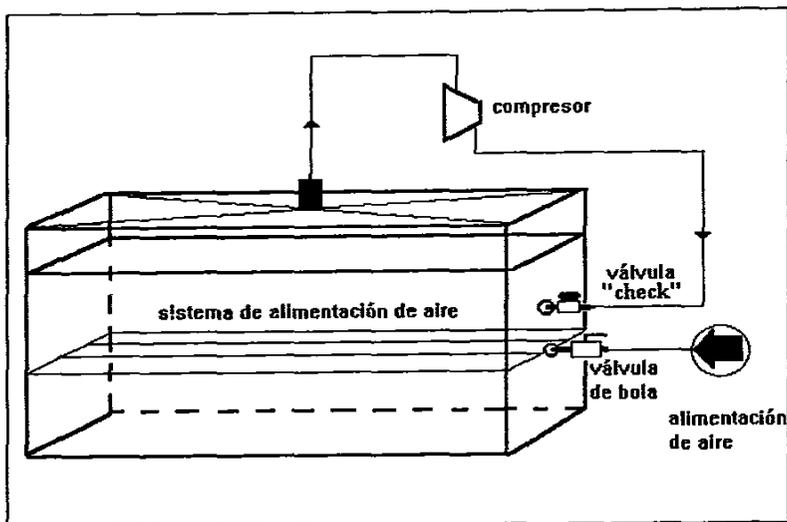


Figura IV-6. Sistema recirculación de aire

Por último, este sistema también cuenta con los medios apropiados de seguridad, como lo son: la válvula de seguridad que se encuentra en la parte superior al reactor, pero además, junto a este dispositivo se colocó un "manómetro" que permite ir conociendo cómo está aumentando la presión de carga dentro del reactor.

Estos aditamentos permiten proteger tanto al equipo como al operador, ya que se están manejando presiones que pueden representar un riesgo de operación (ver manual de operación, Anexo 2).

Sistema para toma de muestras de gases

Este sistema se diseñó para poder evaluar el grado de degradación del hidrocarburo a diferentes tiempos, lo cual puede conocerse por medio del dióxido de carbono generado y el oxígeno consumido.

Una de las funciones que cumple el reactor es la de reducir las concentraciones o, en un momento dado, en vez de obtener compuestos volátiles, lograr que los gases de los hidrocarburos se degraden a dióxido de carbono, ya que como es sabido en bajas concentraciones no afectan sensiblemente a la atmósfera ni contamina el ambiente.

Por ello es que la toma de muestras se incluyó en el sistema de recirculación del compresor y para no afectarlo, se le colocó una válvula de 4 vías, la cual al girar de posición desvía la corriente de recirculación a otra tubería. En este punto es donde se puede obtener la muestra de gas para posteriormente realizar el análisis de su composición.

La figura IV-7 representa el sistema para toma de muestras.

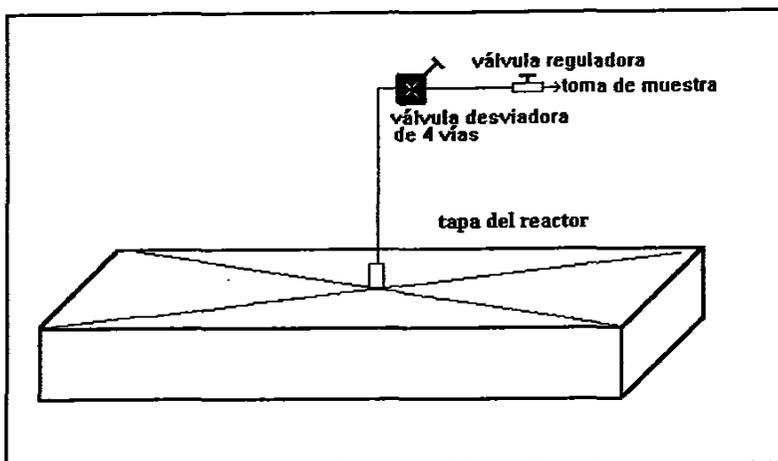


Figura IV-7. Sistema para toma de muestras

Sistema de recirculación de gases al tanque acumulador

Una vez que ha sido colocado el suelo en el reactor, éste procederá a tratarlo, pero podrá suscitarse el caso en que se produzca un lixiviado que caerá en el fondo. Otro caso también a mencionar es cuando la biodegradación de los gases de hidrocarburos no han sido totalmente terminada.

Esto implica un serio problema, debido a que se necesita de alguna manera eliminar estos excedentes. Para ello se implementó el sistema de biodegradación por absorción. Este equipo se trata de un tanque fabricado en acero inoxidable, y con una serie de conexiones que permiten que pasen por el gas de recirculación, los lixiviados del fondo del reactor.

Quando se han obtenido lixiviados en el fondo, se acciona la válvula de bola que se encuentra en la parte inferior del reactor y se acciona la bomba de recirculación, la cual llevará el residuo antes mencionado al tanque el cual contiene bacterias que se encargarán de la biodegradación.

Para el caso que se tengan gases con vestigios de hidrocarburos volatilizados y se desee biodegradarlos, por medio de la válvula de desvío y reguladora, el gas pasará por la parte inferior del tanque.

Las bacterias que se encuentren en el tanque lo absorberán y por lo tanto lo biodegradarán. Con ello se evitará que este tipo de gases sean venteados a la atmósfera ocasionando daños de severas consecuencias.

La figura IV-8 representa el sistema antes mencionado.

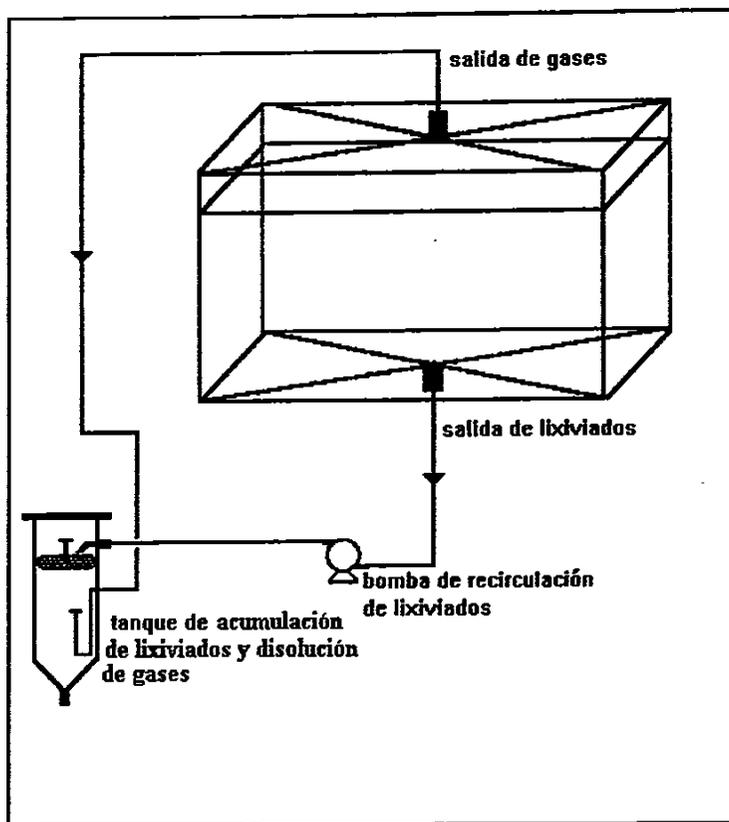


Figura IV-8. Sistema de recirculación de gases al tanque acumulador

Sistema de filtración de líquidos

Este sistema se diseñó principalmente pensando en que las tuberías que suministran el aire de alimentación y el de recirculación puedan ser tapadas por la tierra contaminada, ya que estos sistemas se encuentran precisamente por debajo del suelo contaminado, para ello se procedió a construir un sistema de cuatro charolas con una malla de poro cerrado, hechas en acero inoxidable y que además son fácilmente desmontables, con la finalidad de que en caso de ser necesario dar mantenimiento al reactor, estos filtros puedan quitarse sin ningún problema por el operador del equipo.

El esquema de la figura IV-9 representa el sistema de filtración.

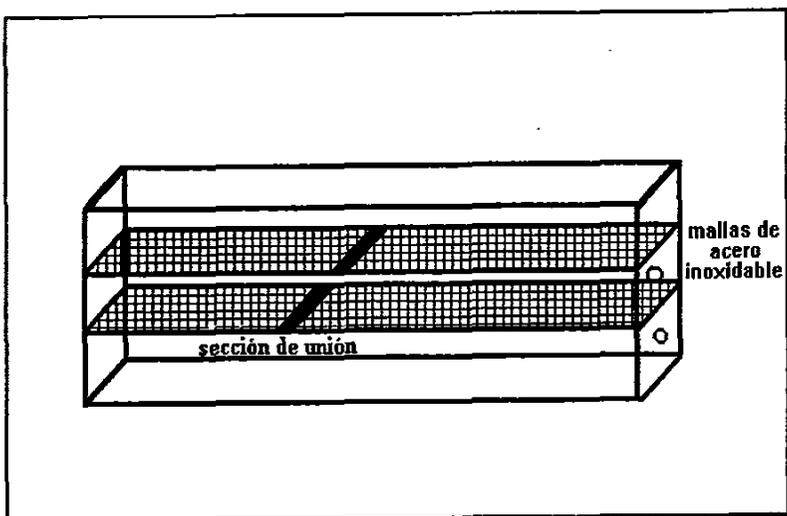


Figura IV-9. Sistema de filtración de líquidos

Sistema de medición de flujos

Por otra parte se realizó el diseño y acoplamiento de los sistemas de medición de flujo al reactor, a efecto de conocer el volumen de entrada y de salida del aire de alimentación del reactor y con ello de elaborar el balance de materia correspondiente.

El sistema de medición consta principalmente de dos medidores de flujo de aire tipo "rotámetros", que miden directamente los gastos en $m^3/hora$.

Las ventajas que ofrecen estos sistemas de medición es que para los gases tienen un alto grado de eficiencia con relación a las lecturas de gastos. Además, este tipo de accesorio se adapta perfectamente al reactor.

Los "rotámetros" fueron colocados de la manera siguiente:

El primer "rotámetro" se colocó en la entrada de alimentación del reactor, con la finalidad de medir la cantidad de aire suministrado.

El segundo "rotámetro" fue colocado a la salida del compresor de recirculación de gas. Tiene como finalidad, de medir la cantidad de gases que se recirculan al reactor.

La figura IV-10. representa el sistema de medición de flujos.

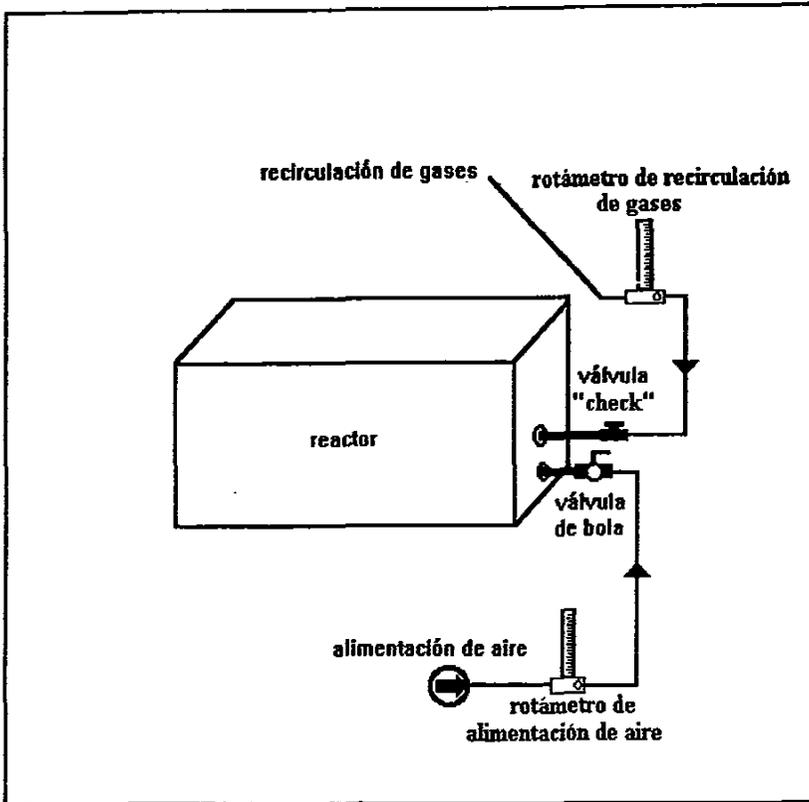


Figura IV-10. Sistema de medición de flujos

Sistema de seguridad

Como ya se ha mencionado, se requiere que el reactor opere sin fugas, dado que esto implica un riesgo para el operador. Para ello se diseñaron los accesorios necesarios para garantizar la seguridad del operador los cuales consisten en lo siguiente:

Para garantizar que el reactor no presente fugas, se colocaron alrededor de la tapa cuatro broches conocidos como "de rosca". Estos broches tienen la ventaja de ser muy resistentes y sobre todo permiten sellar con mayor fuerza al reactor. Estos broches usan tuercas de 10.1 milímetros (3/8 de pulgada) que pueden ser ajustados con una llave "española" o con una llave de "estrias".

Lo anterior le confiere la ventaja de que en caso de existir alguna fuga en cualquier parte del reactor, pueda detenerse mediante el ajuste de la tuerca apropiada.

Adicionalmente, se acondicionaron tres broches más de seguridad, a los que en este caso se les ha denominado "rápidos". Estos broches ofrecen una seguridad extra, ya que en caso de fallar alguno de los broches "de rosca" antes mencionados, estos mantendrán la seguridad operativa del reactor.

Como el reactor tenderá a ser cargado por medio del suministro de alimentación de aire, esto quiere decir que se estará sometiendo a una presión que puede ir aumentando, y si este incremento continúa el equipo puede sufrir un deterioro sobre todo en lo estructural.

Para conocer cuál es la presión máxima de operación sin que éste llegue a sufrir algún daño de consecuencia, se implementó la realización de la prueba hidrostática que se mencionará posteriormente.

Una vez que se ha hecho esta prueba se sabrá cuál es la presión máxima de operación del reactor antes que empiece a sufrir deformaciones, y estableciendo como medida de precaución para el operario, que por ningún motivo se deberá de exceder esta presión. Para ello se coloca en la parte superior del reactor, un manómetro y una válvula de seguridad. Estos accesorios tienen como finalidad la operación segura del reactor.

Para ello se enuncian los siguientes pasos a seguir.

- 1). El operador deberá observar en el manómetro el incremento gradual de presión conforme se está cargando el reactor, al estarse suministrando aire.
- 2). Cuando la presión empiece a superar el límite establecido en la válvula de seguridad, previamente calibrada, deberá abrirse permitiendo el desfogue del reactor.

Esto se utiliza sobre todo si existe falla y no se activa. Es importante mencionar que en caso de no accionarse automáticamente dicha válvula, existe un dispositivo que permite su accionamiento.

Todo lo descrito anteriormente se representa por el diagrama de la figura IV-11.

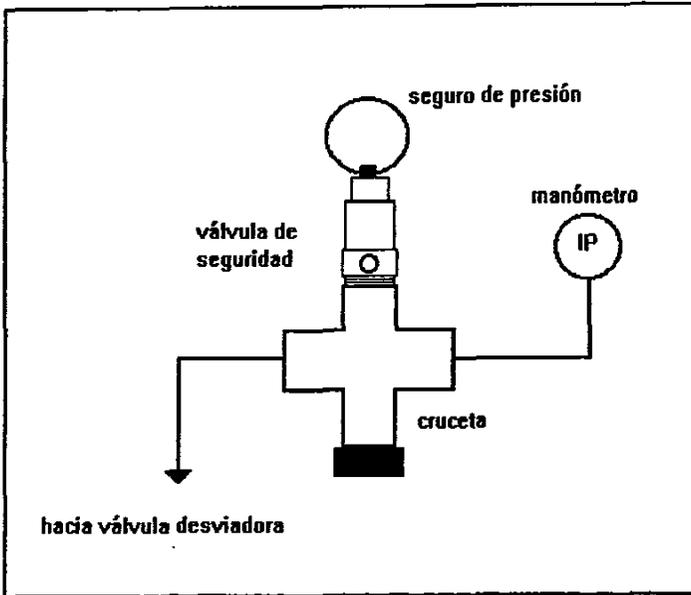


Figura IV-11. Sistema de seguridad de exceso de presión

Simbología, relación de equipos y materiales

Todos los sistemas descritos anteriormente, solo son una parte en si de todo el equipo que se necesita para la construcción del reactor. Para ello es necesario que ahora todos estos aditamentos se integren para conformar lo que será el reactor. Para ilustrar todo lo mencionado se presenta primeramente la simbología que representa a cada uno de los accesorios utilizados, una lista de equipo que menciona las características de cada uno de los accesorios empleados.

En la tabla IV-1 se presenta la simbología empleada.

En la tabla IV-2, se presenta una lista de materiales. Dicha lista permitirá efectuar, en caso de requerirse, reparaciones parciales en el reactor, ya que se encuentran especificadas características particulares de cada pieza.

Tabla IV-1. Simbología utilizada en el diagrama de flujo del reactor

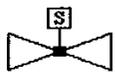
	COMPRESOR
	VÁLVULA DE VENTEO
	MANÓMETRO
	VÁLVULA REGULADORA
	VÁLVULA DE 4 VÍAS
	VÁLVULA TIPO "CHECK"
	ROTÁMETRO
	BOMBA
	VÁLVULA SOLENOIDE
	VÁLVULA DE BOLA CON MANERAL

Tabla IV-2. Relación de equipos y materiales

Partida	Descripción	cantidad
1	Válvula desviadora de 3 vías, de 6.3 milímetros (¼ de pulgada) de diámetro, cuerda interna, fabricada en bronce	1
2	Cruceta cuerda interna de 6.3 milímetros (¼ de pulgada) de diámetro, fabricada en bronce	1
3	Válvula de seguridad accionada por resorte y anillo, de 6.3 milímetros (¼ de pulgada) de diámetro cuerda externa, fabricada en bronce	1
4	Manómetro con carátula de reloj, de 6.3 milímetros (¼ de pulgada) de diámetro cuerda externa. Marca Metro, escala de 0-2 kgf/cm ² de presión	1
5	Niples largos cuerda externa de 6.3 milímetros (¼ de pulgada) diámetro, fabricados de bronce	2
6	Codo de 90° de 6.3 a 6.3 milímetros (¼ de pulgada a ¼ de pulgada) cuerda interna fabricados en bronce	1
7	Niple de 12.7 milímetros (½ pulgada) cuerda externa a (¼ de pulgada) cuerda externa, fabricado en bronce	1
8	Válvula tipo "check" flujo vertical con cierre de pistón de 12.7 milímetros (½ pulgada) de diámetro cuerda interna, fabricadas en bronce	2
9	Reducciones "bushing" de 12.7 milímetros (½ pulgada) de diámetro cuerda externa a 6.3 milímetros (¼ de pulgada) de diámetro, cuerda interna, fabricadas en bronce	2
10	Codo de 90° de 6.3 milímetros (¼ de pulgada) de diámetro cuerda externa a 6.3 milímetros (¼ de pulgada) de diámetro cuerda externa, fabricado en bronce	1

Continuación tabla IV-2.1.

11	Válvula de bola de acero inoxidable con maneral, cuerda interna de 12.7 milímetros (½ pulgada) de diámetro	2
12	Reducción de 12.7 milímetros (½ pulgada) de diámetro cuerda externa a 6.3 milímetros (¼ de pulgada) de diámetro cuerda interna	1
13	Niples unión de 12.7 milímetros (½ pulgada) de diámetro cuerda externa a 12.7 milímetros (½ pulgada) de diámetro cuerda tipo "fler" fabricados en bronce	3
14	Válvulas reguladoras de manija de 6.3 milímetros (¼ de pulgada) de diámetro cuerda interna, fabricadas en bronce	2
15	Espigas para conexiones de 6.3 milímetros (¼ de pulgada) de diámetro, cuerda interna, fabricadas en bronce	10
16	Niples de 12.7 milímetros (½ pulgada) de diámetro cuerda externa a 6.3 milímetros (¼ de pulgada) de diámetro cuerda externa, fabricados en bronce	3
17	Codos de 90° reducción de 12.7 milímetros (½ pulgada) de diámetro cuerda externa con terminación 6.3 milímetros (¼ pulgada) de diámetro espiga, fabricados en bronce	3
18	Abrazaderas para manguera de 6.3 milímetros (¼ de pulgada) de diámetro, fabricadas en acero inoxidable	16
19	Manguera de 6.3 milímetros (¼ de pulgada) de diámetro especial reforzada con malla de nylon, fabricada en poliuretano	15 metros
20	"Rotámetros" con salida de 6.3 milímetros (¼ de pulgada) de diámetro cuerda externa. Para gastos de 550.7 m ³ /s (75 pies ³ /hora). fabricados en acero inoxidable	2

Continuación tabla IV-2.2.

21	Válvula solenoide con salida de 6.3 milímetros (¼ de pulgada) de diámetro, 120 volts y 1.033 E ¹⁰ Pascales (150 psia) de presión. Fabricada en acero inoxidable	1
22	Apagadores sencillos de 1 paso, sellados y prueba de chispazos. Con indicación de "encendido" y "apagado"	2
23	Tanque acumulador y tapa fabricado en acero inoxidable tipo 316, calibre 12, con 4 tornillos de 6.3 milímetros (¼ de pulgada) de diámetro, cuerda estándar cabeza hexagonal. Con salidas de 12.7 milímetros (½ pulgada) de diámetro cuerda interna y salida de tubo de 6.3 milímetros (¼ de pulgada de diámetro. Capacidad de 4 litros	1
24	Compresor con motor eléctrico marca Delco. Motor de 120 volts y 60 Hz, con capacidad de ½ C.P. Cabezal de un solo paso fabricado en hierro con polea fabricada en aluminio	1
25	Microbombas de 600 rpm, 120 volts y 60 Hz, con cabezales de plástico rígido para mangueras de 6.3 milímetros (¼ de pulgada de diámetro flexibles	2
26	Reóstatos para entradas de 120 volts de graduación de voltaje variable para microbombas, marca MasterFlex con características de 3 Ampere salida a 90 volts a bomba	2
27	Reactor fabricado con acero inoxidable calibre 12. Accesorios internos como sistemas de alimentación de aire, recirculación fabricados en tubo de acero inoxidable de 6.3 milímetros (¼ de pulgada) de diámetro. Mallas de filtración fabricadas en acero inoxidable montada sobre rieles de ángulo de 6.3 milímetros (¼ de pulgada) de espesor fabricados en el mismo material. Coples de salida del reactor fabricados en acero inoxidable con cuerdas internas de 12.7 milímetros (½ pulgada) de diámetro. Capacidad de 0.378 m ³	1

Continuación tabla IV-2.3.

28	Soporte para reactor fabricado con ángulos de fierro galvanizado de 6.3 milímetros (¼ de pulgada) de espesor	1
29	Amortiguador con doble entrada para base y tapa de reactor	1

Construcción del reactor

La construcción del reactor se llevo a cabo en un taller especializado en el manejo de acero inoxidable. Como se mencionó en el presente capítulo, las características del material no permiten un fácil manejo de éste , como en el caso de cortar, doblar y soldar. Por ello este taller cuenta con los equipos apropiados. Por mencionar algunos de ellos se encuentran la cortadora de gas plasma, que tiene como característica principal, que este equipo para cortar el acero inoxidable utiliza una mezcla de oxígeno a alta presión y corriente eléctrica de alto voltaje. Este tipo de equipos es de gran ayuda, sobre todo cuando se trata de metales tan resistentes como el empleado en este caso.

Otro de los equipos utilizados fue una “dobladora”, la cual tiene como principal finalidad la de doblar las placas de acero inoxidable sin romperlas o maltratarlas. Este equipo es de gran ayuda sobre todo en los acabados tipo “diamante” empleados en el fondo y tapa del reactor, además de doblar a 90° las esquinas de la tapa como la estructura base del equipo.

En lo referente a la “planta soldadora” se utiliza gas Argón y corriente de alto voltaje que en este caso es de 220 volts, pero con la diferencia de que se anexa una boquilla de cobre, la soldadura que también es de acero inoxidable tipo 316 para no afectar la labor de soldado de todas las “costuras” que se realizan al reactor.

Las conexiones con las que cuenta el reactor son de acero inoxidable y fueron torneadas a baja velocidad, de otra manera las piezas fabricadas saldrían rayadas y sobre todo afectadas en las cuerdas internas, que son de gran importancia ya que son necesarias para integrar el resto de los accesorios al reactor.

Una vez construido el reactor se procedió a la realización de las pruebas preliminares programadas, las cuales se describen en el siguiente inciso.

IV.2. Pruebas de funcionamiento preliminar

Para determinar si el reactor está listo para operar con suelos contaminados, primeramente deberá pasar por una serie de pruebas, las cuales determinaran su comportamiento y confiabilidad en la operación. Dichas pruebas son las siguientes:

Prueba de distribución y recirculación de líquidos

La prueba consiste en adicionar al tanque acumulador 4 litros de agua y accionar la bomba de alimentación. El propósito de esto, radica en observar si existe una irrigación de agua uniforme a lo largo de todo el reactor. Durante esta prueba se evalúa el mecanismo de recirculación de líquidos. El líquido alimentado que se infiltra a través del suelo, es colocado por la parte inferior del reactor.

Esta sección se diseñó pensando principalmente en recuperar los posibles lixiviados que se obtengan a lo largo del proceso de tratamiento de un suelo contaminado con hidrocarburos y con objeto de reintroducirlos al reactor.

Prueba hidrostática

El objetivo de esta prueba es detectar y eliminar posibles fugas. Esta prueba es importante, debido a que el reactor trabaja con hidrocarburos, muchos de los cuales son volátiles y forman atmósferas explosivas y tóxicas. Para verificar el sellado del reactor, éste se debe cerrar mediante el ajuste de los broches de la tapa. La prueba hidrostática consiste básicamente en lo siguiente:

- Se cierra el reactor y se llena completamente con agua. Una vez hecho esto, se mide con el manómetro ubicado en la parte superior de la tapa la presión máxima de operación a que puede ser sometido el reactor.
- Mediante una bomba de aire manual, se introduce aire y se registra la presión que va alcanzándose de manera gradual y cuando ésta deje de incrementarse, se establece que el valor obtenido corresponde a la presión máxima de operación.
- Con este dato se procederá a la calibración de la válvula de seguridad del reactor, mencionada anteriormente.

El la figura IV-12 se ejemplifica la prueba hidrostática efectuada al reactor.

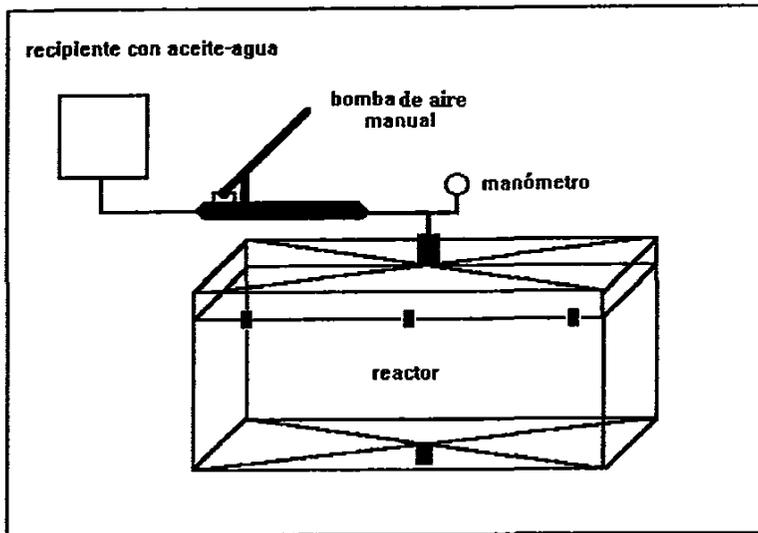


Figura IV-12. Arreglo para la realización de la prueba hidrostática

Prueba de suministro y distribución de aire

Esta prueba radica en que a este sistema de alimentación se le inyecta aire de alimentación, para lo cual el reactor estará abierto para verificar que está fluyendo por todo el sistema, el cual es de 4 tubos que abarca todo lo ancho y largo del reactor. Para asegurar que el reactor está siendo alimentado de aire, se cierra el reactor asegurándose que los broches de seguridad han sido colocados previamente. Se toma como base que la presión en el reactor tenderá a aumentar conforme pase el tiempo, lo cual podrá ser registrado por el manómetro que se encuentra en la parte superior de la tapa del reactor.

Durante este lapso se estará verificando por medio del manómetro que la presión del reactor no este variando. Al no haber cambio de presión durante este lapso, se prosiguió a esperar por 30 minutos más, la idea de esto es de dar un mayor tiempo para detectar alguna posible fuga en el reactor.

Prueba de recirculación de gases

Una vez que se ha verificado que el reactor no presente fugas de aire, se procede a valorar la recirculación de gases. La realización de esta prueba implica verificar que el compresor trabaja apropiadamente. La prueba de la recirculación de gases tiene como primer paso, suministrar aire hasta alcanzar la presión de 15686 Pascales (160 gf/cm² presión manométrica) de presión (ver manual de operación. Anexo 2), como segundo paso, se verifica en un “rotámetro” que se está recirculando un determinado gasto de gases y como tercer paso, se acciona el compresor para iniciar la recirculación (ver figura IV-6).

IV.3. Pruebas de funcionamiento experimentales con suelo no contaminado

Una vez realizadas las pruebas de funcionamiento preliminar se procede a evaluar el comportamiento del reactor empleando suelo no contaminado.

Para ello se plantea la realización de las siguientes pruebas experimentales con las siguientes etapas:

Etapas 1. Velocidad de carga de aire para el reactor sin suelo

Como primer etapa, se cierra el reactor y se le suministra aire, con la finalidad de conocer cuánto tiempo se requiere para que el reactor llegue a la presión de 15686 Pascales (160 gf/cm² presión manométrica) (ver manual de operación), en función de diferentes gastos de alimentación.

Etapas 2. Velocidad de carga de aire para el reactor con 8 kg de suelo

Incorporar al reactor suelo previamente cernido, con el propósito de lograr un tamaño de partícula homogéneo que facilite la evaluación del comportamiento del reactor. La cantidad está basada principalmente, en el volumen mínimo para formar una capa que cubra lo ancho y lo largo de las mallas filtrantes del reactor.

Posteriormente se cierra el equipo y se le suministra el aire a un determinado flujo hasta alcanzar la presión de 15686 Pascales (160 gf/cm² presión manométrica) (ver manual de operación. Anexo 2). El tiempo empleado para alcanzar la presión establecida permitirá conocer los requerimientos de operación del reactor cuando éste ha sido cargado con suelo.

Etapas 3. Velocidad de carga de aire para el reactor con 48 kg de suelo

Como tercera etapa, se aumenta la cantidad de suelo no contaminado y, bajo las mismas condiciones de operación, se procede a conocer su comportamiento.

Con lo anterior se busca conocer si existe diferencia en la respuesta del reactor con una carga de 12 cm de espesor, equivalente a 48 kg. de suelo.

Etapa 4. Velocidad de carga de aire del reactor con humedades relativas crecientes

Como etapa 4, se pretende relacionar el comportamiento que tendría el reactor con un suelo no contaminado y el aumento de la humedad en este. La prueba consiste en humedecer el suelo gradualmente hasta llegar a la saturación con agua y bajo las mismas condiciones de operación conocer el tiempo que tarda el reactor llegar a la presión estipulada (ver manual de operación o: Anexo 2). Esta prueba permitirá detectar si el reactor cuenta con un adecuado sistema de difusión de aire. Al aumentar la humedad se dificulta el paso de aire a través del suelo, debido a que se reducen los espacios porosos en el mismo lo cual se espera que ocurra en suelos contaminados con hidrocarburos. Los volúmenes a incorporar serán de 1 hasta 12 litros, adicionando periódicamente de litro en litro.

Prueba de permeabilidad de aire

Una vez formada la capa de suelo no contaminado dentro del reactor, es muy importante verificar que al estarse suministrando el aire de alimentación se esté haciendo en todo el reactor y que, además, al permearse por el suelo sea en toda la superficie. Lo anterior es necesario para garantizar un tratamiento uniforme y en su caso, la depuración homogénea del suelo.

Para observar si la difusión del aire es uniforme se colocan trozos de hielo seco sobre la superficie del suelo contenido en el reactor. Posteriormente se le incorpora aire al reactor y se observa el desplazamiento que ocurre sobre los gases generados por el hielo seco. Esta prueba permitirá inferir el patrón de distribución del aire en todo el reactor.

Prueba de humedad relativa

Como prueba final, se realizará la evaluación de la humedad relativa del suelo usado en el reactor. Este dato es de gran importancia debido a que es de gran interés conocer la capacidad de operación de todos los equipos conforme va aumentando la humedad. Los suelos contaminados con hidrocarburos contienen un determinado porcentaje de humedad, por ello, se debe simular este parámetro para conocer como se comportará el reactor ante este tipo de condiciones.

El propósito de todo este tipos de pruebas es la de establecer un comportamiento del reactor en condiciones lo más reales posibles y con ello conocer hasta donde serán sus limitaciones al momento de ser cargado con un suelo contaminado como es la idea principal.

CAPÍTULO V. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las pruebas realizadas al reactor, las cuales incluyen mediciones de presión y flujo, sin suelo y con suelo.

A continuación se presentan los resultados de las pruebas de funcionamiento preliminares las cuales se realizaron sin suelo.

V.1 Resultados de la Etapa 1

Antes de iniciar la prueba se cierra correctamente el reactor. Posteriormente se procede al suministro de aire. Se cerró el reactor revisando que los broches antes mencionados estén ajustados perfectamente para evitar una posible fuga y con ello no se pueda conocer el comportamiento real del reactor. En la realización de esta prueba no se excedió la presión máxima de operación estipulada por el reactor (ver anexo 2).

Al suministrarse el aire se mide el tiempo requerido para que el reactor llegue a la presión de 15686 Pascales (160 gf/cm^2 presión manométrica). Como parte adicional de esta prueba, se realizaron mediciones a diferentes gastos de aire y tiempos empleados para cargar el reactor a la presión de operación máxima. Los resultados se presentan en la tabla V-1, en la cual puede observarse que conforme aumenta el flujo de aire alimentado, el tiempo requerido para cargar al reactor a una determinada presión, es menor.

Nota: Los valores obtenidos en lo referente a los gastos, su unidad inicial era de Ft^3/hora , por lo cual se hace la conversión a m^3/s . Y el resto de las tablas de resultados que a continuación se presentan se les aplicó el mismo tipo de conversión.

V.2 Resultados de la Etapa 2

Esta etapa consistió en cargar el reactor con 8 kilogramos de suelo no contaminado, previamente tamizado y con una humedad relativa conocida. Una vez realizado esto, se hace variar el flujo de aire alimentado y se mide el tiempo requerido para alcanzar la presión deseada de 15686 Pascales (160 gf/cm^2 presión manométrica). Al empacarse el reactor con suelo se busca entender su comportamiento y establecer la relación entre flujo de aire y el tiempo que tarda el reactor en llegar a una presión determinada, lo cual permitirá determinar más adecuadamente algunos parámetros operativos de interés.

Los resultados obtenidos se presentan en la tabla V-2.

Tabla V-1. Relación de flujo de aire alimentado y tiempo requerido para cargar el reactor a 15686 Pa (160 gf/cm² presión manométrica) de presión, sin capa de suelo

Flujo de aire alimentado m³/s (litros/minuto)	Tiempo requerido para cargar el reactor a 15686 Pa (160 gf/ cm² presión manométrica (minutos)
78.70 (4.72)	9.30
118.0 (7.08)	7.45
157.0 (9.44)	6.00
196.4 (11.80)	4.30
236.0 (14.16)	3.30
275.0 (16.52)	2.45
314.7 (18.88)	2.25
354.0 (21.24)	2.05
393.3 (23.60)	1.50
432.7 (25.96)	1.45
472.0 (28.32)	1.35
511.3 (30.68)	1.25
550.7 (33.04)	1.20

Tabla V-2. Relación de flujo de aire alimentado y tiempo requerido para cargar el reactor a 15686 Pa (160 gf/cm² presión manométrica) de presión conteniendo una capa de 8 kilogramos de suelo

Flujo de aire alimentado m³/s (litros/minuto)	Tiempo requerido para cargar el reactor a 15686 Pa (160 gf/ cm² presión manométrica (minutos)
78.70 (4.72)	9.30
118.0 (7.08)	7.45
157.0 (9.44)	6.00
196.4 (11.80)	4.30
236.0 (14.16)	3.30
275.0 (16.52)	2.45
314.7 (18.88)	2.25
354.0 (21.24)	2.05
393.3 (23.60)	1.50
432.7 (25.96)	1.45
472.0 (28.32)	1.35
511.3 (30.68)	1.25
550.7 (33.04)	1.20

V.3 Resultados de la Etapa 3

La etapa 3, consistió en incrementar la capa de suelo a un volumen total de 48 kilogramos. Al igual que en las etapas anteriores se evaluó el tiempo requerido para alcanzar la presión establecido de 15686 Pascales (160gf/cm^2 presión manométrica). El propósito de este tipo de prueba radica en conocer si existe variación en el tiempo para cargar el reactor a la presión de trabajo preestablecida, lo cual permite conocer el comportamiento del reactor a una mayor carga de suelo y establecer el tiempo que tarda el reactor en llegar a la presión de trabajo de 15686 Pascales (160gf/cm^2 presión manométrica). Los resultados se muestran en la tabla V-3.

Tabla V-3. Relación de flujo de aire alimentado y tiempo requerido para cargar el reactor a 15686 Pa (160 gf/cm^2 presión manométrica) de presión empleando 48 kilogramos de suelo

Flujo de aire alimentado m^3/s (litros/minuto)	Tiempo requerido para cargar el reactor a 15686 Pa (160 gf/cm^2 presión manométrica) (minutos)
78.70 (4.72)	9.30
118.0 (7.08)	7.45
157.0 (9.44)	6.00
196.4 (11.80)	4.30
236.0 (14.16)	3.30
275.0 (16.52)	2.45
314.7 (18.88)	2.25
354.0 (21.24)	2.05
393.3 (23.60)	1.50
432.7 (25.96)	1.45
472.0 (28.32)	1.35
511.3 (30.68)	1.25
550.7 (33.04)	1.20

Como se puede observar, conforme el flujo de aire alimentado aumenta, el tiempo requerido para lograr la presión establecido, disminuye.

V.4 Resultados de la Etapa 4

Como siguiente etapa experimental se fijó en 48 kilogramos el volumen de suelo contenido en el reactor y flujo de aire en 78.7 m³/s (4.72 L/min). La variable a modificar fue el volumen de agua suministrado al reactor. Para tal efecto, se varió gradualmente el volumen de agua alimentado al reactor, desde un litro hasta 12, en dosis de un litro. Después de suministrar un litro de agua, se dejaba pasar un minuto antes de realizar la medición del tiempo requerido para alcanzar la presión establecida de 15686 Pascales (160gf/cm² presión manométrica) (ver manual de operación, Anexo 2).

Lo anterior tiene como objetivo humedecer el suelo lo más gradualmente posible y observar si afecta el comportamiento del reactor. Con esta prueba se pretende determinar la capacidad en el suministro de aire al incrementarse la humedad del suelo.

Bajo estas condiciones de operación, no se observó ninguna variación en los tiempos requeridos para cargar al reactor, es decir que el incremento de la humedad no afecta el tiempo requerido para alcanzar la presión deseada. También se evaluó el tiempo requerido para llenar el reactor con aire a la presión de 15686 Pascales (160gf/cm² presión manométrica).

De manera complementaria, se procedió a valorar la respuesta del reactor a diferentes flujos de aire alimentado. Los resultados obtenidos se indican en la tabla V-4.

Tabla V-4. Relación del tiempo requerido para mantener el reactor a 15686 Pa (160 gf/cm² presión manométrica) a diferentes flujos de aire y volúmenes de agua suministrados a 48 kilogramos de suelo

Alimentación de aire m ³ /s (litros/minuto)	Volumen de agua (litros)	Tiempo para cargar 15686 Pa (160 gf/cm ² presión manométrica) (minutos)
78.7 (4.72)	1	9.30
78.7 (4.72)	2	9.30
78.7 (4.72)	3	9.30
78.7 (4.72)	4	9.30
78.7 (4.72)	5	9.30
78.7 (4.72)	6	9.30
78.7 (4.72)	7	9.30
78.7 (4.72)	8	9.30
78.7 (4.72)	9	9.30
78.7 (4.72)	10	9.30
78.7 (4.72)	11	9.30
78.7 (4.72)	12	9.30

Nota: Por seguridad en la operación, no se debe exceder de 15686 Pascales (160 gf/cm² presión manométrica) de presión al interior del reactor.

A continuación se presentan los valores obtenidos de las pruebas realizadas al reactor cargado con suelo.

V.5 Resultados de la prueba de humedad relativa del suelo

Es importante señalar que en las etapas experimentales anteriores, se utilizó un suelo *no contaminado*, esto se hizo con la finalidad de conocer el comportamiento del reactor en condiciones reales y su respuesta con un alto porcentaje de humedad. Esta información es útil para estimar la capacidad potencial del funcionamiento del reactor cuando opere con suelo contaminado con hidrocarburos.

Para conocer la humedad relativa del suelo, se tomaron cinco muestras de 10 gramos. La primera procede del reactor sin agua adicional y las cuatro restantes cuando el suelo ya había sido humedecido con agua en intervalos de 3 litros (ver tabla V-5).

La técnica empleada para conocer la humedad relativa del suelo se describe en el anexo 4.

Tabla V-5. Porcentaje de humedad relativa del suelo

Cantidad de suelo inicial (kilogramos)	(Volumen de agua empleada (litros))	Porcentaje de humedad relativa del suelo (%)	Tiempo de estabilización en el reactor (horas)	Alimentación de aire m ³ /s (litros/minuto)
48	0	11.0	24	78.7 (4.72)
48	3	18.0	24	78.7 (4.72)
48	6	20.0	24	78.7 (4.72)
48	9	22.0	24	78.7 (4.72)
48	12	25.0	24	78.7 (4.72)

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa que no obstante incrementarse la humedad relativa del suelo de manera proporcional a la adición de agua (tabla V-5), la capacidad del reactor para difundir el aire a través de la cubierta del suelo, no cambia.

CAPÍTULO VI. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se hace el análisis y la discusión de los resultados obtenidos a lo largo del presente trabajo.

VI.1 Estructura del reactor

Con relación a este punto, el material seleccionado para la construcción del reactor (contenedor de suelo, sistema de distribución de agua, aire, así como tanque acumulador), de acuerdo a las características que se requerían para el presente trabajo fue de acero inoxidable tipo 316.

En términos generales puede decirse que el reactor funciona de manera eficiente y que además es de altamente resistente a la corrosión, así como al aumento a la presión interna sin que el equipo sea afectado.

De acuerdo con el arreglo funcional del reactor, el conjunto de adaptaciones realizadas, así como la implementación de los equipos de recirculación, tanto para líquidos y gases trabajan sin dificultades, aún cuando trabajan al mismo tiempo bajo condiciones de presión, alimentación y reflujo.

VI.2 Pruebas experimentales de funcionamiento

Las pruebas experimentales de funcionamiento que se aplicaron al reactor presentan los siguientes resultados.

Prueba hidrostática

El resultado de esta prueba es de suma importancia, porque al conocer la máxima presión de trabajo del reactor, se determinará el intervalo de seguridad para que el operador del equipo este protegido. Complementariamente al conocer este valor, se pueden efectuar diferentes pruebas tales como hermeticidad, alimentación de aire y recirculación de gases, sin riesgo de exceder la presión máxima que el reactor puede soportar.

Como resultado de la realización de la prueba hidrostática se determinó que la presión máxima que alcanzó el reactor fue de 25490 Pascales (260 gf/cm^2 presión manométrica) lo que determina que ésta es la mayor presión que el reactor puede soportar antes de sufrir alguna deformación.

En función de lo anterior se determinó que la presión apropiada para un manejo seguro del equipo fuera 15686 Pascales (160 gf/cm^2 presión manométrica) dejando un margen de 9804 Pascales (100 gf/cm^2 presión manométrica) de seguridad.

Prueba con agua

Los resultados obtenidos con la prueba del agua indican que los sistemas de alimentación, recirculación de líquidos operan de manera satisfactoria: Es en este sentido cuando se adiciona agua al tanque acumulador y se acciona la bomba de alimentación, el sistema de 4 tubos irriga el suelo contenido en el reactor de manera homogénea, es decir a lo ancho y largo del reactor. Por otra parte cuando el agua adicionada resulta excesiva, lixivia hacia el fondo del reactor, donde es colectada. Dicha agua puede ser reintroducida al reactor mediante el sistema de recirculación de líquidos sin que se presente fuga alguna.

Prueba de sellado del reactor

Después de realizar los ajustes necesarios a los empaques y conexiones, se logra constatar la hermeticidad del reactor después de haberlo cargado a una presión de 15686 Pascales (160 gf/cm^2 presión manométrica) no presentó disminución alguna después de 30 minutos.

Prueba de alimentación de aire

Este tipo de prueba se realizó en dos partes. La primera consistió en suministrar aire con el reactor abierto para constatar que el suministro de alimentación estaba circulando por todo el reactor. Esto además permitió verificar el funcionamiento del "rotámetro" por medio de las lecturas del gasto que estaba fluyendo por el. Como segunda forma de verificar este sistema consistió en colocar trozos de "hielo seco" por la parte superior de los filtros. Al formarse una nube lo suficientemente espesa, se procedió a alimentar el reactor con aire constanding que el suministro era uniforme por todo lo ancho y largo del reactor. este tipo de prueba determina cómo el aire se esparce por todo el equipo y con ello, cuando este cargado con suelo, se asegura que la distribución será uniforme y constante.

Prueba de recirculación de gases

Esta prueba confirmó que el sistema de recirculación operó satisfactoriamente. Primero porque al tener el reactor cerrado e inyectar aire de alimentación hasta llegar a la presión de 15686 Pascales (160 g/cm^2 presión manométrica), no se presentaron fugas.

Segundo, porque al accionar el compresor se comprobó que la recirculación era hacia el sentido que interesaba, lo cual es muy importante para el proceso de biorremediación. Tercero, el compresor tiene la suficiente capacidad para este proceso. Cuarto, las válvulas tipo “check”, que son las encargadas de que el sentido de la corriente sea el adecuado trabajaron sin ningún problema.

Prueba de permeabilidad del suelo

El propósito de esta prueba era conocer si realmente el reactor estaba suministrando en forma homogénea el aire de alimentación a todo lo largo y ancho del reactor. Por ello se distribuyeron trozos de hielo seco en la superficie del suelo.

Como el hielo seco en temperatura ambiente se evapora, formó una ligera nube que abarcó a todo el reactor. Al suministrarse el aire de alimentación que pasó a través del suelo, se observó como el aire salía en forma homogénea en todo el reactor. Por lo tanto la distribución de aire en el equipo es de forma satisfactoria.

Prueba de humedad relativa

El propósito de esta prueba permitió conocer la capacidad del reactor a diferentes tipos de humedades utilizando un suelo no contaminado. Esta información es de gran ayuda cuando posteriormente se realicen estudios donde se utilizarán suelos contaminados con algún hidrocarburo, debido a que mediante estas pruebas se determinó que el reactor puede operar a diferentes porcentajes de humedad relativa sin afectar su funcionamiento.

Comentarios finales para mejorar el funcionamiento del reactor

Es recomendable incorporar al reactor sistemas de control de presión más sensibles, que brinden mayor seguridad al operador y al equipo. Para ello se podría sustituir la válvula actual por una válvula de seguridad digital. Este aditamento es mucho más eficiente, detecta los cambios bajos de presión y al calibrarse, cuando se exceda la presión de operación del reactor, automáticamente abrirá desfogando el reactor.

Para prevenir la obstrucción del reactor debe evitarse la lixiviación del contaminante hacia el fondo del reactor. No obstante que el equipo cuenta con aditamentos adecuados para evitar el taponamiento, este fenómeno puede llegar a presentarse si no se le da el oportuno mantenimiento al sistema de filtros, pudiendo obstruir el suministro de aire a través del suelo contaminado.

**CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES
Y
RECOMENDACIONES**

CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

VII-1 Conclusiones

- Se diseñó y construyó un reactor *experimental* a escala de laboratorio. El material seleccionado fue acero inoxidable 316, el cual tiene entre sus principales características la alta resistencia a la corrosión y baja o nula deformación al ser sometido a presiones internas. el reactor es relativamente bajo en costo ya que se construyó con materiales nacionales, es fácil de transportar y de operación segura. El mantenimiento es sencillo y no costoso. Las pruebas de operación preliminares practicadas al reactor resultaron sumamente satisfactorias y actualmente se encuentra en condiciones óptimas para ser empleado en la depuración de suelos contaminados con hidrocarburos.

- Cabe señalar que el diseño del reactor además de contar con un dispositivo de seguridad que protege tanto al operador como al propio equipo, en caso de que alguno de los sistemas que componen el equipo fallará, cuenta con los sistemas de recirculación de líquidos y gases, así como para la toma de muestras.

VII.2 Recomendaciones

- Se recomienda experimentar con un suelo contaminado artificialmente con hidrocarburos de concentración conocida. esto es con la finalidad de conocer el comportamiento real del reactor.

- Efectuar pruebas experimentales variando parámetros de interés como serían el flujo de aire suministrado, volumen y composición de los nutrientes adicionados, la concentración y tipo de hidrocarburos, así como la composición edáfica del suelo.

- Establecer las variables óptimas de operación como son el tiempo de residencia, la cantidad de aire y nutrientes.

- Obtención de parámetros útiles para el escalamiento del reactor.

- Llevar a cabo la operación automática del reactor, así como un monitoreo mediante computadora.

CAPÍTULO VIII. BIBLIOGRAFÍA

1. Albert, L. A., López, S. M. y Flores, J. 1995. Diccionario de la contaminación. Centro de Ecología y Desarrollo. México, D.F. México.
2. Alexander, M. 1981. Biodegradation of chemical of environmental concern. Science. 211: 132-138.
3. Altamirano, P. 1996. Incineración de askareles, un método recomendable. Teorema 2:22-23.
4. Blackburn, J. W. y Hafker, W. R. 1993. The impact of biochemistry, bioavailability and bioactivity on the selection of bioremediation techniques. TIBTECH, 11:328-333.
5. Bouwer, E. J. 1992. "Bioremediation of organic contaminants in the subsurface". En Environmental Microbiology. Mitchell R. Wiley-Liss, Inc. Nueva York, EEUUA, pp 287-289.
6. Calabrese, E.J. y Kostej, P. T. 1989. Petroleum Contaminated Soils. Vol.2. Lewis Publishers, Chelsea, EEUUA. 515 pp.
7. Chaineau, C. H., Morel, J. L. y Oudot, J. 1995. Microbial degradation in soil microcosmos of fuel oil hydrocarbons from drilling cuttings. Environm. Sci. Technol., 29(6):1615-1621.
8. CIGM 1988. Informe presentado a PEMEX. Cia de Investigaciones Geofisicas de México, S.A. de C.V. México D.F., México.
9. DOD Enviromental Technology Transfer Committee. 1994. Remediation technologies screening matrix and reference Guide. EEUUA.
10. Domenech, X. 1993. Química ambiental (El impacto ambiental de los residuos). Mariguano, Madrid, 254 pp.
11. El Petróleo, Memorias de PEMEX. 1996. Pub. Petróleos Mexicanos. México D.F., México.
12. Harding Lawssons Associates-Grieco. 1995. Remedial Action: Fact sheet. Comunicación personal.
13. Koronelli, T. V. 1996. Principles and methods for raising the efficiency of biological degradation of hydrocarbons in the environment: Review Appl. Biochem. Microbiol., 32(6): 519-525.

14. Leahy, M. C. y Ericson, G. P. 1995. Bioventing reduces soil cleanup costs. Hydrocarbon Processing, 63-66.
15. Lyman W. J., Noonan, D. C. y Reidy, P. J. 1990. Cleanup of petroleum contaminated soils at underground storage tanks. Noyes Data Corporation. Nueva Jersey, EEUUA. pp. 45-51.
16. Pine, S.H., Hendrickson, J.B., Cram, D.J. y Hammond, G.S. 1992. Química orgánica. MacGraw Hill/Interamericana. México, D.F., pp 30-32.
17. Tortora, G.J., Funke, B.R. y Case, C.C. 1993 Microbiology. An Introduction. The Benjamin/Cummings Publishing Co. California EEUUA., pp. 682-692.
18. Ville, C. A. 1992. Biología. Interamericana. México D.F., México, pp. 217-225.

Bibliografía (no citada)

1. Boethling, R. S., Howard., Stiteler, W., Beauman, J. y Tirado, N. 1994. Group contribution method for prediction probability and rate of aerobic biodegradation. Environm Sci. Technol. 28 (3):459-465.
2. Bucalá, V., Saito, H., Howard, B.J. y Peters, A.W. 1994 Thermal treatment of fuel oil-contaminated soils under rapid heating. Environ. Sci. Technol. 10:1801-1807.
3. Bouwer, E.J y Zehnder A.B.J. 1993. Bioremediation of organic compounds putting microbial metabolism to work. TIBTECH, 11:360-367.
4. Calabrese, V.G.H., Elsavege, R.E., Bissinnette, G.K. y Sexstone, A, J. 1993. Mobility and enhanced biodegradation of a dilute waste oil emulsion during land treatment. J. Ind Microbiol., 12:13-20.
5. Caplan, J. A. 1993. The worldwide bioremediation industry: Prospects for profit. TIBTECH, 11: 320-323.
6. Chambers, C. D., Willis, J., Giti-Pour, S., Z, R, J. F., Mecca, M. Y., Pasin, B., Sims, R. C., Soresen, D. L., Sims, J. L., Mclean, J. E., Mahmood, R., Dupont, R. R. y Wagner, K. 1991. In situ treatment of hazardous waste contaminated soils. Noyes Data Corporation. Nueva Jersey. EEUUA.

7. Conrad, M. E., Daley, P. P., Fisher, M. L., Buchanan, B. B., Leighton, T. y Kashgarian, M. 1997. Combined ^{14}C and ^{18}C monitoring of in-situ biodegradation of petroleum hydrocarbons. Environm. Sci. Technol. 3:1463-1469.
8. Fine, P., E. R. y Yaron, B. 1997. Soil Interacciones with Petroleum Hydrocarbons: Abiotic process. Soil Technol. 10: 113-153.
9. Geerdink, M. L., Van Loodrescht, M. A. M. y Luyben, K. Ch. A. M. 1996. Model of Microbial Degradation of Non Polar Organic Contaminants in a Soil Slurry Reactor. Environm. Sci. Technol., 30(3):779-786.
10. Grosser R. J., Warshawsky, D. y Versal, J. R. 1991. Indigenus and Enhanced mineralization of pyrene, benzo, pryrene and carbazoles in soils. Appl. Environm. Microbiol., 57(12):3462-3469.
11. Heiter, A. y Sayer, G. S. 1993. Monitoring the efficacy of bioremediation. TIBTECH., 11:334-343.
12. Hieitkamp, M. A. y Cerniglia, C. E. 1988. Mineralization of polycyclic aromatic hydrocarbons by a bacterium isolated from sediment below an oil field. Appl. Environm. Microbiol., 54(6):1612-1614.
13. Huesemann, M. H. 1994. Guidelines for land-treating petroleum hydrocarbon contaminated soils. J. Soil. Contam., 3(3):229-318.
14. Joergensen, R. G., Shmaedeke, F., Windhorst, K. y Meyer, B. 1995. Biomass and activity of microorganisms in a fuel oil contaminated soil. Soil Biol. Biochem., 27(9):1137-1143.
15. Kelly, Y. y Cerniglia, C. E. 1995. Degradation of a mixture of high molecular eight polycyclic aromatic hydrocarbons by Micobacterium strain PYR-1. J. Soil Contam., 4(1):77-91.
16. Liu, Z., Edward, D. A. y Luthy, R. G. 1992. Sorption of non ionic surfactants onto soil. Water Res., 26(10):1337-1345.
17. Liu, S. y Sulfita, J. M. 1993. Ecology and evolution of microbial population for bioremediation. TIBTECH., 11:344-351.
18. Muller, J. G., Lantz, S. E., Ross, D., Colvin R. J, Middaugh, D. P. y Pritchard, P. H. 1993. Strategy using bioreactors and specially selected microorganisms for the bioremediation of groundwater contaminated with creosote and pentachlorophenol. Environm. Sci. Technol., 27(4):691-698.

19. Oudot, J. 1990. Selective migration of low and medium molecular weight hydrocarbons in petroleum contaminated terrestrial environments. Oil Chem. Pollut., 6:251-261.
20. Ponciano, G., Moreno, R., Espinosa, R. M., Báez, E., Arriaga, G. y Guzmán, A. 1996. "Producción y manejo de residuos peligrosos en México". En riesgos ambientales para la salud en la Ciudad de México. Rivero-Serrano, O y Ponciano, G. Eds. Programa Universitario del Medio Ambiente. México D.F. México, pp. 515-545.
21. Radwan, S. S., Sorkhoh, N. A., Fardoun, F. y Al-Hasan, R. H. 1995. Soil management enhancing hydrocarbon biodegradation in the polluted Kuwait desert. Appl. Microbiol. Biotechnol., 44:265-270.
22. Salantrino, J. P., Dorn, P. B., Huesemann, M. H., Moore, K. O., Rhodes, Y., Rice Jackson, L. M., Vipond, T. E., Western, M. M. y Wisniewski, H. L. 1997. Crude oil hydrocarbon bioremediation and soil ecotoxicity assessment. Environm. Sci. Technol., 31 (6):1769-1776.
23. Scherrer, P. 1990. Biodegradation of crude oil in experimentally polluted clayed and sandy mangrove soils. Oil Chem. Pollut., 6:163-176.
24. Tiehm, A. 1994. Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the presence of synthetic surfactants. Appl. Environ. Microbiol., 60(1):258-263.
25. Thomonette, F. y Verdu, J. 1989. Role of alkyl benzenes in the photochemical oxidation of petroleum distillates. Oil Chem. Pollut., 5:333-346.
26. Tyagi, R. D., Tran, F. T. y Chowdhury, K. M. M. 1993. Biodegradation of petroleum refinery wastewater in a modified rotating biological contactor with polyurethane foam attached to the disks. Water Res., 27(1):91-99.
27. Van Dyke, M. L., Gulley, S.L., Lee, H. y Trevors, J. T. 1993. Evaluation of microbial surfactants for recovery of hydrophobic pollutants from soil. J. Ind. Microbiol., 11:163-170.
28. Voice, T. C., Pack, D., Zhao, X., Shi, J. y Haqkey, R. F. 1992. Biological activated carbon in fluidized bed reactors for the treatment of groundwater contaminated with volatile aromatic hydrocarbons. Water Res., 5: 1389-1401.
29. Ye, D., Siddiqi, M. A., Maccubbin, A. E., Kumar, S. y Sikka, H. C. 1996. Degradation of polynuclear aromatic hydrocarbons by Sphingomonas paucimobilis. Environm. Sci. Technol., 30(1):136-142.

30. Zacharias, B., Lang, E. y Hanert, H. H. 1995. Biodegradation of chlorinated aromatic hydrocarbons in slow sand filters simulating conditions in contaminated soil pilot study for in situ cleaning of an industrial site. Water Res., 27(1):1663-1671.

EN INTERNET:

1. Applicability of bioventing. <http://earth.agu.org/revgeophys/rathfe01/node5.html>.
2. Applicability of SVE.....<http://earth.agu.org/revgeophys/rathfe01/node3.html>.
3. Biodegradation rates.....<http://earth.agu.org/revgeophys/rathfe01/node6.html>.
4. Bioventing application evaluation. <http://www.estd.battelle.org/er/bioventing.html>.
5. Bioventing system. National Risk Management Research Laboratory. [Ttp://iridium.nttc.edu/env/site95/demo/ongoing/nrmrl.html](http://iridium.nttc.edu/env/site95/demo/ongoing/nrmrl.html).
6. Conclusions. <http://earth.agu.org/revgeophys/rathfe01/node14.html>.
7. Introduction.....<http://earth.agu.org/revgeophys/rathfe01/node2.html>.
8. Rathfelder, K., Lang, J. R. y Abriola, L. M. 1995. Soil vapor extraction and bioventing: Applications, limitations and future research directions. Rev. Geophys appl. <http://earth.agu.org/revgeophys/rathfe01/node1.html>.
9. Section4. Remediation system description. <http://www.em.doe.gov/costperf/cpsect4.html>.
10. Section5. Remediation system performance. <http://www.em.doe.gov/costperf/cpsect5.html>.

CAPÍTULO IX. ANEXOS

IX.1 Anexo 1. Glosario

Biomasa: Se refiere al peso y volumen de los materiales biológicos contenidos en hojas, proteínas, microorganismos, carbón, peces, turba, pulpa de madera, maíz que son biomasa. La biomasa es muy importante para la vida ya que proporciona los nutrimentos y energía que permiten a los organismos, especialmente a los carnívoros, existir (Ville, 1992).

Contaminación ambiental: Introducción de agentes biológicos, químicos o físicos a un medio que no pertenecen, la que por cualquier causa altera el medio natural e introduce en él formas de materia o energía que le son ajenas o causa el aumento de las concentraciones basales de alguno de los componentes naturales. En general es indeseable y puede tener efectos adversos para la salud y el equilibrio ecológico a corto o largo plazo (Albert et al., 1995).

Crudos: Mezclas complejas y variables de hidrocarburos de diferente peso y estructura molecular que pueden contener cientos de compuestos, que los hacen variar en su composición y en sus propiedades fisicoquímicas (CIGM, 1988).

Hidrocarburo: Es una serie de compuestos que están constituidos exclusivamente por átomos de carbono e hidrógeno (Pine et al., 1992). El petróleo es la principal fuente de hidrocarburos. Los hidrocarburos y sus compuestos derivados se pueden clasificar en tres grandes categorías:

Hidrocarburos alifáticos: Están formados por cadenas de átomos de carbono en donde no hay cadenas cíclicas. Se les denomina en general hidrocarburos de cadena abierta o acíclicos. Ejemplo: Hexano, etileno (Pine et al., 1992).

Hidrocarburos alicíclicos: Llamados también cíclicos, son compuestos de carbono encadenados formando uno o varios anillos. Como ejemplo: Ciclopropano y ciclohexano (Pine et al., 1992).

Hidrocarburos aromáticos: Este tipo de compuestos constituyen un tipo especial de hidrocarburos. Son compuestos cíclicos que por lo general contienen anillos de seis eslabones, en los cuales se alternan enlaces sencillos y dobles. Se clasifican en forma aparte de los hidrocarburos alifáticos y alicíclicos, debido a que sus características fisicoquímicas son muy especiales. Ejemplo de ellos son: Benceno y naftaleno (Pine et al., 1992).

Industria Petrolera: (CIGM, 1988), La industria petrolera en general engloba lo siguiente:

-Producción Primaria.- Exploración y explotación.

-Transformación Industrial.- Refinación, petroquímica y movimiento de productos (bombas, transferencias, mezclado de gasolinas en línea).

-Distribución y comercialización.- Incluye transporte y ventas.

Impacto del petróleo en el suelo: Es una interferencia con las propiedades físicas que ocasionan el descontrol del régimen de la humedad, además de afectar el estado de oxidación de los diferentes minerales y compuestos orgánicos, inhibe la nitrificación y produce la salinización por los lodos removidos en la perforación, que contienen por lo general grandes cantidades de sales. Al existir grandes cantidades de carbono, se modifica la relación C/N y el contenido de las aguas subterráneas. Asimismo frecuentemente, se presentan compuestos tóxicos y de difícil o nula biodegradación (CIGM, 1988).

Metabolismo: Las variadas reacciones químicas y cambios energéticos que se efectúan en las células vivientes reciben el nombre de metabolismo (Vile, 1992).

Pluma: Es el término con el que se denomina a la mancha que forma un contaminante en un medio dado. Es la dispersión del mismo en todas las dimensiones de un bloque de suelo afectado (CIGM, 1988).

Petróleo: Es una variedad de sustancias de origen vegetal, animal y mineral, que constituyen a los hidrocarburos. Se encuentran compuestos en su mayoría por alquenos, alcanos, aromáticos y naftenos. Pero también hay heteroátomos de nitrógeno, azufre y oxígeno que sustituyen al átomo de carbono, así como también por metales como vanadio, níquel y fierro (CIGM, 1988).

Recuperación: Es un proceso natural. Retorno del ecosistema dentro de los límites de su natural variabilidad. Incluiría componentes alternativos del ecosistema o aún uno modificado pero que continúe su existencia como un ecosistema natural y funcional para el área (CIGM, 1988).

Refinación del petróleo: Son procesos a los que se someten los crudos para el fraccionamiento de estos y obtener así una serie de hidrocarburos con un diferente peso molecular y para diferentes usos (CIGM, 1988).

Resinas: Son macromoléculas de origen sintético y son materiales que se utilizan como fibras y películas protectoras (Pine et al., 1992).

Restaurar: recuperar las condiciones originales de un ecosistema. Según la Ley Federal de Protección Ambiental, reforma de 1996, en el artículo 4^o la define como :

“un conjunto de medidas y actividades tendientes a la modificación renovadora de aquellas partes del ambiente en las cuales se manifiesta en grado de deterioro tal que represente un peligro para la conservación de los ecosistemas”. Es la recuperación de áreas productivas o ecosistemas afectados por la contaminación, deforestación, erosión y/o desertización, llevando a cabo prácticas de plantación de especies forestales y aplicación de técnicas de absorción o dispersión de contaminantes.

Otro enfoque que se menciona es el relacionado con la recuperación antropogénica en la cual se induce a un retorno a las condiciones naturales del ecosistema dentro de los límites propios de su variabilidad a través de métodos naturales y/o artificiales.

Su uso futuro, respetando los límites descritos y eligiendo los elementos del sistema que pueden o no ser modificados de acuerdo a un uso planificado a futuro para esa área, de acuerdo a un conocimiento fundamental del ecosistema, se debe definir en función del sitio preciso de que se trate (CIGM, 1988).

Triterpenos: Son hidrocarburos insolubles en agua, denominados a menudo como aceites esenciales y contienen fragancias (Pine et al., 1992). Poseen estructuras que son múltiplos del esqueleto de 10 átomos de carbono que presentan los monoterpenos por lo tanto, contienen 30 átomos de carbono.

Xenobiótico: Producto sintético que no es fácilmente incorporable en los ciclos biogeoquímicos ni en el metabolismo de los seres vivos y que sin embargo puede ser objeto de transformaciones por parte de los mecanismos metabólicos de éstos (Albert et al., 1995).

IX.2 Anexo 2. Manual de operación

El reactor está constituido por diferentes componentes, los cuales están integrados para formar un solo sistema. Tanto el buen manejo de todo el equipo, como la seguridad del operador, radica en seguir cuidadosamente una serie de instrucciones indicadas en este manual.

La estructura del manual de operación esta constituido de seis secciones, las cuales constan de I.- Inicio; II.- Estabilización; III.- Toma de muestras; IV.- Recirculación de gases; V.- Proceso de recirculación de gases al tanque acumulador; VI.- Sistema de recirculación de lixiviados; VII.- Proceso de descarga del reactor. A continuación se mencionaran cada una de ellas.

Sección I. Inicio

Nota. Este reactor trabaja con hidrocarburos u otros compuestos que sean volátiles, tóxicos e inclusive corrosivos. Cuando se volatilizan forman una atmósfera explosiva. Como recomendación se previene no producir chispas cerca del equipo, no producir fuego o encender algún equipo de laboratorio cercano al reactor.

1. - Verificar que las conexiones y mangueras del reactor así como las de los equipos no estén dañadas, golpeadas, etc. Se incluye al tanque de alimentación. En caso de que alguno de estos accesorios esté deteriorado, se recomienda cambiar de inmediato la parte afectada.
2. - Revisar que todas las válvulas del reactor se encuentren cerradas.
3. - En la caja de control verificar que la válvula desviadora se encuentre en la posición "cerrado" (ver figura A-2-1).
4. - Revisar que el interruptor de válvula de seguridad (L.V.S.), y el interruptor de recirculación de gases (I.R.G.), se encuentre en posición de "apagado" (ver figura A-2-1).
5. - Cuando se esté revisando o se esté realizando alguna reparación en el equipo, se aconseja que no este conectado a la red eléctrica.
6. - Colocar el sistema de alimentación de aire con un "perico" o una llave "española" de 19 milímetros ($\frac{3}{4}$ de pulgada).

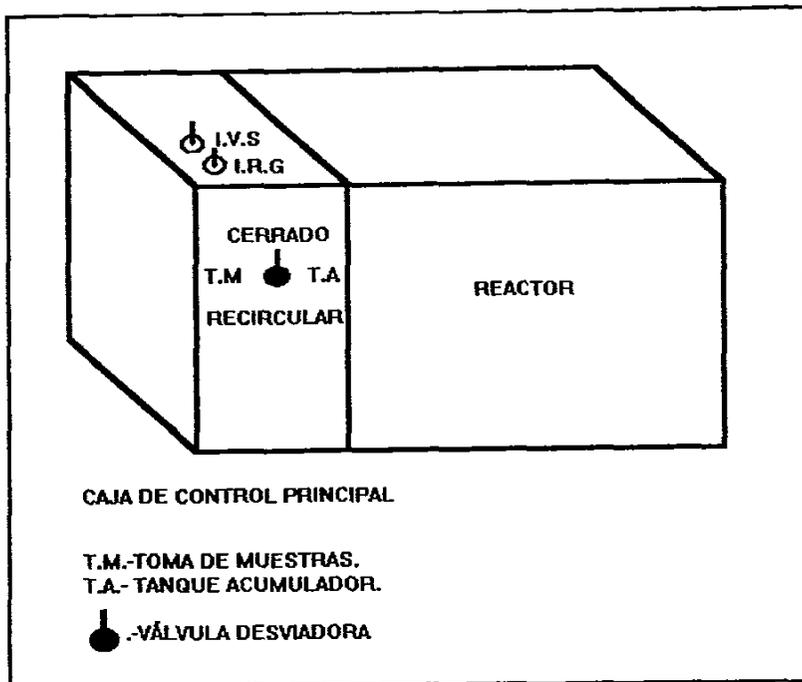


Figura A-2-1. Localización de caja de control principal del reactor

7. - Colocar el primer juego de filtros de malla de acero inoxidable en los soportes del reactor.
8. - Colocar el "serpentín" de recirculación de gases con un "perico" o una llave "española" de 19 milímetros (¾ de pulgada).
9. - Colocar la malla flexible sobre el serpentín de recirculación.
- 10.- Colocar el segundo juego de filtros de malla de acero inoxidable sobre los soportes del reactor.
- 11.- Se coloca el suelo contaminado a todo lo largo y ancho del reactor

- 12.- Colocar el sistema de alimentación de líquidos con un “perico” o una llave “española” de 19 milímetros ($\frac{3}{4}$ de pulgada).
- 13.- Colocar los soportes, cuidando que estos se ajusten perfectamente a los tornillos de sujeción con los que cuenta el reactor.
- 14.- Colocar sus respectivas tuercas y ajustarlas con una llave “española” o de “estrias” de 11.1 milímetros (7/16 de pulgada).
- 15.- Quitar los tornillos que sujetan la tapa del tanque acumulador utilizando una llave “española” o de “estrias” de 11.1 milímetros (7/16 de pulgada).
- 16.- Colocar el filtro en el tanque acumulador.
- 17.- Adicionar el líquido con las bacterias y los nutrientes en el tanque acumulador.
- 18.- Colocar la tapa con sus respectivos tornillos y ajustarlos con una llave “española” o una llave de “estrias” de 11.1 milímetros (7/16 de pulgada).
- 19.- Cerrar el reactor y colocar los broches de seguridad, primero los broches “rápidos” empezando con los de las orillas y por último el del centro (ver figura A-2-2).

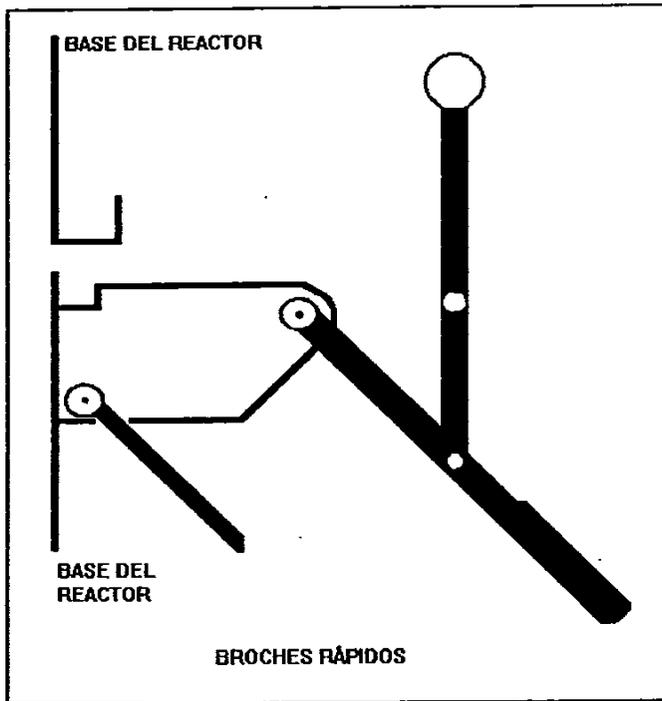


Figura A-2-2. Broches "rápidos"

- 20.- Ajustar la tapa del reactor con los broches de "rosca" utilizando una llave "española" o una llaves de "estriás" de 14.2 milímetros (9/16 de pulgada). En caso de que al momento de adicionar aire de alimentación se presente una fuga, con la llave antes mencionada, ajustar la tuerca del broche de "rosca" hasta que la fuga cese. Se debe tener cuidado de no ajustar demasiado la del reactor, ya que en caso de exceder el ajuste se puede dañar uno de los broches (ver figura A-2-3).

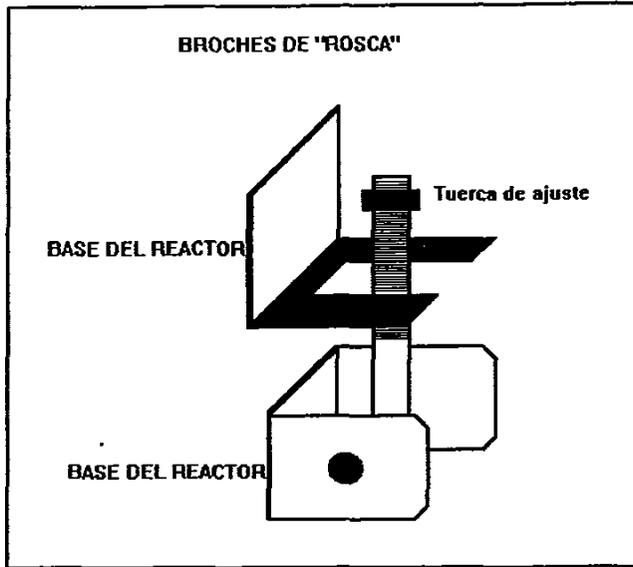


Figura A-2-3. Broches de “rosca”

- 21.- Verificar que el manómetro marque “cero” antes de inicial la alimentación de aire (ver figura A-2-4).
- 22.- Verificar que la válvula de seguridad pueda ser accionada sin ninguna dificultad.
- 23.- Abrir la válvula del tanque alimentación de aire.
- 24.- Fijar en el “rotámetro” el gasto de aire que se requiere mediante el giro de la perilla (ver figura A-2-4).

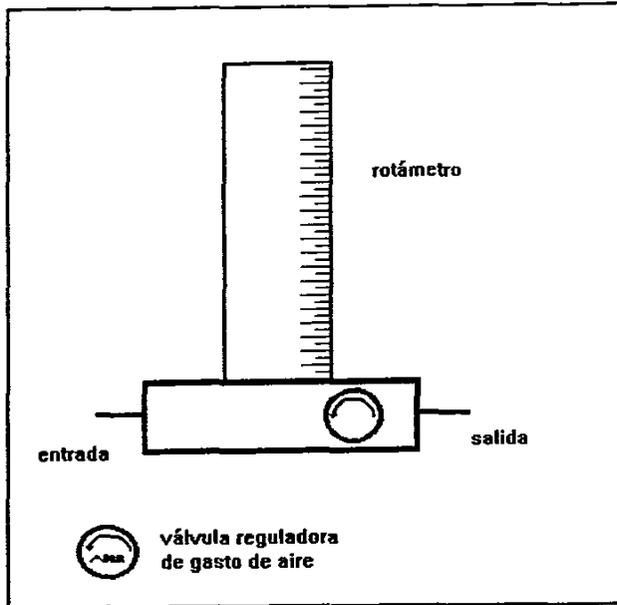


Figura A-2-4. "Rotámetro"

- 25.- Abrir la válvula de alimentación de aire del reactor cuidando de no sobrepasar la presión de diseño que es de 15686 Pascales (160 gf/cm^2 presión manométrica).
- 26.- Conectar eléctricamente el reactor (bombas, y conexiones eléctricas para el sistema L.V.S y el I.R.G).
- 27.- Suministrar el líquido con nutrientes.

Sección II. Estabilización

1. - Verificar que la válvula de bola del fondo del reactor se encuentre cerrada.
2. - Verificar que el suministro de aire de alimentación no haya excedido la presión de 15686 Pascales (160 gf/cm^2 presión manométrica) estipulado por la sección I y el manual de operación (ver anexo 2, sección I).

3. - Cerrar la válvula de alimentación de aire.
4. - Cerrar la válvula de bola que conecta el aire de alimentación al reactor.
5. - Dar un lapso mínimo de 30 minutos para verificar que el equipo no presente alguna fuga.
6. - Al iniciar el proceso de biodegradación en el reactor no retirar los broches de “rosca” ni los “rápidos”.
7. - Durante el tiempo que este el reactor trabajando, revisar que el equipo no tenga variaciones de presión.
8. - Iniciar las tomas de muestras correspondientes.

Sección III. Toma de muestras

Para conocer como va desarrollándose el avance del proceso de biodegradación se utiliza el sistema de toma de muestras, siguiendo el procedimiento que a continuación se describe.

1. - Girar la perilla de la válvula “desviadora” hasta la posición de “Toma de muestras”
2. - Accionar el interruptor I.V.S. en posición de “encendido”.
3. - Abrir la “llave” que se encuentra en la parte posterior del panel de control.
4. - Si no se desea tomar alguna muestra más:
 - cerrar la “llave”.
 - girar la perilla de la posición “Toma de muestras” a la posición “cerrado”
 - accionar el interruptor I.V.S. en posición de “cerrado”.
5. - Colocar la manguera en su broche correspondiente.

Sección IV. Recirculación de gases

Nota: No portar esclavas, anillos, ropa holgada o suelta, no acercarse demasiado al equipo. Este sistema cuenta con un compresor, dos poleas y una banda de caucho, los que al estar operando pueden ocasionar un accidente.

- 1.- Cumplir con los requisitos de seguridad mencionados anteriormente.
- 2.- Girar la perilla de la válvula desviadora hasta la posición **“Recirculación”**.
- 3.- Accionar el interruptor **I.V.S.** en posición de **“encendido”**
- 4.- Accionar el interruptor **I.R.G.** en posición de **“encendido”**.
- 5.- Recircular por espacio de 30 minutos.
- 6.- Accionar el interruptor **I.R.G.** en posición de **“apagado”**.
- 7.- Accionar el interruptor **I.V.S.** en la posición **“apagado”**.
- 8.- Colocar la perilla de la válvula desviadora en posición **“cerrado”**.

Sección V. Proceso de recirculación de gases al tanque acumulador

1. - Verificar que la válvula reguladora esté lo suficientemente abierta para permitir que entre gradualmente el gas.
- 2.- Colocar la perilla de la válvula desviadora en la posición **“Tanque Acumulador”**.
- 3.- Accionar el interruptor **I.V.S.** a la posición de **“encendido”**.
- 4.- Una vez terminado el proceso accionar el interruptor a la posición **“apagado”**.
- 5.- Colocar la perilla de la válvula desviadora en posición **“cerrado”**.

Sección VI. Sistema de recirculación de líquidos o lixiviados

- 1.- Verificar que el reactor no esté a presión.
- 2.- Verificar que el **“tanque acumulador”** esté vacío.
- 3.- Accionar la válvula de **“bola”** que se encuentra en el fondo del reactor.
- 4.- Accionar la bomba de recirculación de líquidos.
- 5.- Una vez retirados los lixiviados del fondo **“apagar”** la bomba de recirculación de líquidos.
- 6.- Accionar la válvula de **“bola”** a su posición original.

Sección VII. Proceso de descarga del reactor

- 1.- Verificar que las válvulas de alimentación de aire del reactor estén **“cerradas”**.
- 2.- En caso de encontrar lixiviados en el fondo del reactor, abrir la válvula que se encuentra en la parte inferior de éste y accionar la bomba de **“Recirculación de líquidos”** para que estos pasen al tanque acumulador para su posterior degradación.
- 3.- Colocar la perilla de la válvula desviadora en posición **“Tanque acumulador”**.
- 4.- Accionar el interruptor **I.V.S.** en la posición **“encendido”**.
- 5.- Verificar que el manómetro marque el descenso de la presión del reactor.
- 6.- Antes de quitar los broches del reactor verificar que el manómetro marque **“cero”**.
- 7.- Desconectar eléctricamente al reactor.
- 8.- Retirar los broches tipo **“rosca”**.
- 9.- Retirar los broches **“rápidos”**.
- 10.- Retirar la tapa del reactor.
- 11.- Retirar los soportes con una llave **“española”** o de **“estrías”** de 11.1 milímetros (7/16 de pulgada).

- 12.- Retirar el sistema de alimentación con un “perico” o una llave “española” de 19 milímetros (¾ de pulgada).
- 13.- Retirar el suelo ya tratado.
- 14.- Quitar los filtros de malla.
- 15.- Retirar el sistema de recirculación de gases con un “perico” una llave “española” de 19 milímetros (¾ de pulgada).
- 16.- Retirar el segundo sistema de malla.
- 17.- Retirar el sistema de alimentación de aire con un “perico” o una llave “española” de 19 milímetros (¾ de pulgada).

IX.3 Anexo 3. Manual de mantenimiento

El reactor es una serie de equipos que están integrados en uno solo por lo que puede denominársele como sistema. Puede realizar *múltiples funciones* acorde con la manipulación del mismo.

Para el buen funcionamiento del equipo, se necesita de un mantenimiento preventivo cada vez que éste ha tratado algún suelo contaminado. Esto es con el propósito de que el equipo opere de manera óptima.

A continuación se mencionan los pasos a seguir para proporcionar al reactor o sistema experimental un mantenimiento que prevenga algún tipo de mal funcionamiento.

Sección I. Limpieza del reactor

Una vez que el reactor ha sido desarmado, la estructura base (contenedor del suelo), se lava con agua y jabón y se drena por la parte inferior del fondo. En algunos casos, puede aparecer rastros de oxidación en la estructura. Para retirar este efecto, solo se utiliza un pulidor y/o solventes (desincrustantes). Una vez hecho esto, se seca completamente.

Sección II. Sistema de alimentación de aire

1. - Verificar que las válvulas y manómetros del tanque de alimentación de aire no estén dañados o golpeados, debido a que esto perjudica la *precisión de los instrumentos de medición.*

2. - Verificar que la válvula reguladora de flujo del “rotámetro” abra o cierre sin dificultad.
3. - Verificar que válvulas, conexiones y mangueras estén en buen estado. En caso de daño, cambiar la pieza afectada sin demora.
4. - Verificar el buen funcionamiento de las válvulas de “bola” del reactor, tanto la de alimentación como la de recirculación de líquidos, así como que no estén obstruidas.
5. - Verificar que el sistema de alimentación de aire éste limpio y no se encuentre obstruido. En caso de estar sucio, se puede lavar con agua y jabón.
6. - Colocar el sellador de teflón en las cuerdas externas de cada conexión.
7. - Colocar el sistema de alimentación de aire usando un “perico” o una llave “española” 19 milímetros de $\frac{3}{4}$ de pulgada.

Sección III. Sistema de recirculación de líquidos

En esta sección se incluyen los sistemas de bombeo tanto el de alimentación como el de recirculación.

Sistema de alimentación de líquidos

1. - Verificar que los cabezales de las bombas no se encuentren sucios, oxidados o golpeados.
2. - Verificar el buen estado de las mangueras, así como el de las conexiones.
3. - Una vez que el reactor ha sido desarmado, los principales puntos a desarrollar para el mantenimiento
4. - Verificar que el sentido de la alimentación de la válvula “check” funcione en el sentido correcto.
5. - Colocar el sellador de teflón en todas las conexiones.
6. - Ajustar las conexiones con un “perico” y una llave “española” de 19 milímetros ($\frac{3}{4}$ de pulgada).

7. - Verificar el buen funcionamiento de las “abrazaderas” en cada manguera y conexión donde se encuentren así como su ajuste utilizando un “destornillador” plano.

Sistema de recirculación de líquidos

El sistema de recirculación de líquidos abarca desde la bomba de recirculación del fondo del reactor hasta el tanque acumulador.

1. - Verificar que el cabezal de la bomba no esté sucio, oxidado o maltratado.
2. - Verificar que las conexiones que se encuentran en la parte inferior del reactor estén limpias y sin obstrucciones.
3. - Verificar que tanto las mangueras como las conexiones estén en buen estado. En caso contrario cambiar inmediatamente la pieza dañada.
4. - Verificar que el tanque acumulador esté lavado y sin residuos en el fondo. En caso de oxidación, utilizar una lija de agua del número 220.
5. - Colocar en todas las conexiones el sellador de teflón.
6. - Colocar las mangueras en sus conexiones respectivas.
7. - Ajustar las conexiones con un “perico” y una llave “española” de 19 milímetros ($\frac{3}{4}$ de pulgada).
8. - Colocar el filtro dentro del tanque acumulador
9. - Ajustar las “abrazaderas” con un “destornillador” plano.
- 10.- Colocar en la tapa del tanque acumulador los tornillos y ajustarlos con una llave “española” o de “estrías” de 11.1 milímetros (7/16 de pulgada).

Sección IV. Sistema para recirculación de gases

El sistema de recirculación de gases consta de un compresor y de válvulas, para lo cual se describe en forma separada la forma de proporcionar mantenimiento a los dos accesorios.

Compresor

1. - Verificar que el sistema no esté conectado eléctricamente.
2. - Quitar el tapón medidor del aceite con una llave “española o de “estriás” 14.2 milímetros (9/16 de pulgada) y verificar que se encuentre al nivel señalado.
3. - Colocar el tapón utilizando la llave antes mencionada.
4. - Verificar que los tornillos que sujetan tanto al motor como al cabezal estén bien ajustados, de no ser así utilizar una llave “española” o de “estriás” de 14.2 milímetros (9/16 de pulgada).
5. - Verificar la tensión de la banda. En caso que esta haya perdido tensión se afecta la eficiencia del compresor y puede producir un sobre calentamiento al motor. Con dos llaves de “estriás” de 14.2 milímetros (9/16 de pulgada) “aflojar” las tuercas que sujetan al motor. Esta parte del compresor tiene dos “rieles”, los cuales son para dar tensión a la banda. Una vez estirada la banda, con las dos herramientas mencionadas anteriormente volver a ajustarlas.
6. - Verificar el buen estado de mangueras y conexiones que conectan al compresor con el reactor.

Válvulas

7. - Verificar que la válvula “check” funcione en el sentido que se necesita, así como el empaque que se encuentra dentro de ésta. Para retirar la tapa de la válvula se utiliza un “perico”. Para retirar en caso de ser necesario el empaque se utiliza un “destornillador” plano.
8. - En caso de reemplazar piezas usar el sellador de teflón en todas las conexiones.
9. - Ajustar las conexiones con un “perico” y una llave “española” de 19 milímetros (¾ de pulgada).

Sección V. Sistema para toma de muestras

1. - Verificar que las conexiones y las mangueras estén en buen estado.
2. - Verificar que la “llave” para la toma de muestras no presente fugas.
3. - Verificar que el “sinfín” de la “llave” no esté dañada.

4. - En caso de cambiar partes dañadas utilizar el sellador de teflón en todas las conexiones.
5. - Ajustar las conexiones utilizando un “perico” y una llave “española” de 19 milímetros (¾ de pulgada).

Sección VI. Sistema de seguridad

Este es un sistema al que se le dedica una especial atención, debido a la importancia de estar manejando presiones.

1. - Retirar la válvula de seguridad utilizando una llave “española” de 14.2 milímetros (9/16 de pulgada) o un “perico”.
2. - Verificar que la válvula de seguridad no se encuentre golpeada.
3. - Retirar la tuerca unión de la válvula y verificar el estado de las piezas.
4. - Armar la válvula de seguridad teniendo cuidado de no alterar alguna pieza.
5. - Inyectar aire para verificar que no presente fugas.
6. - En caso de estar dañada, no tratar de repararla, se debe remplazar totalmente.
7. - Retirar el manómetro con una llave “española” 14.2 milímetros (9/16 de pulgada).
8. - Observar que la aguja indicadora no se encuentre dañada.
9. - Retirar la tapa y la mica del manómetro dando un pequeño giro.
- 10.- Revisar el estado actual de las piezas que componen el manómetro.
- 11.- Colocar el vidrio y tapa del manómetro.
- 12.- Ajustar la tapa.
- 13.- Inyectar presión para observar su funcionamiento
- 14.- En caso de daño no tratar de ajustar el manómetro. Se trata de un instrumento de medición. Remplazarlo si está fallando.
- 15.- Colocar sellador de teflón en todas las conexiones.
- 16.- Ajustar los accesorios con las herramientas antes mencionadas.

IX.4 Anexo 4. Cálculos para la obtención de la humedad relativa

La humedad que puede presentar un suelo es una variable de vital importancia, esto se debe a los sitios geográficos en donde se encuentran, condiciones climáticas, hídricas, etc, propias de cada región.

El conocer este tipo de parámetro permite establecer las condiciones apropiadas que se deben propiciar para que el reactor pueda realizar adecuadamente su funcionamiento.

La técnica utilizada para conocer la humedad relativa que puede manejar el reactor es la siguiente:

Técnica para determinar la humedad relativa

Principio: Se toma una muestra del suelo no contaminado previamente tamizado, se pesa en se pesa en una vasija de porcelana y se seca a peso constante en un horno a 103-105°C.

Instrumental:

- a) .- Cápsulas de 300 mL de capacidad, fabricadas en porcelana, 100 mm de diámetro.
- b) .- Horno de mufla para operar a 550-600°C.
- c) .- Desecador, provisto de un desecante que contienen indicador colorimétrico de concentración de humedad.
- d) .- Horno de secado, para operaciones a 103-105 °C.
- e) .- Balanza de análisis, capaz de pesar hasta 0.1 mg.

Procedimiento.

- a) .- **Preparación de la cápsula de evaporación:** Colocar una cápsula de porcelana a 550-600°C durante una hora en un horno de mufla. Consérvese la cápsula en un desecador hasta que se necesite. Pesar inmediatamente antes de usar.
- b) .- **Análisis de la muestra:** Seleccionar una muestra que proporcione un peso de 2.5-30 gramos. Secar la muestra al menos durante una hora en un horno a 103-105°C, enfriar la muestra en un desecador para equilibrar la temperatura y pesar.

c) Repetir el proceso de secado, enfriado, desecación y pesado hasta obtener un peso constante, o hasta que la pérdida de peso sea menor del 4% del peso previo.

Cálculo

% de humedad relativa = $((A - B) / \text{gramos de la muestra}) * 100$

donde:

A= peso de la muestra antes de ser tratada + peso de la cápsula

B= peso de la muestra después de ser tratada + peso de la cápsula