

## PROJECTE FINAL DE CARRERA

Enginyeria Tècnica Industrial, Especialitat Química Industrial

---

*Evaluación de los costes de construcción  
y operación de un biofiltro*

---

Sergio Fernández Sé

Cerdanyola del Vallès, 12 Junio de 2010



David Gabriel Buguña, Professor Agregat del Departament d'Enginyeria Química de la Universitat Autònoma de Barcelona i Óscar Jesús Prado Rubianes, Investigador del Departament d'Enginyeria Química de la Universitat Autònoma de Barcelona,

**CERTIFIQUEN:**

Que l'alumne Sergio Fernández Sé ha dut a terme, sota la nostra direcció, el treball amb títol “Evaluación Económica de Construcción y Operación de un Biofiltro” que presenta en aquesta memòria, la qual constitueix el seu treball en l'assignatura “Projecte Final de Carrera” (Codi 24675).

I perquè consti als efectes que correspongui, es presenta el treball esmentat davant l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de la Universitat Autònoma de Barcelona, signant el present certificat.

Cerdanyola del Vallès, 12 de juny de 2010

**Dr. David Gabriel Buguña**

**Dr. Óscar Jesús Prado Rubianes**

## **AGRADECIMIENTOS**

La carrera conlleva interminables horas de estudio, mucho esfuerzo. Pero también se convive con personas que te acompañan a lo largo del recorrido. Se aprende que cuando varias personas realmente se proponen sacarse algo con el tiempo se consigue ayudándose mutuamente. Además, durante este camino, se conoce gente con la que se comparte momentos importantes creándose así un vínculo de amistad. Por desgracia la experiencia enseña que, una vez finalizado este trayecto, la gran mayoría de gente que se veía habitualmente pierde el contacto. Yo espero que por lo menos, cuanto más se permita, mantenga la amistad con unos cuantos de ellos.

Refiriéndome a los profesores mencionar que los hay de todos tipos al igual que compañeros. Me gusta pensar que no sólo están ahí para cumplir con su trabajo, sino que esperan que el alumno aprenda y se motive durante sus clases. En muchas ocasiones he encontrado profesores que incluso, sin intención, han desempeñado la función de educadores con nosotros. De este modo nos han aportado una visión más amplia para ver e interpretar mejor el mundo que nos rodea.

La vida está llena de dificultades que uno ha de superar día a día constantemente y realmente hay momentos en que uno no sabe cómo salir adelante. Por suerte para mí, en los buenos y malos momentos, siempre he recibido el apoyo y la ayuda incondicional de mis padres. Gran parte de la consecución final de este largo camino se lo debo a ellos por creer en mí.

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1 Contaminación atmosférica	1
1.2 Gases contaminantes básicos	2
1.3 Sistemas de tratamiento de gases	3
1.3.1 Absorción	4
1.3.2 Adsorción	5
1.3.3 Condensación	7
1.3.4 Oxidación térmica y oxidación catalítica	9
1.3.5 Procesos biológicos	11
1.4 Comparativa económica	20
1.5 Costes y consideraciones económicas del biofiltro	23
1.5.1 Costes de inversión	24
1.5.2 Costes de operación	25
1.5.2.1 Consumo de energía	28
1.5.2.2 Consumo de agua y tratamiento	28
1.5.2.3 Monitorización y mantenimiento	29
1.5.2.4 Recambio del medio	29
<b>2. OBJETIVOS</b>	<b>30</b>
<b>3. METODOLOGÍA</b>	<b>31</b>
3.1 Introducción	31
3.2 Actualización de datos económicos	32
3.3 Costes de inversión	32
3.4 Costes de operación y mantenimiento	43
3.4.1 Costes de electricidad	43
3.4.2 Costes de consumo de agua	45
3.4.3 Costes de trabajo	45
3.4.4 Gastos fijos	46
3.5 Costes de reposición del medio	47
3.6 Costes anualizados	48
3.6.1 Costes de inversión	48
3.6.2 Costes de operación	49
3.6.3 Costes de reposición del medio	50
3.6.4 Costes totales anualizados	50
3.7 Otras estimaciones	51
3.8 Entorno de trabajo	51
<b>4. RESULTADOS</b>	<b>53</b>
4.1 Caso estándar	53
4.1.1 Costes de inversión	53
4.1.2 Costes de operación	55
4.1.3 Costes de substitución del lecho	56
4.1.4 Costes anualizados	56
4.2 Estudio de la influencia de parámetros de construcción y operación	58
4.2.1 Parámetros de entrada	58
4.2.1.1 Efecto del caudal	58

<b>4.2.1.2 Efecto del tiempo de residencia</b>	<b>62</b>
<b>4.2.1.3 Efecto del coste del medio</b>	<b>63</b>
<b>4.2.1.4 Efecto del coste del soporte</b>	<b>65</b>
<b>4.2.1.5 Efecto de la durabilidad del medio</b>	<b>66</b>
<b>4.2.1.6 Efecto del factor de seguridad</b>	<b>67</b>
<b>4.2.1.7 Efecto de los costes de excavación</b>	<b>68</b>
<b>4.2.1.8 Efecto de la altura del relleno y del soporte</b>	<b>69</b>
<b>4.2.1.9 Efecto del coste de alquiler de los equipos de excavación</b>	<b>70</b>
<b>4.2.1.10 Efecto de los costes de trabajo</b>	<b>71</b>
<b>4.2.1.11 Efecto de los gastos fijos</b>	<b>72</b>
<b>4.2.1.12 Efecto de los costes de revestimiento</b>	<b>73</b>
<b>4.2.1.13 Efecto de los parámetros dependientes del porcentaje del coste de inversión</b>	<b>74</b>
<b>4.2.1.14 Efecto del coste de electricidad</b>	<b>76</b>
<b>4.2.1.15 Efecto de la potencia de la bomba</b>	<b>77</b>
<b>4.2.1.16 Efecto de los requerimientos de agua del lecho</b>	<b>78</b>
<b>4.2.1.17 Efecto del coste del agua</b>	<b>79</b>
<b>4.2.1.18 Efecto de los gastos de manipulación del biofiltro</b>	<b>80</b>
<b>4.2.2 Resumen de parámetros de entrada</b>	<b>83</b>
<b>5. CONCLUSIONES</b>	<b>86</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>88</b>
<b>7. ANEXOS</b>	<b>91</b>
<b>7.1 ANEXO A: Resolución esquemática del caso estándar</b>	<b>91</b>
<b>7.2 ANEXO B: Costes de operación de la soplante</b>	<b>101</b>
<b>7.3 ANEXO C: Tablas</b>	<b>104</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Contaminación atmosférica

Se entiende por contaminación como el cambio necesario de las características físicas, químicas o biológicas del medio natural producido por la actividad humana. En el caso de contaminación atmosférica se define como cualquier condición atmosférica en la que determinadas substancias alcanzan ciertos niveles de concentración que producen un efecto perjudicial para las personas, plantas, animales y materiales.

Inicialmente el hombre no tenía preocupación por la contaminación causada por su actividad debido a que su nivel de producción industrial era tan bajo que generaba contaminantes en una cantidad asimilable por la atmósfera. Sin embargo el aumento de la población mundial, los avances tecnológicos y la propia sociedad de consumo han contribuido a que la industria haya aumentado su nivel de producción con un mayor consumo de energía: electricidad, gas, vapor de agua, combustible y un aumento consecuente de sus residuos. Todos estos factores han incrementado la concentración de gases contaminantes sobre todo a nivel local (ciudades, pueblos) donde se generan más contaminantes de los que el medio puede diluir en un determinado espacio de tiempo.

Actualmente nuestra sociedad empieza a tomar conciencia de la importancia de nuestro medioambiente. Se han establecido diferentes medidas legales para minimizar la producción masiva de contaminantes por parte de la industria. En general este proceso de minimización avanza lentamente debido a que las empresas necesitan un periodo de adaptación. No obstante ya se han conseguido resultados muy positivos especialmente en grandes empresas reduciendo notablemente su cantidad de contaminantes atmosféricos generados.

## 1.2 Gases contaminantes básicos

Las emisiones de gases contaminantes están empeorando la calidad del aire. En la tabla 1.1 se muestran estos gases, su procedencia y los efectos que producen sobre las personas, animales y materiales. Dichos efectos dependerán de su grado de exposición, es decir, del tiempo y la concentración a la que sean expuestos los seres vivos y materiales.

**Tabla 1.1** Gases comunes que afectan a la calidad del aire

CONTAMINANTES	FUENTES DE CONTAMINACIÓN	NATURALES	EFFECTOS
ANTROPOGÉNICAS			
Hidrocarburos	Fuentes industriales (sobre todo petrolíferas), vertidos de residuos, quemadas agrícolas, incendios	Procesos de degradación de materia orgánica en condiciones anaerobias, actividades geotérmicas	Contaminación fotoquímica, efecto invernadero, los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) son cancerígenos
Monóxido de carbono (CO)	Transporte (gasolina), fuentes estacionarias, procesos industriales, vertido de residuos, incendios y quemadas agrícolas.	Oxidación del metano, respiración de los seres vivos	Efectos sobre la salud produciendo asfixia a altas concentraciones.
Óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ )	Quema de combustible, los motores diésel emiten $\text{SO}_2$	Emisiones de volúmenes, derivado del sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) de origen biológico	Lluvia ácida (afecta a vegetales animales y materiales), favorece la aparición de bronquitis, irritan mucosas, disminuye la visibilidad
Óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ )	Motores diésel, combustión del carbón, petróleo o gas natural, y durante procesos de soldadura	Descomposición de la materia orgánica, incendios, relámpagos, $\text{NO}_x$ de capas altas de la atmósfera	Infecciones respiratorias en animales, disminución de la capacidad respiratoria, neumonía, incluso la muerte a altas concentraciones.
Oxidantes fotoquímicos	Fábricas industriales, vehículos de transporte que junto con los $\text{NO}_x$ y luz ultravioleta generan los oxidantes fotoquímicos.		Reducción de visibilidad a causa de la niebla (Smog fotoquímico), irritación en ojos y mucosas, afecciones asmáticas y broncopulmonares, crisis asmáticas y disminución de función pulmonar a altas concentraciones.
Compuestos Orgánicos Volátiles (COV'S)	Fábricas industriales, vertidos de RSU	Emisiones de los vegetales, disolvente biodegradable natural (limoneno, un cítrico)	Cancerígenos, formación de contaminantes secundarios, precursores de Smog fotoquímico, calentamiento global

## 1.3 Sistemas de tratamiento de gases

Actualmente, en nuestra sociedad industrial, muchos sectores utilizan diversos de estos sistemas de tratamiento de gases existentes. Entre ellos tenemos los equipos de absorción, los equipos de adsorción, los de oxidación térmica y catalítica, los de condensación y los sistemas biológicos.

### 1.3.1 Absorción

La absorción es un proceso de transferencia de materia en el que la parte contaminante de un gas pasa al interior de un líquido en el cual se solubiliza. Si la absorción es física el contaminante directamente se solubiliza dentro del líquido; en caso de ser absorción química el gas absorbido reaccionará con alguna especie química del líquido transformándose en una substancia soluble. De esta manera limpiamos el gas residual que expulsa una determinada empresa pasándolo a fase líquida en el que será más fácil de manipular, almacenar y tratar.

La frontera límite en el que el gas y el líquido entran en contacto recibe el nombre de interfase, a través de la cual penetra el gas contaminante introduciéndose en el seno del líquido. Para que la transferencia de materia permanezca en sus condiciones más óptimas es indispensable mantener una buena condición de equilibrio gas-líquido, una temperatura adecuada y una gran área de contacto gas-líquido.

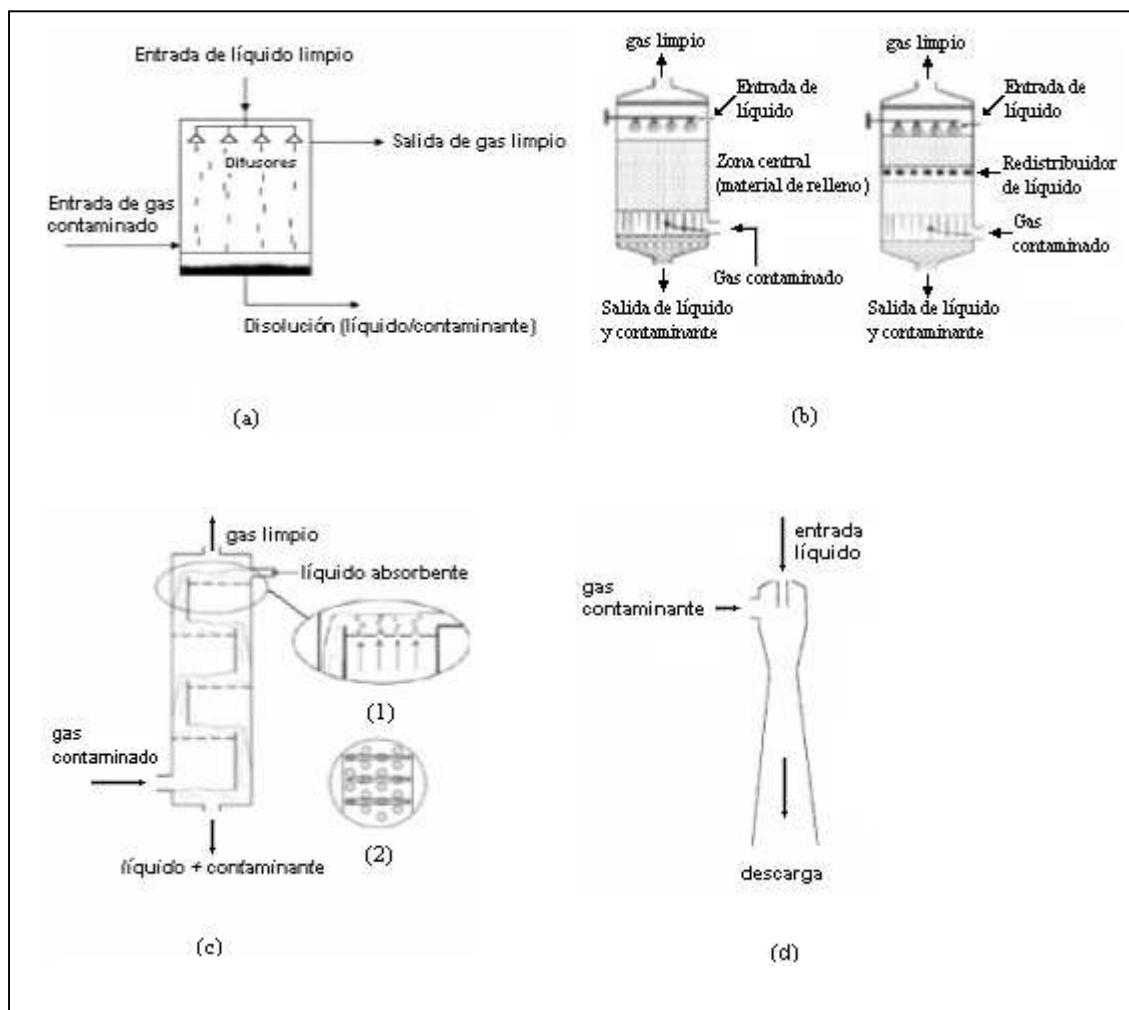
Debe intentarse que el líquido empleado en la absorción tenga una baja toxicidad, sea poco volátil, no inflamable, no corrosivo y químicamente estable para poder efectuar la operación de la forma más económica y segura posible. Un disolvente que reúne todas estas características es el agua.

Los equipos de absorción pueden emplearse para la eliminación de gases de combustión, COV's (alcohol, benceno, tolueno, etc), óxidos de azufre y nitrógeno, emisiones ácidas

(ácido clorhídrico, fluorhídrico, sulfúrico, etc) y aquellos compuestos que producen malos olores.

Para el tratamiento de gases se utilizan una serie de equipos que son más o menos adecuados según las características del gas y las condiciones económicas de la empresa.

En la figura 1.1 se ilustran los diferentes equipos de depuración de gases mediante la absorción; existen un conjunto de parámetros expuestos en la tabla 1.2 que son comunes a cada uno de estos sistemas de tratamiento. En función de estas características estimaremos según la situación cuál es el equipo más adecuado a nuestro gas.



**Figura 1.1** Equipos de tratamiento de gases por absorción. (a) Torre de difusores. El líquido entra en forma de gotas por arriba a través de difusores para aumentar el área de absorción del gas contaminante. El líquido absorbente se lleva a tratar; (b) Torres de relleno. Muy similar a la torre de difusores con la diferencia de que posee un material de relleno para aumentar el tiempo de contacto gas-líquido consiguiendo un mayor grado de absorción; c) Torre de platos. El líquido absorbente circula hacia abajo pasando por unos platos perforados (1), (2) en forma de zig-zag. El gas portador sube pasando por los agujeros entrando en el sí del líquido en forma de burbujas optimizando así su absorción; d) Lavador de Venturi. Gas y líquido entran perpendicularmente desde un extremo del tubo. Al ensancharse el tubo se aumentan las turbulencias y aumentando el rendimiento de absorción (Font, X. Curso 2005-2006. Tècniques de Tractament i Depuració d'Emissions.UAB).

**Tabla 1.2** Resumen de los equipos y algunos parámetros.

PARÁMETROS	Torre de difusores	Torre de relleno	Torre de platos	Lavador Venturi
<b>Pérdida de presión</b>	Baja	Media	Baja	Alta
<b>Coste montaje</b>	Bajo	Bajo	Alto	Medio
<b>Coste operación</b>	Bajo	Alto	Medio	Alto
<b>Coste mantenimiento</b>	Bajo	Medio/alto	Alto	Bajo
<b>Trata gases corrosivos</b>	Sí	Según material	No	Sí
<b>Eficacia</b>	Baja	Alta (variable según relleno)	Media/Baja	Alta
<b>Versatilidad</b>	Baja	Alta	Baja	Alta

### 1.3.2 Adsorción

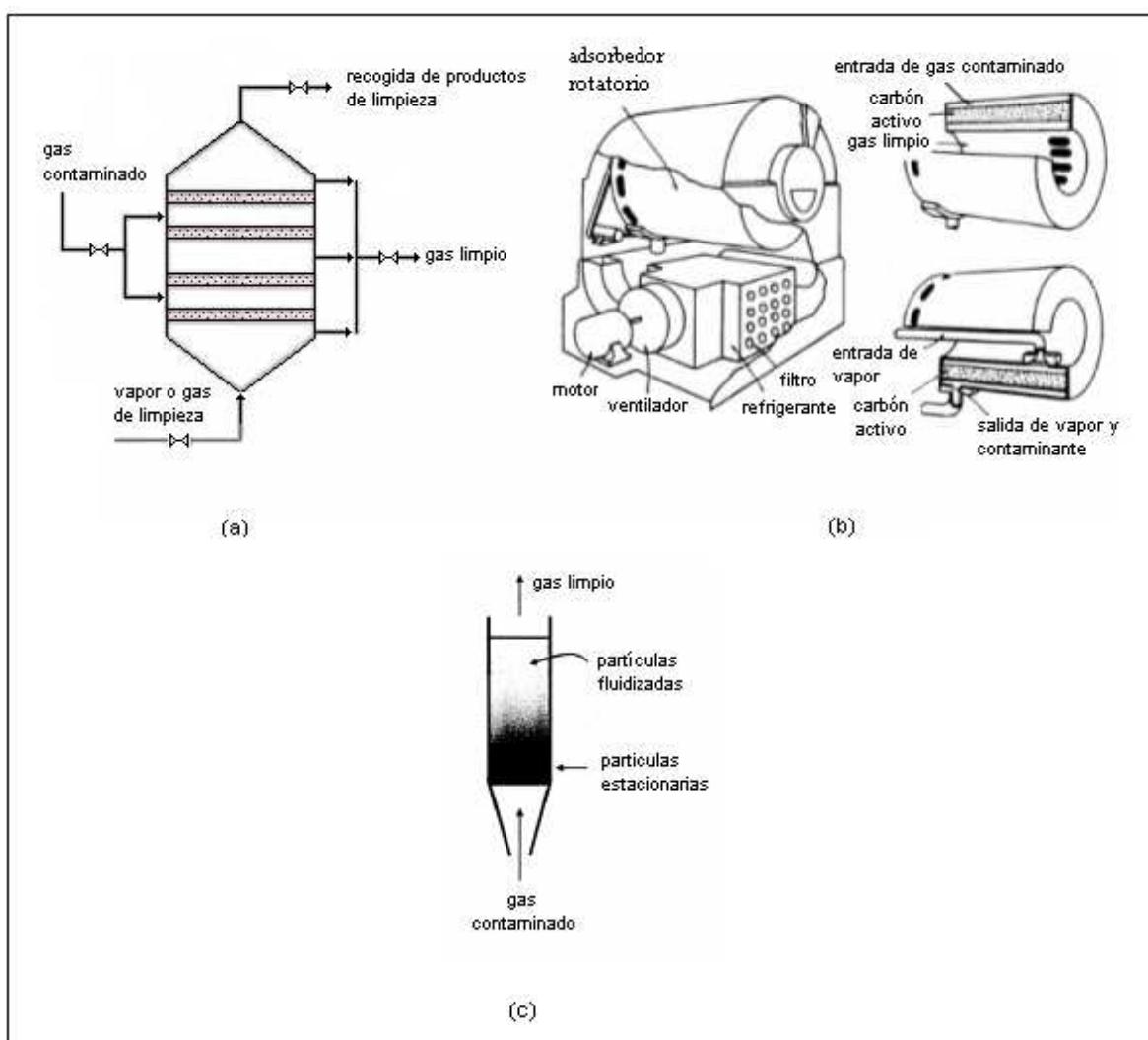
La adsorción es un fenómeno en el que un sólido llamado adsorbente retiene un fluido (adsorbato) en su superficie. El gas contaminante circula a través de un sólido en la superficie del cual condensará la parte contaminante del gas .

El medio adsorbente suele presentarse en forma de cartucho o de filtro y ha de tener un área superficial de contacto lo más grande posible para un mayor grado de adsorción. El carbón activo es uno de los materiales adsorbente más utilizados ya que posee una estructura altamente porosa con lo cual puede capturar muchas moléculas. Asimismo presenta bastante afinidad sobre compuestos orgánicos como son los hidrocarburos y disolventes. Existen otros adsorbentes como el gel de sílice, alúmina, o un tamiz molecular ,materia l mucho más selectivo.

Existen dos tipos de adsorción: la adsorción física y la adsorción química. La adsorción física se debe a la interacción de las Fuerzas de Van der Waals entre las moléculas contaminantes y las de la superficie del sólido. La unión producida por estas fuerzas es débil pero útil si se quiere regenerar posteriormente el adsorbente además de recuperar el contaminante; aumentando la temperatura, o bien la presión del gas, conseguimos la regeneración del sólido; la adsorción química es el resultado de la interacción entre las

moléculas del sólido y del contaminante. Sin embargo, la unión que se produce es mucho más fuerte, con lo que es muy difícil realizar un proceso de regeneración.

En el mercado se encuentran tres tipos estándar de equipos de tratamiento de gases por adsorción. Cada equipo presenta una serie de ventajas e inconvenientes. Por tanto elegiremos el equipo más adecuado a nuestras necesidades y características del gas portador. A continuación en la figura 1.2 representamos estos tres dispositivos: el adsorbedor de lecho fijo, el de lecho móvil y el de lecho fluidizado.



**Figura 1.2** Equipos de adsorción; a) Lecho fijo. Cámara de adsorción con cuatro cámaras de lecho adsorbente; b) Lecho móvil. Equipo de adsorción rotatorio y localización de las diferentes partes que lo conforman. A su derecha tenemos dos secciones para definir el modo en que tiene lugar la adsorción en el interior del equipo; c) Adsorbedor de lecho fluidizado. Se introducen partículas en el equipo las cuales adsorberán el gas portador (Peavy, H.S. Environmental engineering, 1985)

Esta tecnología de adsorción se utiliza para la eliminación de mezclas poco concentradas y heterogéneas. Captura componentes que deban ser reutilizados más adelante. Es, a veces, el único sistema de eliminación de gases concretos.

Dado que estos equipos no se han extendido mucho es difícil encontrar unos equipos estándar. Por este motivo convendrá hacer unas pruebas a escala piloto con el gas a depurar antes de instalar este módulo.

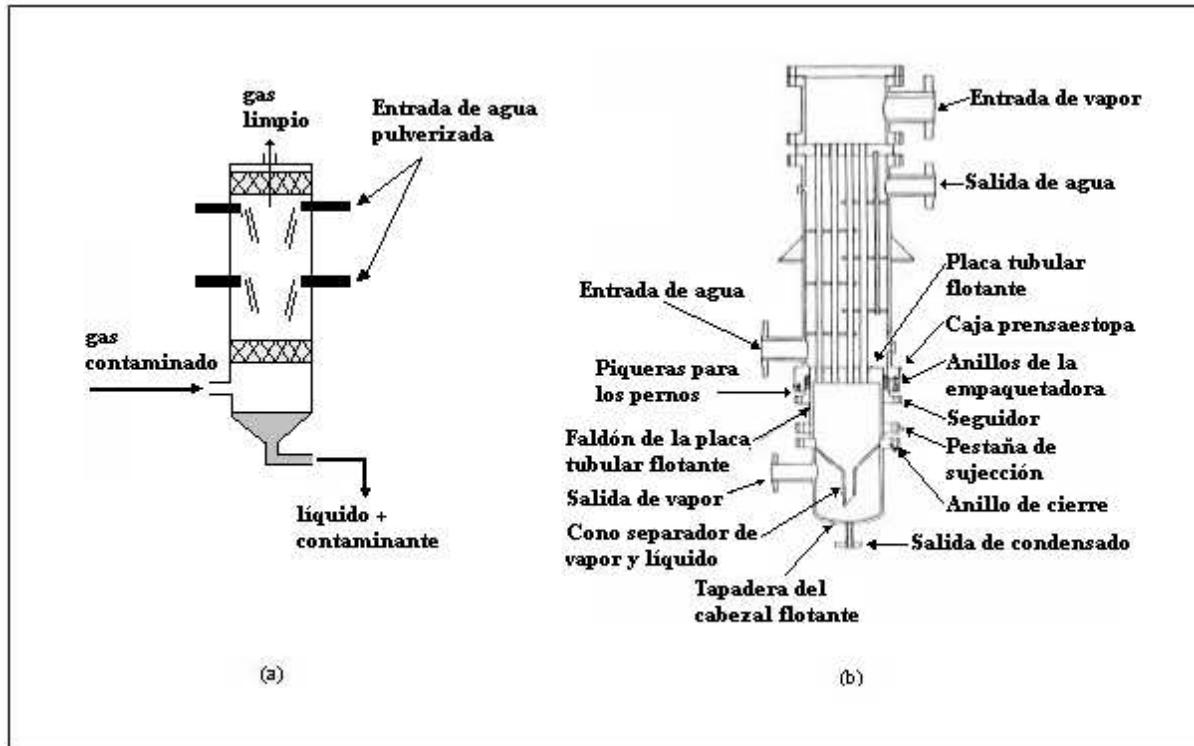
Como ventajas puede decirse que estos dispositivos funcionan automáticamente; además pueden eliminar contaminantes a concentraciones muy bajas; incluso para equipos grandes el grado de eliminación puede llegar al 99% de eficacia; los contaminantes se recuperan de forma controlada; en los casos que se recorra a un cambio en el proceso de caudal, temperatura, etc, los equipos de adsorción son flexibles adaptándose bien.

Existen una serie de inconvenientes en estos equipos: el coste de compra e instalación es relativamente elevado debido a que no se usan mucho y han de diseñarse ( $1-2 \text{ €}/\text{m}^3/\text{h}$ ); igualmente la regeneración de adsorbente necesita un aporte de vapor o vacío, lo que implica otro coste; igualmente el gas puede contener partículas que pueden taponar el lecho del adsorbente. Por tanto habrá que separar estas partículas antes de pasar el gas por el lecho; a medida que el adsorbente se va regenerando va perdiendo calidad. De modo que habrá que cambiar el lecho cada cierto tiempo.

### **1.3.3 Condensación**

Consiste en el paso a líquido la parte gaseosa contaminante mediante la variación en la presión o temperatura del gas. De esta manera tendremos por un lado el gas depurado y, por otro lado, el líquido.

La condensación del gas contaminante se puede llevar a cabo por dos métodos distintos. O bien disminuimos la temperatura o bien aumentamos la presión del sobre el gas. Incrementar la presión resulta bastante caro. Por este motivo a efectos prácticos resulta más económico disminuir la temperatura del gas.



**Figura 1.3** Equipos de condensación para depuración de gases. a) Condensador de contacto. Tal como se representa en el diagrama el gas entra en contacto con el líquido refrigerante condensando así la parte contaminante del gas. El condensado y el líquido bajan a la parte inferior y por arriba sale el gas limpio; b) Condensador de superficie. Gas contaminante y líquido refrigerante entran desde arriba. El líquido circula a través de tuberías en la superficie de las cuales condensa el contaminante cayendo con el líquido por la parte de abajo (Font, X. Curso 2005-2006. Tècniques de Tractament i Depuració d'Emissions.UAB).

Debemos determinar la cantidad de refrigerante en función del caudal de gas contaminado y la concentración de vapor. Además escogeremos el refrigerante adecuado dependiendo de la temperatura que necesitemos para conseguir la condensación del gas contaminante.

La baja eficacia de estos equipos (Figura 1.3) es motivo de que se utilicen como tratamiento previo antes de depurar el gas en otro equipo más óptimo como un adsorbedor o un incinerador. Lo mismo ocurre para la recuperación de contaminantes de baja concentración. Dado que el equipo posee baja eficiencia para bajas concentraciones es mejor utilizar otro sistema como un adsorbedor. Así recuperaremos más contaminante. Otro inconveniente a tener en cuenta es que el líquido residual que genera el condensador de contacto hay que tratarlo aparte.

En la tabla 1.3 se especifican las aplicaciones más generales de los sistemas de condensación para las industrias:

**Tabla 1.3** Aplicaciones de los condensadores en el control de la polución del aire.

Refinerías de crudo	Petroquímica	Química básica	Industrias diversas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ventilaciones de acumuladores de gasolina</li> <li>• Depósitos de almacenamiento</li> <li>• Refinado de aceites lubricantes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ventilaciones de acumuladores de polietileno gas</li> <li>• Estireno</li> <li>• Naftelatos de cobre</li> <li>• Insecticidas</li> <li>• Anhídrido ftálico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Amoníaco</li> <li>• Solución de cloro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limpieza en seco</li> <li>• Desengrasadores</li> <li>• Alquitranado</li> <li>• Eliminación de olores</li> </ul>

### 1.3.4 Oxidación térmica y oxidación catalítica

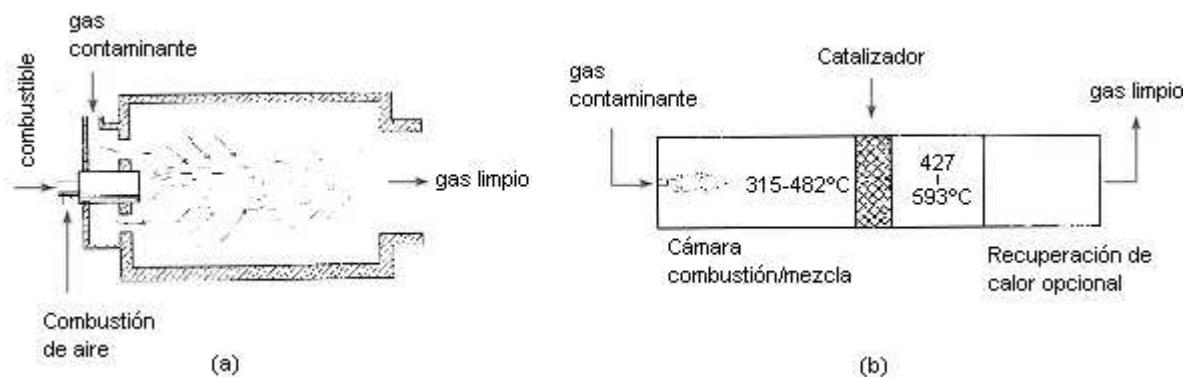
#### A. Oxidación térmica

Los sistemas de oxidación térmica son frecuentemente utilizados para una concentración de vapores orgánicos menor al 50% del límite inferior de explosividad. El equipo se basa en una cámara refractaria en cuyo interior se encuentran los quemadores que calientan el gas. Para oxidar los compuestos es indispensable alcanzar una temperatura que oscila entre 700 °C y 1000 °C (Theodore et al., 1994). Una cantidad de gas a tratar es ocasionalmente utilizado en los quemadores a fin de proporcionar el oxígeno para la combustión. Generalmente el gas natural, el propano y el butano son los combustibles empleados para los quemadores y se puede disminuir su consumo mediante sistemas de recuperación o generación de calor. En la figura 1.4a) se ilustra un proceso de oxidación térmica que ocurre en menos de un segundo variando este tiempo en función de la temperatura y las condiciones de mezclado de la cámara.

## B. Oxidación catalítica

La oxidación catalítica es similar a la oxidación térmica, sin embargo, un catalizador dentro del sistema disminuye la energía de activación requerida para la oxidación total, por lo que ésta ocurre a temperaturas menores. Estos sistemas (figura 1.4b) se utilizan cuando la concentración de los vapores orgánicos es menor del 25% de su límite inferior de explosividad, ya que con concentraciones mayores se pueden alcanzar altas temperaturas y dañar el catalizador. Las temperaturas de operación se encuentran entre los 427-593 °C. Comúnmente, los catalizadores utilizados en la oxidación de este tipo incluyen óxidos metálicos de platino, paladio o rodio. También pueden ser utilizados materiales como el pentóxido de vanadio, el dióxido de titanio o el dióxido de manganeso.

Los costes del combustible en estos sistemas son más bajos y en algunos casos es posible operar sin combustible, excepto durante el arranque; sin embargo, el catalizador tiene un precio elevado y una vida útil que debe considerarse; otro inconveniente es que la formación de partículas en la incineración puede obturar el catalizador impidiendo el paso del gas a través de él.

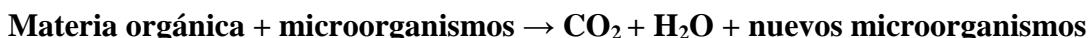


**Figura 1.4** Tratamiento de gases por oxidación. a) Oxidación térmica; b) Oxidación catalítica (Theodore et al., 1994)

### 1.3.5 Procesos biológicos

En la naturaleza existen microorganismos que se alimentan de contaminantes gaseosos. El objetivo de estos procesos biológicos es utilizar estos seres microscópicos para depurar los gases industriales o urbanos y ahorrarse de esta manera otros sistemas de tratamiento que requieren mucho aporte de energía y substancias que tratan los contaminantes. Es decir, que el coste asociado a los tratamientos biológicos es bastante menor que los demás procesos ya conocidos como la absorción, adsorción, la oxidación térmica, la oxidación catalítica y la condensación.

Los microorganismos están adheridos sobre un soporte llamado lecho. Sobre la superficie del lecho se desarrolla una biopelícula que está formado por microorganismos, agua más nutrientes. Los contaminantes se absorben en la biopelícula y los microorganismos lo degradan a dióxido de carbono y agua, que son desabsorbidos y enviados de nuevo a la atmósfera. Este proceso lo esquematizamos de la siguiente manera:



Los procesos biológicos de tratamiento de gases están pensados para trabajar en continuo para que los microorganismos puedan alimentarse siempre y no morir por falta de sustrato. Si se para el funcionamiento deja de entrar sustrato implicando la muerte de estos microorganismos. Por tanto, en caso de que el proceso deba detenerse, ha de ser por un corto espacio de tiempo.

Existen sin embargo una serie de condiciones indispensables para un buen funcionamiento de estos procesos biológicos:

*1) Conseguir una población microbiana adecuada*

Una manera de obtener la población adecuada se realiza mediante el estudio de plantas piloto en laboratorios especializados; otro modo de lograr una población óptima consiste en dejar que la naturaleza siga su curso. La especie microbiana que predominará será la que mejor se adapte a las emisiones alimentándose del contaminante. En el primer caso

tardamos menos en aclimatar a los microorganismos ya que han sido estudiados previamente a la puesta en marcha del bioreactor. Por tanto, la desventaja que tenemos en el segundo caso es que tardamos un mayor tiempo en aclimatar la cepa. No obstante dicha población se ha adaptado entre una gran diversidad de especies y es por este motivo que resiste mejor condiciones adversas.

*2) Buena adición de nutrientes*

Además del contaminante, es necesario, para el desarrollo de la población, añadir al lecho nitrógeno, potasio y fósforo en una proporción adecuada mediante fertilizantes. También otros micronutrientes menos solubles son el magnesio, calcio, hierro y sodio se añaden en menores cantidades.

*3) Tratamiento previo de separación de partículas*

En caso de que el gas contenga partículas deberemos separarlas antes de proceder al tratamiento biológico, ya que se tapona el lecho con la consecuente pérdida de presión y disminución del rendimiento del equipo.

*4) Características del gas portador:*

El contaminante ha de ser biodegradable para poder ser eliminado por los microorganismos; además no ha de ser tóxico para que no muera la población bacteriana que elimina los contaminantes; el gas ha de poder absorberse en la biopelícula donde están los microorganismos. De lo contrario el gas no podrá ser depurado. La temperatura oscilará entre 15 y 40°C. De no ser así los microorganismos o bien mueren o bien se frena su actividad microbiana y se eliminará menos cantidad de contaminante para la que el equipo fue diseñado. Los niveles de humedad han de ser bastante altos entorno al 40 o 60% del peso del material para que se mantenga la biopelícula donde viven los microorganismos. Mantener un lecho seco puede implicar la muerte de gran parte de la población microbiana y será necesario un periodo de reaclimatación. A condiciones de baja humedad se utilizan o bien humidificadores o se riega el lecho. Debemos recordar que un exceso de humedad implica un incremento de pérdida de presión y gastaremos más energía para mantener constante el caudal de emisión.

5) El *nivel de pH* deberá oscilar entre 6 y 8

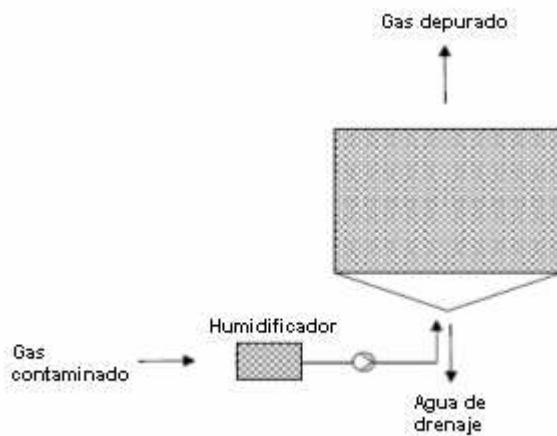
En algunos casos para el tratamiento de emisiones que contienen azufre o compuestos de azufre el rango de pH se sitúa entre 1 y 2; en varias ocasiones los microorganismos al eliminar los contaminantes desprenden al medio substancias ácidas que hacen disminuir el pH y dificultan las propias condiciones de vida de la población microbiana. En estas ocasiones se suele mezclar con el medio del lecho trozos de concha que servirán para neutralizar estos ácidos. No obstante deberán reponerse dichas conchas temporalmente. Otra técnica es verter agua sobre el lecho con mangueras de riego.

Los contaminantes que se tratan suelen ser responsables de las malas olores y pueden ser compuestos orgánicos como los COV's, sulfuros de metil y mercaptanos; o bien compuestos inorgánicos que contienen nitrógeno o azufre como el ácido sulfídrico, los óxidos de nitrógeno, amoníaco, etc.

Los equipos de tratamiento biológicos utilizados son básicamente de tres tipos: los biofiltros, los biofiltros percoladores y los biolavadores.

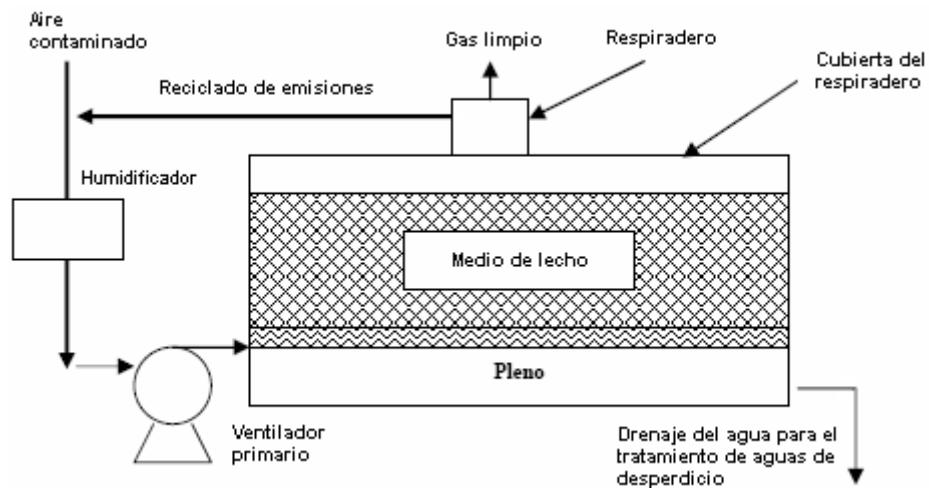
**a) Biofiltros**

Primeramente pretratamos el gas humidificándolo para mejorar la formación de la biopelícula. De esta manera los contaminantes podrán ser absorbidos en la biopelícula para que los microorganismos puedan degradarlos. Y, a la vez, optimiza las condiciones de humedad que necesitan las cepas. Seguidamente se impulsa en sentido ascensional el gas humidificado hacia el biofiltro. Parte de la biopelícula formada cae por la zona inferior del biofiltro y constituye el drenaje. Finalmente sale por la parte superior el gas depurado. En la figura 1.5 se muestra un esquema del funcionamiento de dicho equipo.



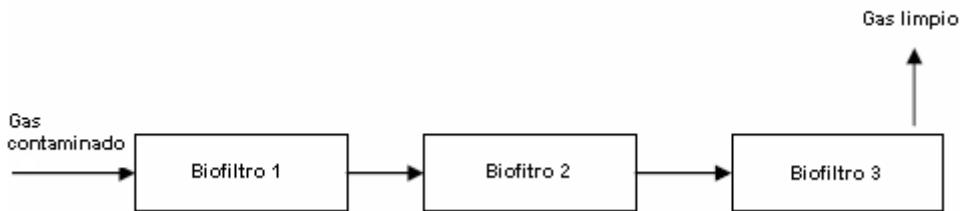
**Figura 1.5** Diagrama de flujo de un biofiltro (Font, X. Curso 2005-2006. Tècniques de Tractament i Depuració d'Emissions).

Se han ido haciendo pequeñas modificaciones a este tipo de biofiltro tradicional para suplir pequeñas deficiencias. Se ha construido una cubierta y un respiradero en la zona superior del biofiltro. Desde el respiradero sale un conducto que va a la zona inferior del lecho para recircular el gas de emisión y aumentar así el tiempo de contacto del gas con los microorganismos. Podemos observar en la figura 1.6 un esquema del proceso.



**Figura 1.6** Biofiltro con reciclado de emisiones ([www.epa.gov](http://www.epa.gov))

Si disponemos del terreno suficiente incluso podemos poner diversos biofiltros en serie en posición horizontal tal como se muestra en la figura 1.7.



**Figura 1.7 Biofiltros en serie horizontalmente (www.epa.gov)**

## Ventajas de los biofiltros

- 1) Tienen un grado de eliminación alto para determinadas substancias como son los compuestos orgánicos volátiles en general, el dióxido de azufre, el amoníaco y el sulfuro de hidrógeno.
- 2) Bajo coste de instalación del biofiltro debido a que se construye a partir de materiales comunes y bastante disponibles (fibra de vidrio, tuberías plásticas y maderas). Los pueden construir los carpinteros, plomeros o bien excavadoras.
- 3) En función del grado de pretratamiento necesario para las emisiones los costes operativos serán mayoritariamente pequeños. Dichos costes se basan en costes de electricidad para el funcionamiento de la bomba humidificadora y el soplador, la aportación de pequeñas cantidades de macronutrientes y la mano de obra para supervisar el proceso.

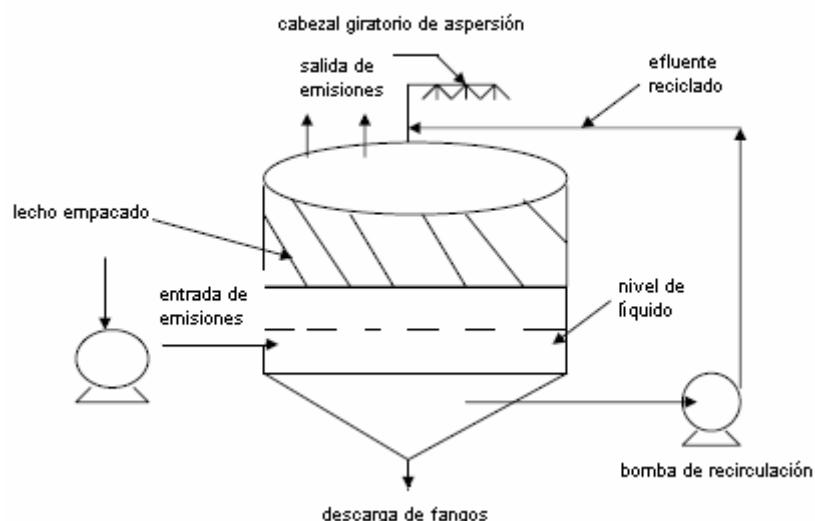
## Desventajas de los biofiltros

- 1) Requerimiento de gran cantidad de terreno en comparación con los otros procesos de tratamiento de gases. Por este motivo se tiende a construir los biofiltros verticalmente.
- 2) La falta de una cubierta que cubra el biofiltro conlleva que no sean representativas las muestras de emisiones. No obtendremos un dato claro del grado de eliminación del contaminante.
- 3) El medio del lecho ha de reponerse en un periodo que va de 2 a 5 años. Durante su reemplazo se pierde un tiempo de 2 a 6 semanas en función del tamaño del lecho.

- 4) No existe un flujo continuo de líquido para ajustar los niveles de pH o bien regular los niveles de nutrientes.

### b) Filtro biopercolador

Se trata de un equipo muy similar al biofiltro con la diferencia de que no empleamos un humidificador para el biopercolador. Mantendremos húmedo el reactor biológico añadiendo agua y nutrientes directamente en la corriente de recirculación del drenaje de agua de dicho reactor. El gas contaminado entra por la parte inferior del reactor siguiendo un sentido ascendente hacia un lecho de microorganismos que degradan la porción contaminante de gas. Este lecho es alimentado por una fase acuosa que proviene de la recirculación del agua de drenaje del mismo reactor. El gas saldrá depurado por la parte superior tal como se muestra en la figura 1.8.



**Figura 1.8** Diagrama de un filtro biopercolador en el que se muestran cada una de sus partes y su funcionamiento ([www.epa.gov](http://www.epa.gov))

A continuación se muestra una serie de datos de diseño generales para un filtro biopercolador estándar en las tablas 1.4 y tabla 1.5:

**Tabla 1.4** Características generales de los filtros biopercoladores (adaptado de [www.epa.gov](http://www.epa.gov))

Altura de empaque del lecho, m	0.91 a 1.836
Área transversal del empaque, m <sup>2</sup>	0.93 a 2973
Tasa de flujo de emisiones, m <sup>3</sup> /h	1019 a 1019406
Volumen vacío de empaque, % <sup>a</sup>	90 a 95
Tiempo de retención del gas del lecho vacío, s <sup>b</sup>	2 a 60
Caída de presión a través del lecho, pulgadas H <sub>2</sub> O	0.36 a 2
pH de la fase líquida reciclada	
Al tratar COV'S	~7 pH
Al tratar H <sub>2</sub> S	1 a 2 pH
Concentraciones de COV'S, g/m <sup>3</sup>	0.016 a 1614
Eficiencia de eliminación, %	60 a 99.9

<sup>a</sup> Usando anillos de empaque, volcados de manera aleatoria o mediante un empaque estructurado

<sup>b</sup> El tiempo de retención de gas en el lecho vacío (EBTR) se define como el volumen de lecho empacado / tasa de flujo de emisiones

**Tabla 1.5** Características de diseño para filtros biopercoladores existentes ( Adaptado de [www.epa.gov](http://www.epa.gov))

Instalación	Operación	Empaque	Dimensión del filtro		Flujo (m <sup>3</sup> /h)	EBRT (s)	$\Delta P$ en H <sub>2</sub> O	T <sub>lecho</sub> (°C)	Coste (€)	Coste op. (€/m <sup>3</sup> /h)	Eficiencia (%)
			Diámetro (m)	Altura (m)							
Hyperion	WWTP	Apilado	1,5	3,3	645	21	0,32	34	135	0,1	95
Grupo	Resinas	Apilado	3,7	11,5	44	10	1	33	404	0,3	85 - 99
Reemtsa	Tabaco	Espuma	NA	NA	170	11	6	40	2300	0,1	90
US Navy	Respiraderos combustible	Aleatorio	3	3	2973	37	5	N/A	NA	0,33	90

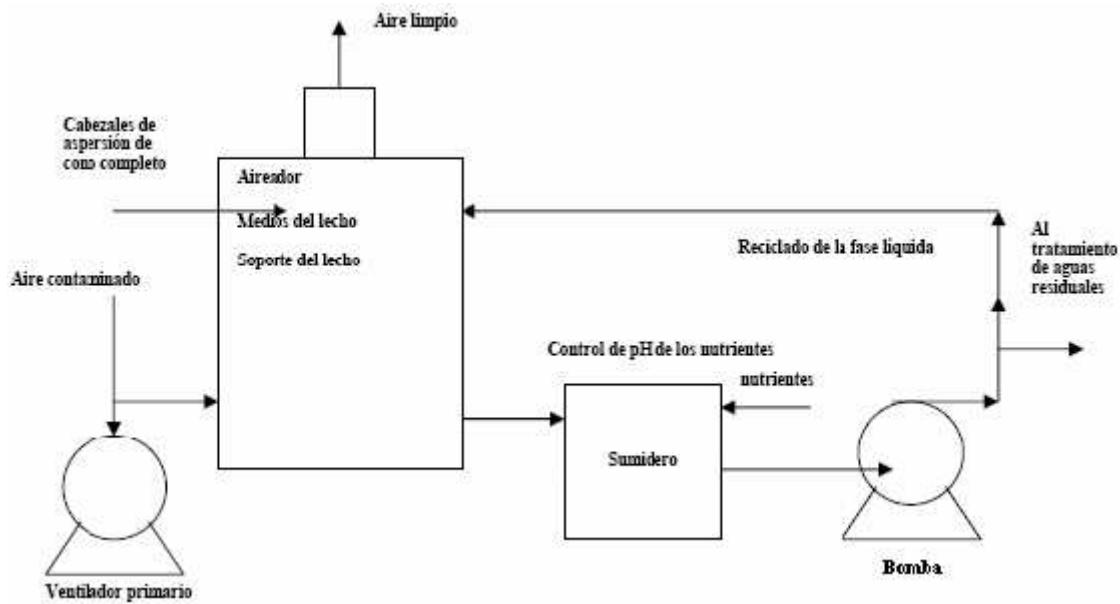
Hyperion= Hyperion Wastewater Treatment Plant, planta de tratamiento de aguas residuales Hyperion, Los Ángeles, CA

**Grupo= Grupo Cydsa Monterrey, México (celofán)**  
**Reemtsa= Berlín, Alemania (producción de cigarrillos)**  
**US Navy, North Island, San Diego, CA**

### a) Biolavador o biodepurador

En el funcionamiento de un biodepurador (figura 1.9) el aire contaminado entra por la parte de abajo de la columna de absorción y se absorben los contaminantes por medio de una solución que contiene agua, nutrientes y microorganismos. Además aireamos esta solución para oxigenar el medio ya que los microorganismos necesitan el oxígeno para degradar los contaminantes. El líquido de la torre, por acción de la gravedad, va a parar a un reactor biológico donde los microorganismos degradan la materia orgánica restante. La corriente de salida del reactor biológico se divide en dos. Una va directamente a tratamiento del efluente y la otra se recircula hacia la torre de absorción. De esta manera parte de los microorganismos que estaban en el reactor pasan a la torre de absorción y recuperamos parte de la cepa. El gas que inicialmente había entrado por la parte inferior de la columna sale por encima depurado.

El biolavador es un sistema de tratamiento de gases mejorado respecto del biofiltro y del filtro biopercolador. El perfeccionamiento de este equipo radica en una absorción de contaminantes en el seno del líquido más completa. Al estar la torre inundada de agua cuando el gas choca con el empaque forma burbujas pequeñas que aumentan el área de contacto líquido-gas. Consecuentemente se incrementa la transferencia de masa de contaminante del gas al líquido disminuyendo la concentración de contaminante en el gas; además el biodepurador consta de un reactor que aumenta el tiempo de residencia de las especies contaminantes en el líquido. Consecuentemente, los microorganismos tienen más tiempo para degradar estos contaminantes.



**Figura 1.9** Sinopsis del tratamiento de gases aerobio de un biodepurador ([www.epa.gov](http://www.epa.gov))

## Ventajas de los biodepuradores

- Gracias a la automatización del control de nutrientes y del pH no requiere tanta atención como los otros tratamientos biológicos.
- Adecuado para emisiones con partículas en suspensión
- La base del biolavador es más pequeña que los otros biorreactores. Por este motivo es más apropiado para naves que tienen poca disponibilidad de espacio.
- Nos ahorraremos el coste de instalación de un equipo humidificador ya que la torre de absorción está inundada de líquido por donde pasará el gas.
- El biodepurador es ideal para emisiones de contaminantes que al tratarse emiten ácidos en la solución absorbente.

## Desventajas de los biodepuradores

- a) Los sistemas de alimentación y neutralización son costosos y complejos.
- b) El biodepurador puede taponarse debido al exceso de biomasa generado a causa de una sobrealimentación.
- c) Es necesario realizar un inventario y manipular los compuestos tóxicos y peligrosos a fin de controlar correctamente el crecimiento de la biomasa.
- d) Se caracteriza por un alto coste de instalación.
- e) Puede tener un coste operativo más elevado que los anteriores biorreactores.
- f) Requiere una elevada solubilidad de las especies contaminantes.

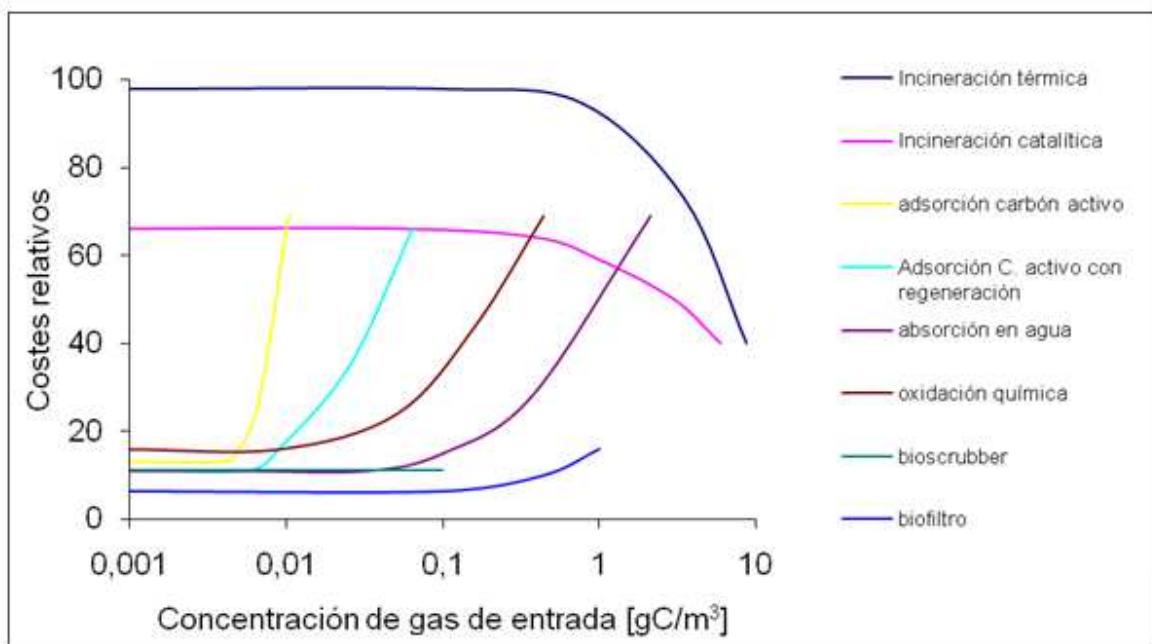
## 1.4 Comparativa económica

La elección de la técnica o conjunto de técnicas utilizadas para la depuración de gases dependerá de su eficiencia requerida y los aspectos económicos envueltos. En la figura 1.10 se compara el coste de tratamiento (a una escala arbitraria) frente a la concentración del gas de entrada para una serie de diferentes técnicas discutidas. Uno puede ver que los procesos biológicos, particularmente los biofiltros, son los más económicos, especialmente cuando las corrientes contaminadas apenas requieren tratamiento.

Las elecciones técnicas y la evaluación de costes de tratamiento requieren un comprensivo conocimiento de la corriente del gas para ser tratado particularmente:

- Caudal de gas residual
- Composición y concentración del gas contaminante
- Eficiencia de eliminación requerida
- Fluctuaciones en la composición y el caudal del gas contaminante
- Modo de operación (continuo/discontinuo)
- Temperatura y humedad relativa del gas a tratar
- Rangos de inflamabilidad y explosividad del gas residual
- Contenido en polvo y aceite del gas a tratar
- Biodegradabilidad de los contaminantes presentes
- Solubilidad del gas contaminante en el seno del líquido.

Hasta donde las técnicas biológicas son consideradas, el último criterio es extremadamente complejo para evaluar, particularmente cuando hay que eliminar multicomponentes. La biodegradabilidad de cada contaminante individual ha de tener en cuenta la parte o completa inhibición del proceso biológico para todos los compuestos químicos presentes en el ámbito del proceso.



**Figura 1.10** Comparación de los costes relativos de diversas técnicas de purificación de gas residual. Caudal de gas 40,000 m<sup>3</sup>/h, nivel de precio 1982 (Deshusses, 1994). La concentración de gas de entrada está expresada en términos de gramos de carbono por metro cúbico.

## **A. Factores que influyen en el coste de la instalación de una unidad de biofiltración**

- Tipo de biofiltro (abierto o cerrado), naturaleza del material filtrante y espacio disponible para su instalación.
- Equipamientos y unidades necesarias para el pretratamiento del aire en lo alto del biofiltro y de los emplazamientos
- Localización de la fuente de contaminación
- Accesorios (bombas, tuberías...) materiales empleados y recién salidos de la construcción de la unidad y de los equipamientos anexos necesarios para el emplazamiento del sistema.
- Grado de control automático deseado
- Salida de aire, naturaleza y concentración de los contaminantes definidos en el efluente del aire a tratar y tasa de recogida requerido.

## **B. Factores de influencia del coste de operación de un biofiltro**

- Consumo energético: ventilación del aire, bomba de agua por la irrigación del lecho, pretratamiento del aire.
- Naturaleza del material filtrante y su tiempo de vida.
- Inspecciones periódicas y medidas regulares para estimar el estado de un lecho filtrante: temperatura, tasa de humedad, nutrientes y pH.
- Coste de mantenimiento y del ajuste de las condiciones de la operación
- Cantidad y coste del tratamiento del agua de drenaje
- Coste del mantenimiento de los diferentes equipos de la unidad.

En la tabla 1.6 se muestran las diferentes tecnologías utilizadas para depurar el gas contaminante. Separamos los costes en costes de operación y de instalación en unidades de €/m<sup>3</sup>/h.

**Tabla 1.6** Coste de capital y coste de operación para el tratamiento del aire por biofiltración (Williams y Boyette 1995) y por otros procedimientos (Ruddy y Carroll 1993).

Método de tratamiento	Coste capital ( €/m <sup>3</sup> /h)	Coste operación anual (€/m <sup>3</sup> /h)
<b>Biofiltración</b>	1,6 a 7,6 (a cielo abierto)	1,3 a 8,9
	2 a 12 (a cubierto)	
	10 a 23 (cerrado)	
<b>Condensación</b>	6,5 a 51	13 a 76
<b>Absorción</b>	10 a 44	16 a 76
<b>Incineración térmica</b>	6,5 a 128 (recuperación)	10 a 58
	19 a 288 (regeneración)	13 a 95
<b>Incineración catalítica</b>	13 a 163 (lecho fijo)	6,5 a 48
	22 a 141 (lecho fluidizado)	10 a 58

Por los valores estimados de la tabla 1.6 podemos concluir que para el tratamiento de emisiones los procesos de incineración son globalmente más caros sobre todo a nivel de coste de inversión; además se observa que el coste de funcionamiento de un equipo de absorción es bastante barato. No obstante su coste de inversión es relativamente alto, al igual que las tecnologías tradicionales. Por tanto, partiendo de los datos de referencia de la tabla, podemos concluir que los procesos biológicos de depuración de gases poseen generalmente un coste de inversión y operación más baratos que las otras tecnologías.

## 1.5 Costes y consideraciones económicas del biofiltro

La razón de la utilización de un biofiltro frente a otras técnicas de tratamiento de gases (absorción, adsorción,etc) es su bajo coste a nivel de construcción y operación. Los valores de costes de inversión y operación de figura 1.10 y la tabla 1.6 verifican que globalmente se cumple que los tratamientos biológicos resultan más económicos.

Antes de realizar la estimación de costes para el tratamiento de un gas residual lo primero que deberemos tener en cuenta es el grado de eliminación establecido por ley. De lo contrario podríamos superar el límite legal de emisión y ser sancionados económicoamente. En base a ésto, dentro del diseño de nuestro equipo, priorizaremos el grado de eliminación requerido legalmente. Seguidamente optimizaremos los costes de inversión y operación del biofiltro.

Los costes capitales (de inversión) incluyen todos los sistemas de equipamiento y trabajo para construir y instalar el reactor. Los costes de operación proceden del consumo de energía, mantenimiento, y el lugar de emplazamiento. Algunos costes generales pueden ser establecidos. Sin embargo, es difícil la estimación de costes de inversión y de operación a causa de las diferentes corrientes gaseosas residuales, los requerimientos de rendimiento y los sistemas de diseño. Usando un simple modelo, un ensayo y una optimización del diseño de un biofiltro para minimizar los costes ha sido realizado con algún éxito (Gerrard, 1997). Desafortunadamente esta aproximación para economizar un sistema de biofiltración requiere de muchas aproximaciones.

### **1.5.1 Costes de inversión**

Existen un conjunto de factores a tener en cuenta a la hora de realizar una estimación de los costes de inversión:

*a) Biofiltros abiertos o cerrados*

Los biofiltros abiertos se caracterizan por diseños sencillos generalmente y, consecuentemente, son más baratos que los sistemas cerrados, los cuales son más complejos. Se basan en una mayor automatización con más mecanismos de control de parámetros del sistema. Estos factores provocan un coste adicional para los biofiltros cerrados.

*b) Disminución del coste por unidad a mayor dimensionamiento del equipo*

Al aumentar el volumen de nuestro equipo habitualmente, el requerimiento de la mayor parte de materiales que constituyen nuestro sistema se agrandan también. No obstante, existe un fenómeno de mercado en el que el coste por unidad de venta disminuye a razón del incremento de la cantidad vendida. Los costes de un reactor pequeño ( $100\text{ m}^3$ ) se han estimado a  $1085\text{-}3800\text{ €/m}^3$  de lecho. En cambio para un reactor más grande ( $3000\text{ m}^3$ ) el precio del reactor se sitúa en un rango de  $325\text{-}1085\text{ €/m}^3$  (Adaptado de Van Lith et al., 1997)

*c) Coste por unidad de volumen de aire tratado*

A menudo los costes de inversión se calculan en función del volumen de aire tratado por el biofiltro. Se ha observado que, para un caudal constante, los costes de inversión son

menores al disminuir el tiempo de residencia. Resulta bastante lógico llegar a esta conclusión si nos fijamos en la misma definición matemática de tiempo de residencia:

$$\boxed{\tau = \frac{V}{Q}}$$

*$\tau$  = tiempo de residencia (s)  
 $V$  = volumen del reactor ( $m^3$ )    (ecuación 1.1)  
 $Q$  = caudal ( $m^3/s$ )*

Vemos que, siendo el caudal constante, para que disminuya el tiempo de residencia obligatoriamente ha de decrecer el volumen; consiguientemente el coste de inversión del reactor es menor al ser éste más pequeño. Los costes de inversión en función del aire tratado oscila en unos valores aproximados de 5-163 €/ $m^3/h$ , con un promedio de 8-38 €/ $m^3/h$ . (Adaptado de Jol and Dragt, 1988; Fouhy, 1992; Deshusses, 1994; van Lith et al., 1997)

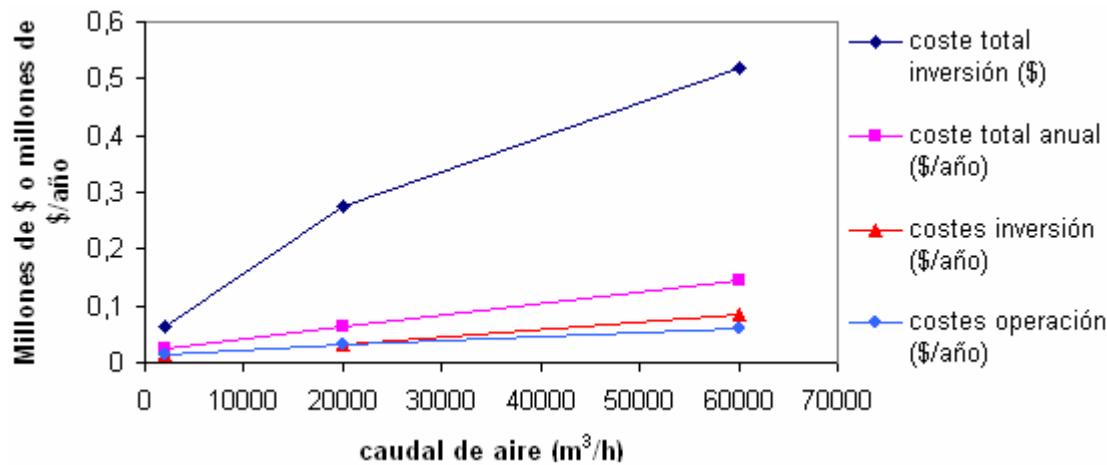
#### *d) Degradabilidad de los contaminantes*

Los costes de inversión de los equipos que tratan una corriente de gas compuesta por contaminantes fácilmente biodegradables son más económicos que los que depuran contaminantes difíciles de biodegradar (Figura 1.11-1.14).

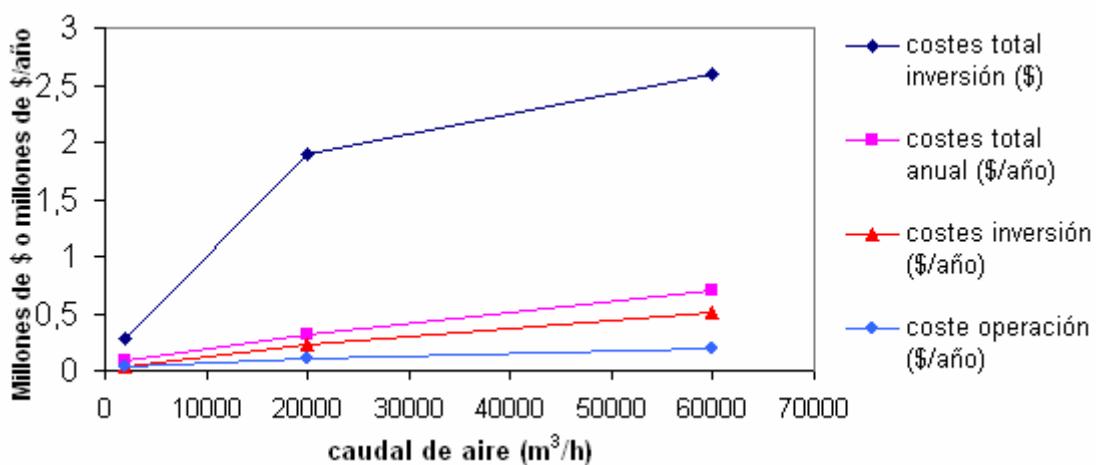
### **1.5.2 Costes de operación**

Los costes de operación son primeramente función del consumo de energía, consumo de agua y tratamiento, requerimientos de monitorización, mantenimiento, y cambio del medio (compost, turba, corteza, etc). Todos estos costes varían de un sistema a otro. Sin embargo, los costes generalizados han sido llevados sobre un rango de 0.11-3.25 €/1000  $m^3$  de aire residual tratado (Adaptado de Jol and Dragt, 1988; Eitner, 1990; Fouhy, 1992; Deshusses, 1994). La proporción de gasto atribuido a cada coste varía basándose en el diseño del sistema y la corriente de aire que está siendo tratada. Igual que los costes de inversión, los costes de operación son función del tipo de contaminante tratado (figuras 1.11-1.14). Las corrientes de aire con contaminantes fácilmente biodegradables posiblemente requieren de un volumen de lecho más pequeño, minimizando la demanda eléctrica, el agua de consumo, y monitorización y mantenimiento requerido para operar eficientemente. Sistemas más grandes serán necesarios para tratar contaminantes más conflictivos. Tales sistemas tendrán una mayor pérdida de presión, incrementando la demanda eléctrica. Además, requerirán de más agua para mantener la humedad necesaria de un lecho más

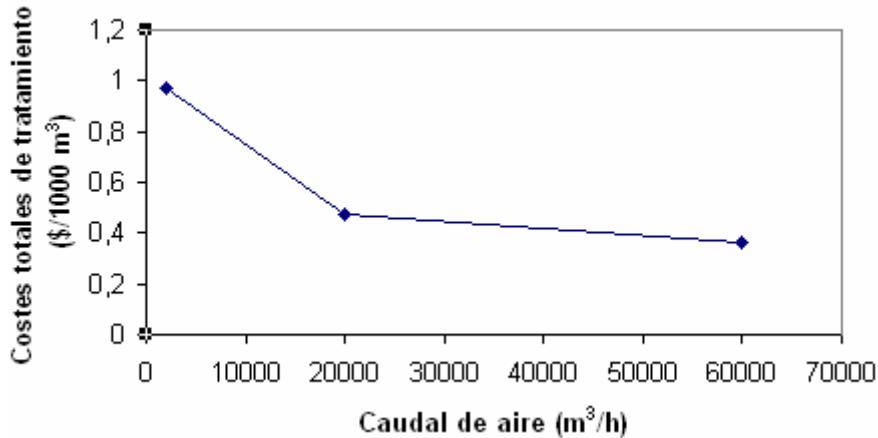
grande. Finalmente, la monitorización y el mantenimiento requerirá de más tiempo y podría implicar personal adicional para operar el sistema eficazmente.



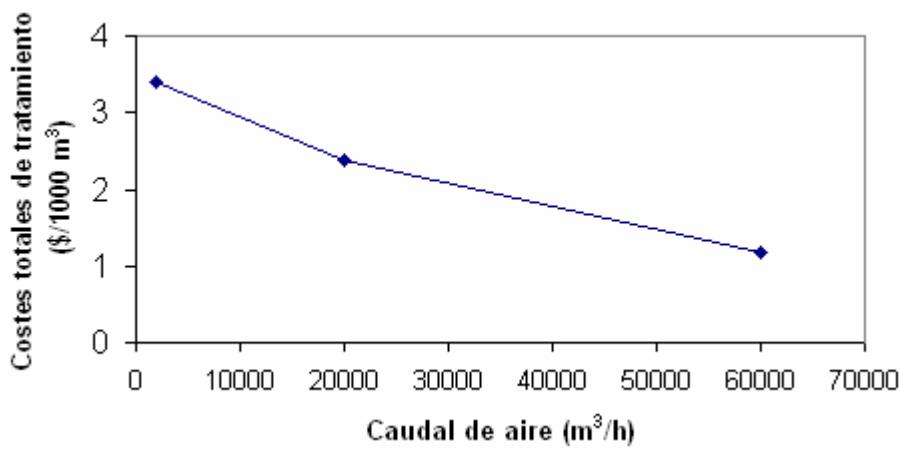
**Figura 1.11** Costes anuales totales en función del caudal de entrada de gas que contiene contaminantes fácilmente biodegradables (Devinny, 1999).



**Figura 1.12** Costes anuales totales en función del caudal de entrada de gas que contiene contaminantes difícilmente biodegradables (Devinny, 1999).



**Figura 1.13** Coste anual de tratamiento de un volumen base de gas fácilmente biodegradable en función de su caudal (Devinny, 1999).



**Figura 1.14** Coste total de tratamiento de un volumen base de gas difícilmente biodegradable en función de su caudal (Devinny, 1999).

### **1.5.2.1 Consumo de energía**

El consumo de energía de un biofiltro es una parte substancial de los costes de operación. Equipamiento eléctrico tal como bombas de agua, equipamiento analítico, y equipamiento de ordenadores requerirán de electricidad; no obstante, la mayoría de los costes eléctricos se originan a causa de la soplante. La pérdida de presión a través del conducto de aire de entrada, la cámara de humidificación, y el lecho, crea un incremento de la demanda eléctrica. La pérdida de presión a través del conducto puede ser minimizado por limitadas curvas y aumentando el diámetro de la conducción. Una gran proporción de esta demanda eléctrica es función de la porosidad, contenido de humedad, y estructura del lecho. Cuando el material destruye con el tiempo, la demanda eléctrica se incrementa. Generalmente, biofiltros de compost, lodos/tierra o medio inorgánico operarán con pérdida de presión menor que 500 Pa y 1500 Pa respectivamente. Un incremento en la pérdida de presión corresponderá a un substancial aumento en el consumo eléctrico.

### **1.5.2.2 Consumo de agua y tratamiento**

Una gran humidificación del gas residual o una gran demanda de riego incrementará los costes de operación. Agua potable es generalmente barata a moderadamente cara (0.1 a 0.7 €/m<sup>3</sup>). Estos costes podrían ser significativos si un biofiltro se implementa en un área donde el agua es escasa o si una purga significante de un humidificador es necesario para mantener una baja concentración de partículas. Si la disponibilidad de agua es buena, los costes de agua no serán significativos para los costes de operación. Los costes de operación asociados a la formación de lixiviado debería ser mínimo porque las cantidades deben de ser pequeñas. Incluso para altas DBO o lixiviados ácidos, una planta local de tratamiento de agua residual es capaz de tratar el agua de manera barata. Para lixiviados que no son considerados dañinos pueden ser reciclados a la parte superior del lecho para ayudar a reducir costes. Si no hay partículas presentes, el agua condensada generada por el enfriamiento de la corriente de gas, se podría reutilizar para regar el lecho; de lo contrario el agua requerirá tratamiento y incrementará los gastos operacionales.

### **1.5.2.3 Monitorización y mantenimiento**

La rutinaria monitorización y mantenimiento dependerá de la complejidad del sistema. Diseños que tienen muestreo automático de aire y control de humedad requerirán de menos interacción del operador que aquéllos sin tales características. Ésto reducirá el volumen de trabajo para la operación del sistema pero requerirá de un mayor capital de inversión. Los análisis de costes son necesarios para evaluar los beneficios de un sistema de monitorización más complejo. En el caso de sistemas de diseño más pobres donde el canal de aire o la frecuencia de perturbaciones ocurren, se necesitará más mantenimiento para resolver los problemas. Para sistemas que son localizados en sitios remotos, el mantenimiento será más caro. Tales costes de operación justifican los altos costes de inversión requeridos para automatizar un sistema.

### **1.5.2.4 Recambio del medio**

El medio orgánico se repone en un tiempo situado entre los tres y siete años (Devinny, 1997). Cuando el medio envejece, contribuye a la pérdida de presión y incrementa la demanda de electricidad. El medio de repuesto es una tarea de demanda, y el tiempo de eliminación y reposición, trabajo requerido, y coste medio variará basándose en el tamaño del reactor y el medio utilizado. Sistemas diseñados para medios de acceso fácil producirán ahorros substanciales de costes en términos de requerimientos de trabajo. Adicionalmente, un medio inorgánico especializado podría haber extendido el tiempo de vida del lecho y rendido más fiablemente pero requerirá un más alto capital inicial de inversión.

## 2. OBJETIVOS

A continuación, mediante una metodología clara y coherente, basada principalmente en la metodología propuesta en el libro “Biofiltration for Air Pollution Control” de Devinny Joseph S. del año 1999, relacionaremos unos parámetros de entrada o diseño del biofiltro con sus costes de construcción y operación. Aplicaremos a un caso de real de un biofiltro estándar e implementaremos dicha metodología para determinar sus costes aproximados.

Efectuaremos un análisis profundo del grado de influencia que poseen los parámetros de entrada sobre los costes del biofiltro. Se construirán gráficas en la que se relacionarán diferentes parámetros que incidirán sobre los costes finales. De este modo se logrará crear un juicio crítico y adecuado a la hora de escoger y manipular algunas variables específicas del biofiltro (caudal, tiempo de residencia, etc).

No sólo se estudiará el equipo biológico de tratamiento de gases a nivel de relacionar diferentes parámetros de diseño del equipo sino que además se aportará una visión financiera. Veremos pues cómo afectará la devaluación de la moneda y el interés sobre los pagos anuales.

Precisamente, gracias a todos estos factores económicos se transmite una perspectiva más real en cuanto a los gastos que generan estos equipos a nivel empresarial. Consecuentemente se podrá implementar un biofiltro, en el caso de que las condiciones lo permitan, de manera factible para que su funcionamiento resulte rentable y favorecer así la empresa más competitiva y medioambiental.

## 3. METODOLOGIA

### 3.1 Introducción

En este apartado se desarrollará un procedimiento de cálculo que nos ayudará a determinar los costes de construcción y operación del biofiltro por separado. Se establecerán una serie de diagramas y ecuaciones que nos serán útiles para relacionar ciertos valores de entrada de nuestro equipo con los costes capitales y operacionales.

La metodología y muchos datos económicos están basados principalmente en la metodología propuesta en el libro “Biofiltration for Air Pollution Control” de Devinny Joseph S. del año 1999. Por tanto expondremos los datos de precios de manera actualizada al año 2010 . En el siguiente apartado se explica cómo obtener esta actualización de precios mediante la ecuación 3.1

Existen además otros datos adicionales que no son propios de la bibliografía mencionada en el párrafo anterior. La fuente de estos datos quedará explícita en el texto y sus valores quedarán actualizados a nuestro presente año.

Cabe comentar que esta metodología está pensada para el caso de un biofiltro abierto y enterrado en el suelo. Con lo que sus costes son bastante reducidos en comparación con otro tipo de biofiltros como pueden ser cerrados, en serie o en paralelo, los cuales requieren de mayores gastos. Por tanto no resulta aconsejable utilizar esta sistemática de cálculo de costes en el caso de tener un tipo de biofiltro diferente al mencionado.

Por último remarcar que en este proyecto se han estudiado los costes económicos de construcción y operación únicamente. No se han incluido los costes previos a la construcción de un biofiltro. Antes de construir el biofiltro posiblemente es necesario construir o comprar un biofiltro a escala piloto y realizar estudios para optimizar el rendimiento del futuro biofiltro. Además según las condiciones climáticas del lugar la puesta en marcha del biofiltro construido puede durar de unos cuantos días a unos meses y estos aspectos y otros implican un coste adicional.

### 3.2 Actualización de datos económicos

Con el paso del tiempo los precios van aumentando progresivamente debido a la pérdida del valor del dinero. Se ha conseguido estimar anualmente el aumento de precios teniendo en cuenta su tasa de inflación K.

Tendremos un año de referencia en el que un producto o servicio tendrá un precio inicial  $P_0$ . Al cabo de n años dicho producto o servicio habrá aumentado hasta un precio  $P_n$  mediante la siguiente expresión:

$$P_n = P_0 \cdot (1 + K)^n \quad (\text{€})$$

(ecuación 3.1)

### 3.3 Costes de inversión

Para evaluar los costes de inversión es necesario tener en cuenta toda una serie de factores que intervienen ocasionando dichos gastos. Deberemos conocer, los datos de entrada para poder así proceder a determinar todos los gastos capitales. Dividiremos los costes de inversión en:

- A. Costes de preparación de emplazamiento
- B. Costes del medio
- C. Costes de equipamiento
- D. Coste de tuberías
- E. Coste de electricidad
- F. Coste de instalación
- G. Coste de ingeniería de diseño
- H. Coste revestimiento requerido del biofiltro
- I. Coste de mobilización y demovilización de personal de construcción y equipamiento
- J. Otros costes

## A. Costes de preparación del emplazamiento

El biofiltro que estudiaremos está colocado bajo tierra y abierto. Por consiguiente hemos de determinar el coste que nos supondrá la excavación de tierra para introducir nuestro equipo.

Primero de todo antes de hacer el orificio debemos saber sus dimensiones. Es decir que calcularemos el volumen del biofiltro a partir del concepto de tiempo de residencia que ya explicamos en la ecuación 1.1:

$$\tau = \frac{V}{Q} \Rightarrow V = Q \cdot \tau$$

Donde:

$\tau$  = tiempo de residencia del gas (h)

$V$  = volumen del medio del lecho ( $m^3$ )

$Q$  = Caudal del gas ( $m^3/h$ )

Ocurre frecuentemente que el biofiltro no depura al 100% los contaminantes que se estimaron. El factor de seguridad (FS) es un valor que se aplica para aumentar el volumen del medio tal como se muestra en la ecuación 3.2. De este modo se asegura alcanzar el porcentaje de eliminación mínimo de contaminantes para el que fue diseñado el equipo. Al aumentar el medio, también se incrementa la población bacteriana y, por tanto, existe una mayor eliminación de contaminantes. Normalmente se asume un cierto valor del factor de seguridad que va entre 0.1 y 0.4:

$$V_{seg} = V \cdot (1 + FS)$$

(ecuación 3.2)

Donde:

$V_{seg}$  = volumen de seguridad ( $m^3$ )

FS= Factor de Seguridad (adimensional)

Además del medio, el sistema de tratamiento consta de una grava en la parte inferior del biofiltro. Esta grava desempeña el papel de mejorar la turbulencia de la entrada del gas al medio. Como consecuencia tendremos un mejor contacto gas-líquido optimizando la depuración. En el dimensionamiento de la excavación también deberemos por tanto tener en cuenta este volumen de soporte.

$$V_{sop} = H_{sop} \cdot W \cdot L$$

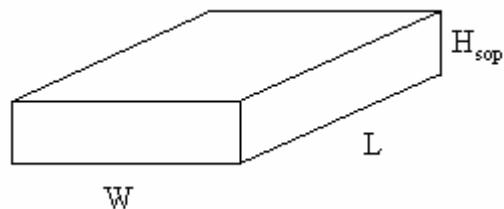
(ecuación 3.3)

Donde:

$W$ = ancho del biofiltro (m)

$L$ = longitud (m)

$H_{sop}$ = altura del soporte (m)



**Figura 3.1** Representación esquemática del soporte

Una vez hemos calculado el volumen que ocupan la grava y el medio sobredimensionado obtenemos el volumen y el coste de excavación total .

$$V_{exc} = V_{seg} + V_{sop}$$

(ecuación 3.4)

$$C_{empl} = C_{exc} \cdot V_{exc}$$

(ecuación 3.5)

Donde:

$V_{exc}$ = volumen de excavación ( $m^3$ )

$C_{exc}$ = coste de excavación de  $1 m^3$  de tierra ( $\text{€}/m^3$ ) \*

$C_{empl}$ = coste total de excavación (€)

(\*) Dentro del coste de excavación por metro cúbico de terreno se incluye el equipamiento necesario, su trabajo, los costes de disposición. Asumimos una distancia de un radio de 7 km respecto del sitio donde llevamos la tierra a disposición. El coste de excavación estimado es de  $14 \text{ €}/m^3$  (Fuente empresa COPISA, Barcelona).

## B. Costes del medio

El medio está compuesto por el relleno con el que se alimentan los microorganismos (compost, turba, etc) y por el soporte (roca, grava, etc). En función del precio de ambos por unidad de volumen obtendremos el coste de los medios:

$$C_{rell}^* = C_{rell} \cdot V_{seg} \quad (\text{ecuación 3.6})$$

$$C_{sop}^* = C_{sop} \cdot V_{sop} \quad (\text{ecuación 3.7})$$

Donde:

$C_{rell}$  = coste del relleno por unidad de volumen del mismo ( $\text{€}/\text{m}^3$ )

$C_{rell}^*$  = coste total del relleno ( $\text{€}$ )

$C_{sop}$  = coste del soporte por unidad de volumen de la misma ( $\text{€}/\text{m}^3$ )

$C_{sop}^*$  = coste total del soporte ( $\text{€}$ )

Al coste del relleno,  $C_{rell}$ , le asumimos un valor de  $40.15 \text{ €}/\text{m}^3$  y al del soporte,  $C_{sop}$ ,  $35.81 \text{ €}/\text{m}^3$  (Devinny et al., 1999).

Dentro de los costes del medio hay que añadir los gastos de instalación del medio en los que se incluyen: los costes de alquiler de equipamiento , de trabajo y de beneficio/costes operativos.

$$C_{alq}^* = C_{alq} \cdot V_{exc} \quad (\text{ecuación 3.8})$$

$$C_{trab}^* = C_{trab} \cdot V_{exc} \quad (\text{ecuación 3.9})$$

Donde:

$C_{alq}$  = coste de alquiler de equipamiento por unidad de volumen excavado ( $\text{€}/\text{m}^3$ )

$C'_{alq}$  = coste de alquiler de equipamiento ( $\text{€}$ )

$C_{trab}$  = coste de trabajo por unidad de volumen excavado ( $\text{€}/\text{m}^3$ )

$C'_{trab}$  = coste de trabajo ( $\text{€}$ )

Los costes de alquiler de equipamiento,  $C_{alq}$ , tienen un valor de  $0.76 \text{ €}/\text{m}^3$ ; los de trabajo equivalen a  $1.19 \text{ €}/\text{m}^3$  (Devinny et al.,1999)

Los gastos fijos ( $C_{ben}$ ) dependen de la empresa. En los cálculos posteriores supondremos un valor estimativo medio de  $2.71 \text{ €}/\text{m}^3$  (Devinny et al.,1999). De modo que estableceremos el coste final de los gastos fijos( $C'_{ben}$ ) mediante esta relación:

$$C'_{ben} = C_{ben} \cdot V_{exc} \quad (\text{ecuación 3.10})$$

A continuación procedemos a determinar el coste de instalación del medio M ( $\text{€}$ ):

$$M = (C_{alq} + C_{trab} + C_{ben}) \cdot V_{exc} \quad (\text{ecuación 3.11})$$

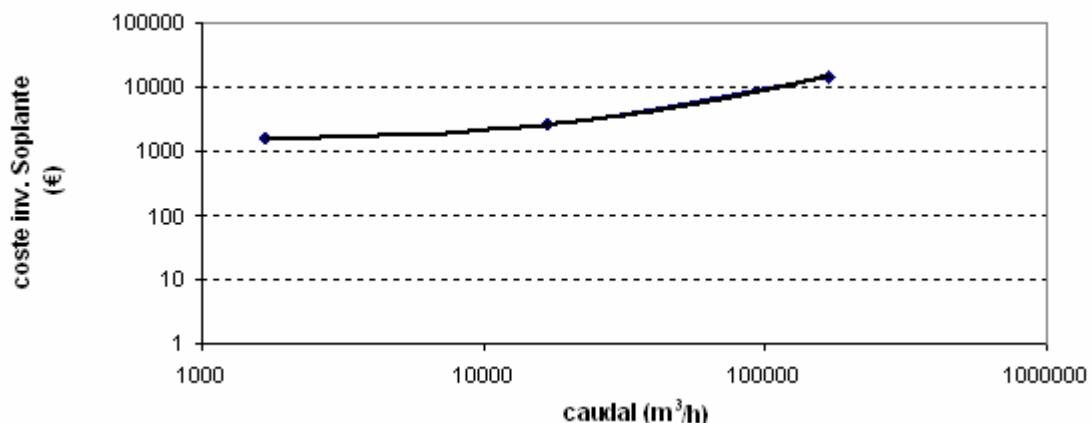
Finalmente obtenemos el coste total del medio a partir de sus diferentes componentes (soporte, grava, instalación).

$$\text{Coste total del medio} = C'_{rell} + C'_{sop} + M \quad (\text{ecuación 3.12})$$

## C. Costes de equipamiento

El biofiltro consta de una bomba para humidificar la corriente de gas de entrada y una soplante para impulsar el gas residual hacia el lecho. Estos dos equipos, bomba y soplante, poseen unos costes que dependerán del caudal de fluido que se implemente.

Hemos estimado que sobredimensionando los parámetros de diseño de la bomba humidificadora el coste de la bomba ( $C_b$ ) no pasará de los 850 € (Prado, O., Investigador del Departament d'Enginyeria Química, UAB) ; en cuanto a la soplante utilizaremos una referencia bibliográfica que se basará en la figura 3.2:



**Figura 3.2** Representación gráfica del coste de inversión de una soplante en función de su caudal. Stone et al.(1991) en su libro ilustraron tanto estos costes de inversión como los de otros equipos dependiendo de sus diferentes parámetros de diseño. En esta gráfica hemos pasado todo a unidades del SI y hemos escogido el tipo de soplante “centrifugal backward-curved”.

Esta función logarítmica nos servirá para determinar el coste de inversión de la soplante dependiendo del caudal con el que se introduzca el gas residual al biofiltro. La gráfica anterior corresponde a la siguiente ecuación:

$$Y = 8 \cdot 10^{-8} \cdot x^2 + 0.0666 \cdot x + 1446.7$$

(ecuación 3.13)

Siendo **Y** el coste de inversión de la soplante (€) y **x** su caudal ( $m^3/h$ ).

El coste capital de los equipos impulsores de fluidos,  $C_m$  será la suma del coste de inversión de la soplante (€) y de la bomba humidificadora (€):

$$C_m = C_b + Y$$

(ecuación 3.14)

## D. Tuberías

$$C_{tub} = 0.10 \cdot X$$

(ecuación 3.15)

Siendo X el coste de inversión total (€) y  $C_{tub}$  el coste de inversión de las tuberías (€).

Devinny et al. (1999) estimaron el coste de las tuberías mediante un porcentaje respecto del coste de inversión.

## E. Material eléctrico

$$C_{elect} = 0.04 \cdot X$$

(ecuación 3.16)

Siendo X el coste de inversión total (€) y  $C_{elect}$  el coste de inversión eléctrico (€). Este porcentaje respecto el coste de inversión es estimativo (Devinny et al., 1999)

## F. Equipamiento de instalación

$$C_{equip} = 0.04 \cdot X$$

(ecuación 3.17)

Siendo X el coste de inversión total (€) y  $C_{equip}$  el coste de instalación de equipos (€). Este porcentaje respecto el coste de inversión es estimativo (Devinny et al., 1999)

## G. Ingeniería de diseño

$$C_{dis} = 0.12 \cdot X$$

(ecuación 3.18)

Siendo X el coste de inversión total (€) y  $C_{dis}$  el coste de ingeniería de diseño (€). Este porcentaje respecto el coste de inversión es estimativo (Devinny et al., 1999)

## H. Revestimiento del biofiltro

El biofiltro que estudiamos es paralelepípedo, es decir, que posee seis paralelogramos cuyas caras opuestas son iguales y paralelas. La cara de arriba no la tendremos en cuenta debido a que el equipo está abierto por la parte superior. Por tanto tendremos un paralelepípedo de cinco caras en las que cuatro serán iguales, es decir, igual área, y la otra será desigual con un área distinta.

$$A_{rev} = W \cdot L + 2 \cdot H \cdot L + 2 \cdot H \cdot W \Rightarrow$$

$\Rightarrow$

$$A_{rev} = W \cdot L + 2 \cdot H \cdot (L + W)$$

(ecuación 3.19)

Siendo:

$A_{rev}$  = área de revestimiento del biofiltro ( $m^2$ )

W = ancho del biofiltro (m)

L = largo del biofiltro (m)

H= altura del biofiltro (m)

Los valores de H generalmente se sitúan entorno a 1-2 metros (Devinny et al., 1999). A menos de 1 metro no se suele obtener el grado de eliminación deseado y a más de 2 metros la pérdida de carga es bastante grande. Con lo que el aumento de los costes de consumo energético se dispara; en cuanto a los valores L y W serán función del espacio físico disponible en la fábrica, las condiciones de operación, el factor de seguridad y el tiempo de residencia necesario para que los microorganismos eliminen los contaminantes. Nos basaremos en la ecuación 1.1 del tiempo de residencia para obtener W y L:

$$\tau_{seg} = \frac{V_{seg}}{Q} = \frac{W \cdot L \cdot H \cdot (1 + FS)}{Q} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{\tau_{seg} = \frac{W \cdot L \cdot H \cdot (1 + FS)}{Q}} \quad (\text{ecuación 3.20})$$

El tiempo de residencia  $\tau_{seg}$ , el caudal Q de operación, H y el factor de seguridad FS son parámetros conocidos. Por tanto en la ecuación 3.20 únicamente nos faltarán hallar los valores de W y L. Existen dos opciones, o bien suponer un valor razonable de uno (L/W) y después hallar el otro aisladolo de la ecuación anterior; o bien, que será el caso que estudiaremos, W y L son iguales dado que supondremos que el biofiltro tiene base cuadrada. Por tanto en la ecuación 3.20 sólo tendremos una incógnita:

$$\tau_{seg} = \frac{W \cdot L \cdot H \cdot (1 + FS)}{Q} \Rightarrow \tau_{seg} = \frac{W^2 \cdot H \cdot (1 + FS)}{Q} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{W = \sqrt{\frac{\tau_{seg} \cdot Q}{H \cdot (1 + FS)}} = L} \quad (\text{ecuación 3.21})$$

Una vez estimado el área del revestimiento del biofiltro sólo nos faltará determinar su coste. Para ello hemos de considerar el coste el revestimiento por unidad de superficie

$$C'_{rev} = C_{rev} \cdot A_{rev}$$

(ecuación 3.22)

Siendo:

$C'_{rev}$  = coste total del revestimiento del biofiltro (€)

$C_{rev}$  = coste del revestimiento por unidad de superficie (€/m<sup>2</sup>) \*

$A_{rev}$  = área total del revestimiento (m<sup>2</sup>)

(\*) El coste del revestimiento es de 23.87 €/m<sup>2</sup> (Adaptado de Devinny et al., 1999)

## I. Movilización y retirada de personal de construcción y equipamiento

Estos costes constituyen suma total de 5425€ (Adaptado de Devinny et al., 1999)

## J. Otros costes diversos ( $C_{div}$ ) para permisos, licencias, materiales de repuesto, etc

Estos costes constituyen suma total de 5425€ (Adaptado de Devinny et al., 1999)

A continuación calcularemos el coste total de inversión X (€) sumando los valores anteriores obtenidos. Recordemos que varios costes son función de los costes de inversión totales. De manera que al realizar la suma del coste total tendremos una ecuación en la que deberemos despejar nuestra incógnita de interés.

$$X = C_{empl} + B + C_{buf} + C_{hum} + C_{tub} + C_{elect} + C_{equip} + C_{dis} + C'_{rev} + I + C_{div} \Rightarrow$$

$$X = C_{empl} + B + C_{buf} + C_{hum} + 0.1 \cdot X + 0.04 \cdot X + 0.04 \cdot X + 0.12 \cdot X + C'_{rev} + I + C_{div} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow X = \frac{C_{empl} + B + C_{buf} + C_{hum} + C'_{rev} + I + C_{div}}{0.7}$$

(ecuación 3.23)

Donde:

$C_{empl}$  = costes de emplazamiento (€)

$B$  = costes del medio (€)

$C_{buf}$  = costes de inversión de la soplante (€)

$C_{hum}$  = costes de inversión de la bomba de humidificación (€)

$C'_{rev}$  = coste de revestimiento del biofiltro (€)

$I$  = costes de movilización y desmovilización de personal y equipamiento (€)

$C_{div}$  = costes varios o diversos (€)

$C_{div}$  = costes de las tuberías (€)

$C_{equip}$  = costes de equipamiento de instalación (€)

$C_{dis}$  = costes de diseño de ingeniería (€)

$C_{elect}$  = costes de material eléctrico (€)

Finalmente resolvemos el valor de los costes de material eléctrico, de diseño de ingeniería , de tuberías y de instalación de equipamiento aplicando las relaciones de estos costes en función del coste total de inversión.

## 3.4 Costes de operación y mantenimiento

### 3.4.1 Costes de electricidad

La soplante y la bomba de humidificación son las responsables del consumo eléctrico del biofiltro en el transporte del gas contaminante y del agua de riego respectivamente. Al trabajar en un sistema en continuo tanto la soplante como la bomba trabajarán las 24 horas del día durante 365 días al año.

Hemos estudiado un tipo de bomba que necesita una potencia  $Pot_{bomba} = 0.25$  CV para un caudal de gas  $Q = 17000 \text{ m}^3/\text{h}$ , un tiempo de residencia  $\tau = 70\text{s}$  y un factor de seguridad  $FS = 0.2$  (Devinny et al., 1999). Mediante la ecuación 3.24 podemos calcular la potencia de la bomba en función del caudal de gas.

$$Pot_{bomba} = \frac{0.25 \cdot 0.091 \cdot Q \cdot \tau \cdot (1 + FS)}{3600 \cdot 36.1} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Pot_{bomba} = 1.75 \cdot 10^{-7} \cdot Q \cdot \tau \cdot (1 + FS) \quad (\text{ecuación 3.24})$$

Siendo  $Pot_{bomba}$  la potencia de la bomba en CV;  $Q$  el caudal de la soplante en  $\text{m}^3/\text{h}$  y  $\tau$  el tiempo de residencia en segundos.

Por tanto partiendo de este procedimiento de cálculo del coste eléctrico podemos establecer una relación entre el coste eléctrico y de la potencia valiéndonos de la ecuación 3.25.

$$C_{bomba}^{elect} = \text{coste eléct} \left( \frac{\text{€}}{\text{kW} \cdot \text{h}} \right) \cdot Pot_{bomba}(\text{CV}) \cdot \frac{0.75 \text{ kW}}{1 \text{ CV}} \cdot \frac{365 \text{ d}}{1 \text{ año}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} =$$

$$C_{bomba}^{elect} = 6570 \cdot \text{coste eléct} \cdot Pot_{bomba} \quad (\text{ecuación 3.25})$$

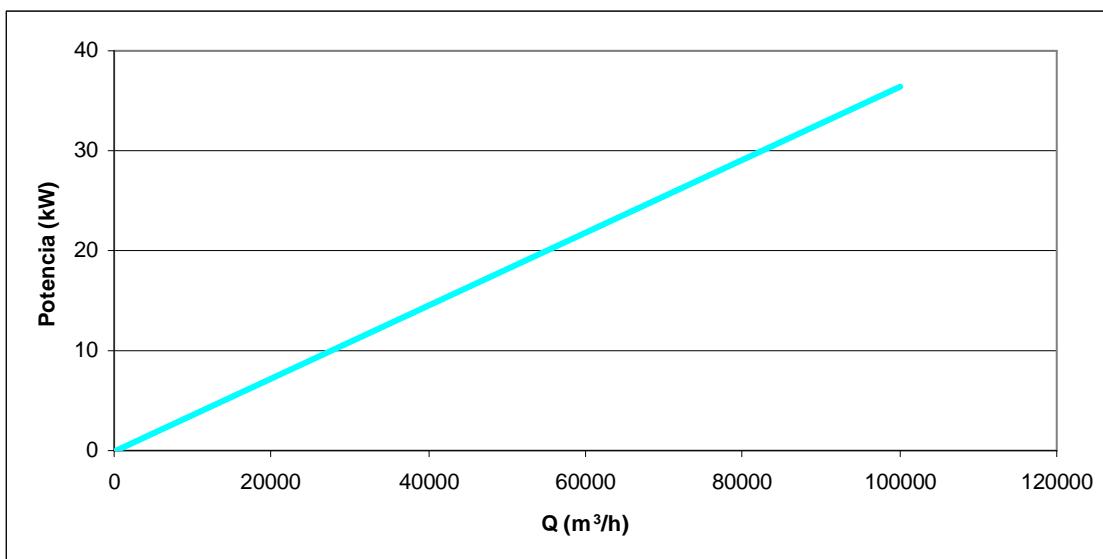
Donde:

$$C_{\text{bomba}}^{\text{elect}} = \text{coste de electricidad de la bomba} (\text{€/año})$$

$$\text{coste eléct.} = \text{coste de la electricidad} \left( \frac{\text{€}}{\text{KW} \cdot \text{h}} \right) = 0.08681 \frac{\text{euros}}{\text{Kilowatts} \cdot \text{hora}}$$

(Adaptado de Devinny et al., 1999)

Para determinar el coste eléctrico de la soplante utilizamos la gráfica de la figura 3.3. A partir del caudal de operación y escogiendo la recta adecuada podremos saber la potencia de consumo de la soplante y su coste.



**Figura 3.3** Consumo de una soplante en función del caudal de gas a tratar. En el anexo B se explica cómo se ha obtenido este diagrama.

La ecuación de la recta de este diagrama responde a la siguiente expresión:

$$\text{Potencia soplante (KW)} = 3.649 \cdot 10^{-4} \cdot \text{caudal}(\text{m}^3 / \text{h})$$

(ecuación 3.26)

Asimismo, una vez hemos determinado la potencia de consumo, seguiremos con la obtención del coste anual de operación de dicha soplante,  $C_{\text{soplante}}^{\text{elect}}$ .

$$\text{Pot(KW)} \cdot \frac{365d}{1a} \cdot \frac{24h}{1d} \cdot \text{coste eléct.} \left( \frac{\text{€}}{\text{KW} \cdot \text{h}} \right) = C_{\text{soplante}}^{\text{elect}} \left( \frac{\text{€}}{a} \right)$$

(ecuación 3.27)

Para acabar con el coste eléctrico sumaremos el coste total anual eléctrico,  $C_{total}^{elect}$ , ocasionado por la bomba de humidificación y la soplante:

$$C_{total}^{elect} = C_{bomba}^{elect} + C_{soplante}^{elect}$$

(ecuación 3.28)

### 3.4.2 Costes de consumo de agua

En este apartado determinaremos el coste anual del agua que gastamos para humidificar el lecho del biofiltro. Asumimos que la entrada del aire contaminante ya posee un 50% de humedad y que el coste del agua,  $C_a$ , es de 0.7596 €/m<sup>3</sup> (adaptado de Devinny et al., 1999). Otro dato importante es el caudal de agua  $Q_a$  (m<sup>3</sup>/semana) que deberá atravesar semanalmente un área transversal del biofiltro ( $V_{H_2O}$ ), que es de 0.091 m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O/semana/m<sup>2</sup> superficie (adaptado de Devinny, 1999).

$$Q_a = V_{seg} \cdot V_{H_2O}$$

(ecuación 3.29)

En función de la cantidad de agua necesaria obtenemos el coste de consumo de agua anual  $C'_a$  (€/año):

$$C'_a = \frac{365 \cdot Q_a \cdot C_a}{7}$$

(ecuación 3.30)

### 3.4.3 Costes de trabajo

Vamos a estimar que un sistema de tratamiento de gases como el biofiltro solamente necesita a una persona para su mantenimiento y operación. Además a este equipo se le dedicará una hora diaria de trabajo y el operario cobrará unos 21.7 €/hora (adaptado de Devinny, 1999).

Con estos datos previos comentados podemos establecer los costes de trabajo anualizados:

$$365 \cdot n^{\circ} \text{ horas trabajo diario} \cdot \text{salario trabajador} (\text{€/h}) \cdot n^{\circ} \text{ trabajadores} = \text{costes de trabajo}$$

(ecuación 3.31)

$$\frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año} \cdot 1 \text{ trabajador}} \cdot \frac{1 \text{ hora}}{1 \text{ día}} \cdot \frac{15.385 \text{ €}}{1 \text{ hora}} \cdot 1 \text{ trabajador} = 7921 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

### 3.4.4 Gastos fijos

Se ha valorado que los gastos fijos equivalen al 25% de los costes de trabajo (Devinny et al., 1999). Por tanto, basándonos en los costes de trabajo anteriormente calculados, los gastos fijos se determinan de esta manera:

$$\text{Gastos fijos} = \text{costes de trabajo} \cdot \frac{25}{100}$$

(ecuación 3.32)

Por consiguiente:

$$\text{Gastos fijos} = 7921 \frac{\text{€}}{\text{año}} \cdot \frac{25}{100} = 1980 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

Los costes de operación totales anuales serán la suma de los costes anuales de electricidad, de consumo de agua, de trabajo y de gastos fijos.

$$\text{Costes operación anual} = \text{costes de electricidad} + \text{costes de consumo agua} + \text{costes de trabajo} + \text{gastos fijos}$$

(ecuación 3.33)

### 3.5 Costes de reposición del medio

El proceso de biofiltración requiere de un cambio del medio aproximadamente entre 2 y 5 años. Pasado este periodo el rendimiento de eliminación de contaminantes se reduce superando los límites de contaminación para los que fue diseñado. Al cambiar el medio tienen lugar dos operaciones principales. En la primera se extrae el medio que contiene el biofiltro y, en la segunda, añadimos el nuevo medio.

En la acción de retirar el medio utilizado hay que excavar la tierra, transportarla al lugar de tratamiento y tratarla. El precio de estas tres operaciones,  $C_{exc}$ , se engloba en una cantidad de 14€/m<sup>3</sup> (Fuente empresa COPISA, Barcelona)

$$C_{extr}^{med} = V_{seg} \cdot C_{exc}$$

(ecuación 3.34)

Donde:

$C_{extr}^{med}$  = coste de extracción del medio (€)

$V_{seg}$  = volumen del medio (m<sup>3</sup>)

En la inserción del nuevo medio dentro del biofiltro existen una serie de gastos en los que se incluye la compra del medio, el equipamiento utilizado, el trabajo empleado y los gastos fijos. El medio que utilizaremos será el compost que tiene un precio de 40.15 €/m<sup>3</sup> ( $C_{rell}$ ), y el coste de equipamiento ( $C_{alq}$ ) 0.76 €/m<sup>3</sup>, el coste de trabajo ( $C_{trab}$ ) 1.19 €/m<sup>3</sup> y los gastos fijos ( $C_{ben}$ ) 2.71 €/m<sup>3</sup> ( adaptado de Devinny et al., 1999) . En la ecuación 3.35 se muestra el método para calcular el coste de adición del medio ( $C_{ad}^{med}$ ).

$$C_{ad}^{med} = (C_{rell} + C_{alq} + C_{trab} + C_{ben}) \cdot V_{seg}$$

(ecuación 3.35)

Para finalizar el coste total de la reposición del medio ( $C_{med}^{rep}$ ) cada 2-5 años será la suma de el coste de extracción y de adición del medio:

$$C_{rep}^{med} = C_{extr}^{med} + C_{ad}^{med} \quad (\text{€}) \quad \text{(ecuación 3.36)}$$

## 3.6 Costes anualizados

### 3.6.1 Costes de inversión

En los costes de inversión anualizados vamos a suponer que tendremos un 8% de interés a 15 años. Es decir, que pediremos un préstamo al banco y le pagaremos anualmente. Aplicando la ecuación 3.23 obtenemos el coste de inversión anual.

$$C_{capital}^{anualiz} = X \cdot (A/P, 8\%, 15) \quad (\text{€/año}) \quad \text{(ecuación 3.37)}$$

X= coste de inversión (€) correspondiente a la ecuación 3.23

$C_{capital}^{anualiz}$  = coste de capital anualizado

$$A/P = \frac{\text{pago anual}}{\text{valor presente del dinero}} = \frac{i(i+1)^n}{(1+i)^n - 1} \quad \text{(ecuación 3.38)}$$

Siendo **n** el número de años en que se paga el préstamo y **i** el interés en tanto por uno.

### 3.6.2 Costes de operación anualizados

Cabe comentar que en los costes de operación anualizados aparece otro parámetro importante que es el índice de inflación. La inflación supone que existe un aumento sostenido del precio de los bienes en general.

En nuestro caso supondremos que tendremos un 3.5% de índice de inflación en el transcurso de los 15 años. De modo que el total de los costes de operación teniendo en cuenta la inflación serán de:

$$\text{Coste operación total en 15 años} = \sum_1^n \text{Coste anual de operación} (F / P, 3.5\%, 15)$$

(ecuación 3.39)

F/P es el parámetro que tiene en cuenta la inflación de los costes de operación.

$$\frac{F}{P} = \frac{\text{coste futuro del valor del dinero}}{\text{coste presente}} = (1 + \text{índice de inflación})^n$$

(ecuación 3.40)

Sabiendo el sumatorio de los costes totales de operación durante 15 años (ecuación 3.39), obtenemos el promedio de los costes de operación anuales. Cada año este coste es diferente ya que va en aumento a causa de la inflación.

$$\frac{\text{Coste total a 15 años}}{15 \text{ años}} = C_{op}^{anualiz}$$

(ecuación 3.41)

Siendo:

$$C_{op}^{anualiz} = \text{Costes de operación anualizados (\text{€}/año)}$$

### 3.6.3 Costes de reposición del medio

Asumimos un 3.5% de inflación y un 8% de interés a 15 años, por lo que el medio será cambiado después de 5 y 10 años.

$$C_{med}^{anualiz} = C_{rep}^{med} \cdot (F / P, 3.5\%, 5) \cdot (P / F, 8\%, 5) \cdot (A / P, 8\%, 15) + C_{rep}^{med} \cdot (F / P, 3.5\%, 10) \cdot (P / F, 8\%, 10) \cdot (A / P, 8\%, 15)$$

(ecuación 3.42)

### 3.6.4 Costes totales anualizados

Finalmente obtenemos el coste final anual que deberemos pagar y será la suma de los costes de inversión, operación y reemplazo del relleno. La exactitud de esta ecuación final tendrá un error de un 20%. (Devinny et al., 1999).

$$C_{totales}^{anualiz} = C_{capital}^{anualiz} + C_{op}^{anualiz} + C_{med}^{anualiz}$$

(ecuación 3.43)

### 3.7 Otras estimaciones de costes

$$\text{Coste de inversión por unidad de volumen} = \frac{X}{V_{seg}} \quad (\text{€/m}^3) \quad (\text{ecuación 3.44})$$

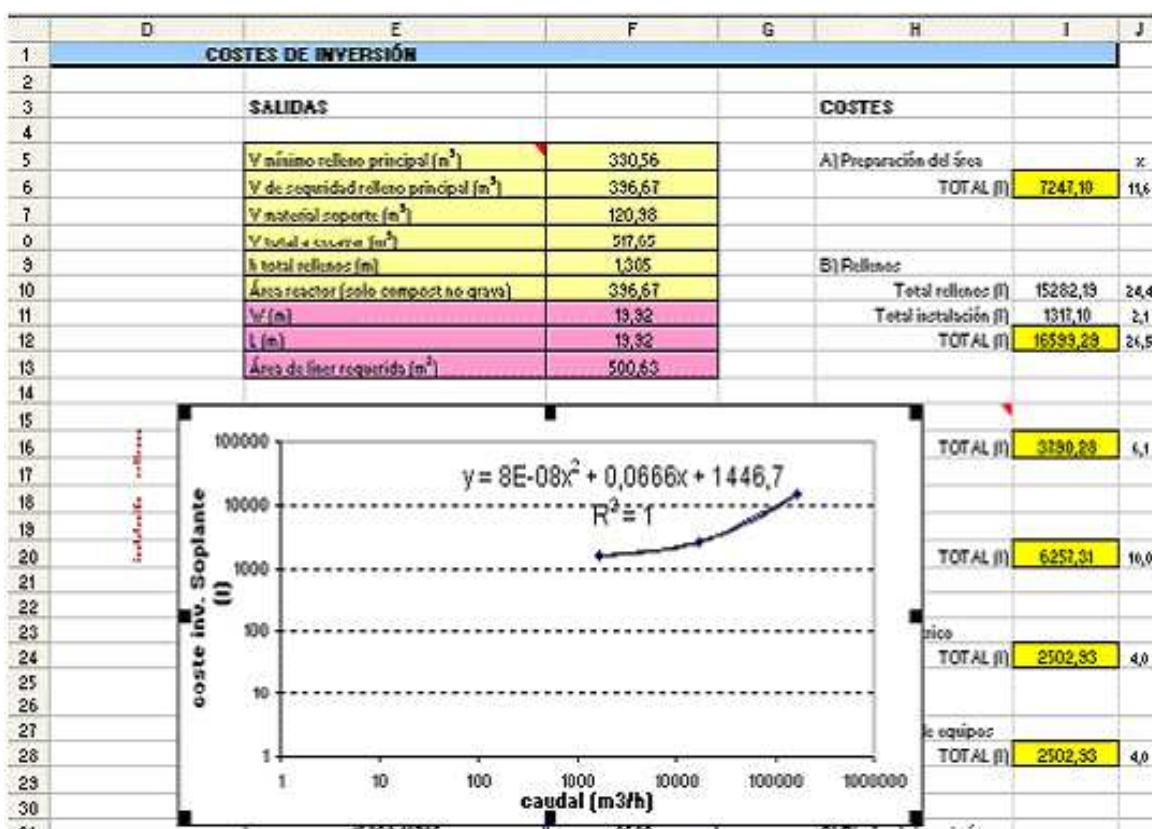
$$\text{Coste de inversión por unidad de caudal} = \frac{X}{Q} \quad (\text{€/m}^3/\text{h}) \quad (\text{ecuación 3.45})$$

$$\frac{\text{Coste de operación}}{1000\text{m}^3 \text{aire tratado}} = \frac{1000 \cdot C_{op}^{año}}{Q \cdot 365 \cdot 24} \quad (\text{€/1000 m}^3 \text{ aire tratado}) \quad (\text{ecuación 3.46})$$

$$\frac{\text{Coste total anualizado}}{1000\text{m}^3 \text{aire tratado}} = \frac{1000 \cdot C_{total}^{anualiz}}{Q \cdot 365 \cdot 24} \quad (\text{€/1000 m}^3 \text{ aire tratado}) \quad (\text{ecuación 3.47})$$

### 3.8 Entorno de trabajo

Ilustraremos los resultados de los costes de construcción y operación de este biofiltro mediante cálculos básicos a partir de los cuales construiremos tablas y gráficas. Para ello nos valdremos de las ecuaciones que ya fueron explicadas en los apartados anteriores. Nuestro entorno de trabajo se basará en una hoja de cálculo del programa Microsoft Office, en Excel (figura 3.3) ,donde efectuaremos el proceso de datos obteniendo las tablas y gráficas posteriores.



**Figura 3.3** Entorno de trabajo en el que nos movemos para realizar los costes de construcción y operación a partir de parámetros de diseño. Concretamente esta hoja de cálculo corresponde a los costes de inversión como se puede observar.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Caso estándar

Un coste estimativo para la construcción y operación de un biofiltro requiere de numerosas suposiciones que serían diferentes en función de la localización del sistema, las características del aire residual y el porcentaje de eliminación del contaminante. El ejemplo aquí desarrollado está basado en un sistema diseñado para tratar 20000 m<sup>3</sup>/h de aire conteniendo bajas concentraciones de substancias olorosas sin partículas . Los resultados de una escala piloto y un primer escalado del biofiltro demostraron una efectiva capacidad de eliminación (95%) a unos 70 segundos de tiempo de residencia (Devinny, 1999). De tales resultados (asumiendo un 20% de factor de seguridad), un biofiltro abierto, con lecho de compost y dimensiones de 21.6 m x 21.6 m x 1 m fue construido. El biofiltro está perforado por la parte de abajo y se canaliza una tubería para que entre el gas contaminante al bioreactor. El contenido en humedad dentro del biofiltro está controlado por riego directo a través de mangueras encima o en la base de la torre empacada.

En el Anexo A viene explicado detalladamente el método de resolución de este biofiltro estándar. Encontraremos todos los cálculos básicos necesarios para la construcción de las tablas y gráficas que se explicarán a continuación.

#### 4.1.1 Coste de inversión

Inicialmente vamos a exponer, en las tablas 4.1, 4.2 y 4.3, los datos de entrada a partir de los cuales iremos trabajando para determinar los resultados:

**Tabla 4.1 Datos de diseño del biofiltro.**

Q (m <sup>3</sup> /h)	20000
EBRT (s)	70
h relleno principal compost (m)	1
h material soporte grava (m)	0,305
Factor de seguridad (extra relleno) (%)	0,2

**Tabla 4.2 Porcentaje respecto del coste total de inversión**

Coste de tuberías (%)	0,10
Coste de equipo eléctrico (%)	0,04
Coste de instalación de equipos (%)	0,04
Coste de diseño de ingeniería (%)	0,12

**Tabla 4.3** Datos de costes (Adaptado de Devinny et al., 1999 y empresa COPISA)

COSTES	
Coste excavación (€/m <sup>3</sup> )	14
Precio relleno principal (€/m <sup>3</sup> )	40,15
Precio material soporte (€/m <sup>3</sup> )	35,81
Coste alquiler equipos (€/m <sup>3</sup> )	0,76
Coste labor (€/m <sup>3</sup> )	1,19
Coste beneficios-gastos generales (€/m <sup>3</sup> )	2,71
Coste bomba (€)	850

La tabla 4.4 se ha construido a partir de cálculos intermedios, los resultados de los cuales se muestran en las tablas 7.3 y 7.4 del anexo C

**Tabla 4.4** Diferentes costes principales que constituyen los costes de inversión total

	Costes	Ecuaciones
Preparación del área (€)	8526	3.5
Rellenos (€)	26018	3.12
Equipos (€)	4730	3.14
Tuberías (€)	9137	3.15
Equipo eléctrico (€)	3655	3.16
Instalación de equipos (€)	3655	3.17
Diseño de ingeniería (€)	10964	3.18
Revestimiento (€)	13832	3.22
Movilización/retirada (€)	5425	*
Varios (€)	5425	*
<b>TOTAL X (€)</b>	<b>91367</b>	<b>3.23</b>

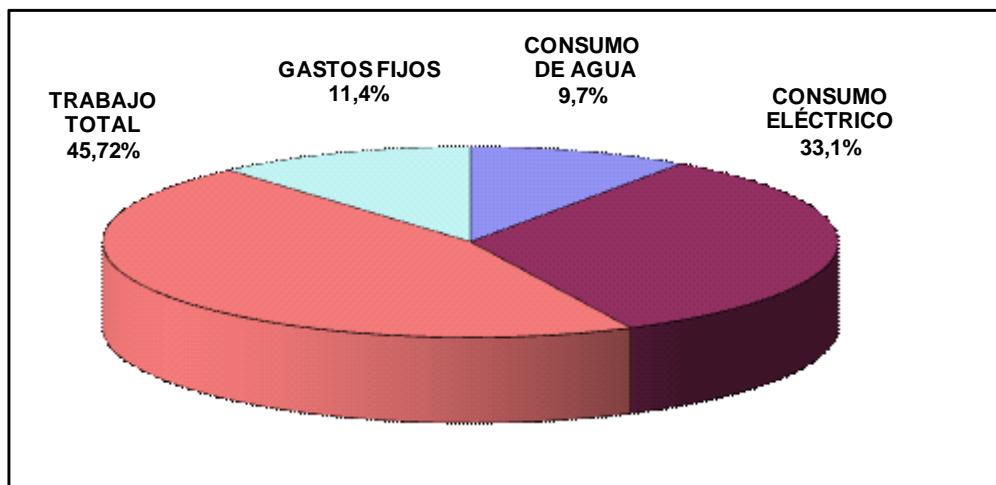
(\*) Adaptado de Devinny, Joseph, S., 1999.

#### 4.1.2 Costes de operación

En el anexo C las tablas que van de la 7.3 a la 7.6 muestran datos y los resultados de cálculos previos para el cálculo del consumo de agua, de electricidad, de trabajo total y de gastos fijos que se ilustran en la tabla 4.5

**Tabla 4.5** Conjunto de costes que se adicionan al coste de operación anual mostrado

	Costes (€/año)	Ecuaciones
Consumo de agua	1682	3.30
Consumo eléctrico	<b>5718</b>	3.28
Trabajo total	<b>7921</b>	3.31
Gastos fijos	1980	3.32
<b>Costes de operación total</b>	<b>17301</b>	3.33



**Figura 4.1** Diagrama de porcentaje de gastos respecto al coste total de operación anual

### 4.1.3 Costes de sustitución del lecho

Cada cierto tiempo el lecho pierde su capacidad de eliminación de contaminantes. Por este motivo es necesario reponerlo temporalmente de manera que mantenga un rendimiento óptimo durante el máximo tiempo posible. El tiempo promedio de buen funcionamiento de los lechos oscila entre dos y cinco años. Para nuestro caso, teniendo en cuenta que nuestro gas no contiene partículas que disminuyan sensiblemente el rendimiento del equipo, sustituiremos el lecho cada cinco años. Sabiendo además que el tiempo de actividad del biofiltro será de 15 años tendremos dos sustituciones durante este tiempo.

**Tabla 4.6** Costes asociados al cambio del relleno del biofiltro.

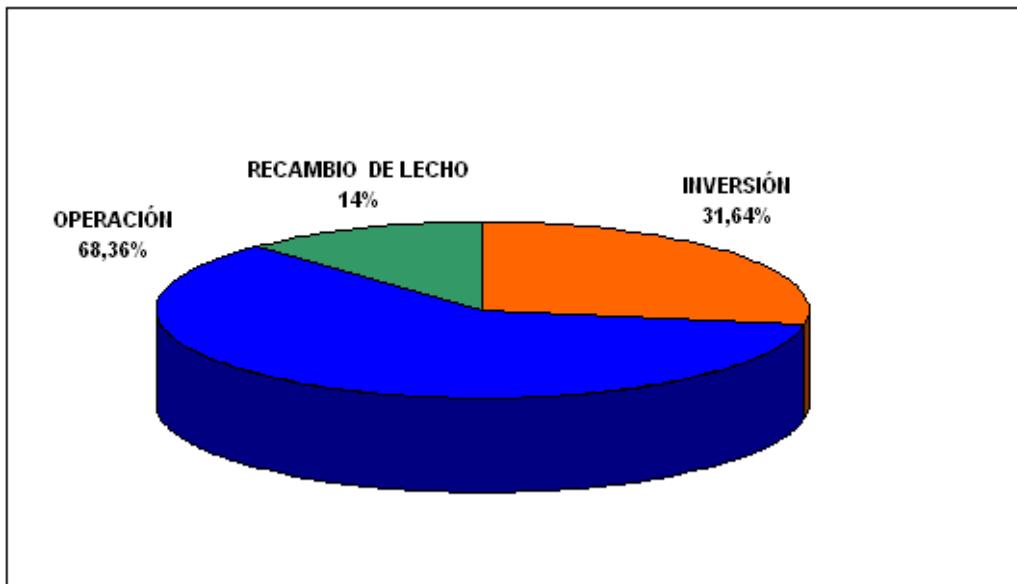
Actuación (cada 5 años)	Coste (€/actuación)	% Costes de sustitución	Ecuaciones
Retirada del medio antiguo	6533	24	3.34
Adición del nuevo medio	20913	76	3.35
<b>Total</b>	<b>27446</b>	100,0	3.36

### 4.1.4 Costes anualizados

Una vez que hemos determinado los costes de construcción y operación de nuestro biofiltro tendremos presente los aspectos financieros de su pago. El banco se encargará de financiar nuestro proyecto mediante un préstamo durante un periodo de 15 años. Pasado este tiempo habremos desembolsado todos los gastos pagando anualmente una correspondiente cantidad de dinero. El banco nos exigirá un 8% por ciento de interés anual . La tasa de inflación se ha estimado en un 3.5%. En la tabla 4.7 se muestran los costes principales y totales anuales teniendo en cuenta este interés y la inflación.

**Tabla 4.7** Costes principales anualizados del biofiltro.

	Costes (€/año)	Ecuaciones
Inversión	10674	3.37
Operación	23065	3.41
Sustitución del lecho	4687	3.42
<b>TOTAL</b>	<b>33739</b>	3.43



**Figura 4.2** Proporciones de los costes anuales más importantes a destacar.

Observando la figura 4.2 resulta evidente que los costes de operación tienen un importante peso en el conjunto de los costes del biofiltro. Aproximadamente es cinco veces mayor que los costes de sustitución del relleno y el doble que los costes de inversión. Por tanto si hay que hacer algún recorte económico es preferible incidir especialmente sobre los costes de operación en este caso.

Dentro de los costes de operación sobresalen dos costes entre los cuatro que se hallan en la tabla 4.5. Dichos costes son los de electricidad y los de trabajo sobre el biofiltro.

Más adelante veremos que al irnos alejando de estas condiciones estándar, refiriéndonos al caudal y otros parámetros , pueden cambiar matices que hagan variar sensiblemente la relación entre los costes de construcción, operación y de reposición del medio.

## 4.2 Estudio de la influencia de parámetros de construcción y operación

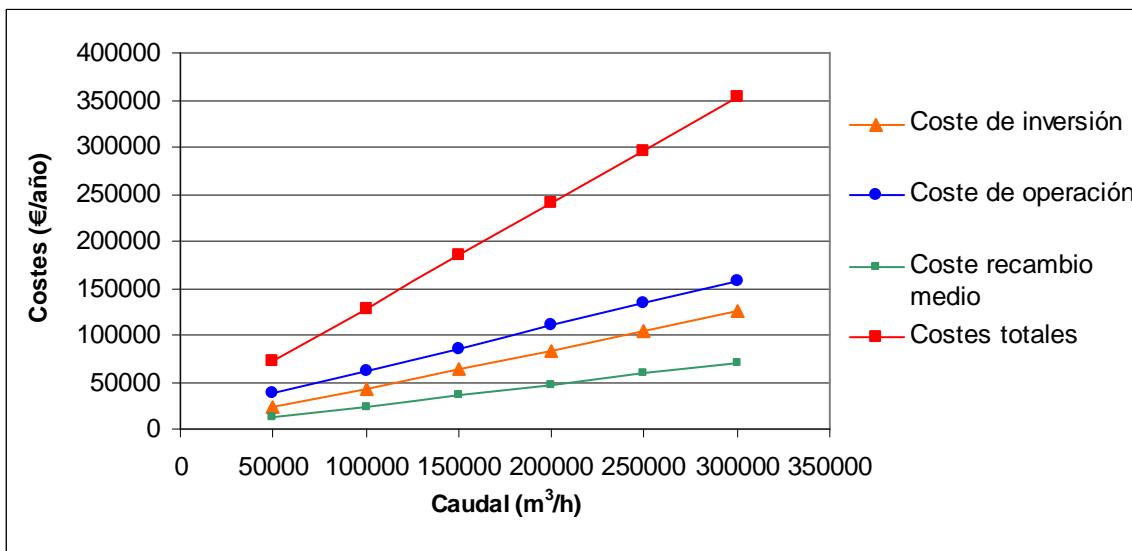
En este último apartado vamos a estudiar de qué manera afectan los cambios de determinados parámetros característicos del biodepurador sobre los costes de nuestro sistema de tratamiento biológico de gases. Nuestro objetivo será hallar el conjunto de condiciones en que optimicemos el funcionamiento de nuestro equipo, de manera que se eliminen los contaminantes gaseosos al mínimo coste posible.

A continuación procederemos a escoger una variable que será nuestro parámetro de entrada e iremos cambiando su valor. El resto de valores, o bien cambiarán porque dependen de dicha variable, o bien permanecerán con su valor inicial de referencia. Es decir, que se mantendrán los valores del ejemplo expuesto anteriormente (caudal=  $20000\text{m}^3/\text{h}$ , tiempo de residencia de 70 segundos, etc) siempre que estos valores no se cambien expresamente.

### 4.2.1 PARÁMETROS DE ENTRADA

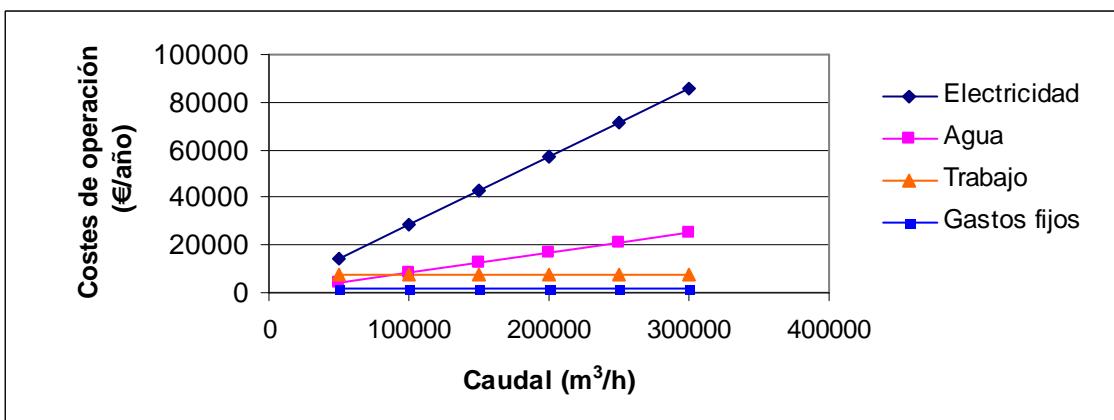
#### 4.2.1.1 EFECTOS DEL CAUDAL

A continuación vamos a hacer un análisis de los costes de inversión, operación y substitución del lecho según va variando el caudal. En la figura 4.3 se muestra claramente que a medida que aumenta el caudal el equipo se encarece globalmente tanto en su construcción como operación. Vemos también que los costes de operación son los de mayor magnitud seguidos de los costes de inversión. La substitución del lecho se presenta como el menor de los tres costes. De manera que prestaremos especial atención en los costes de operación ya que son los más que incidirán sobre el coste total.

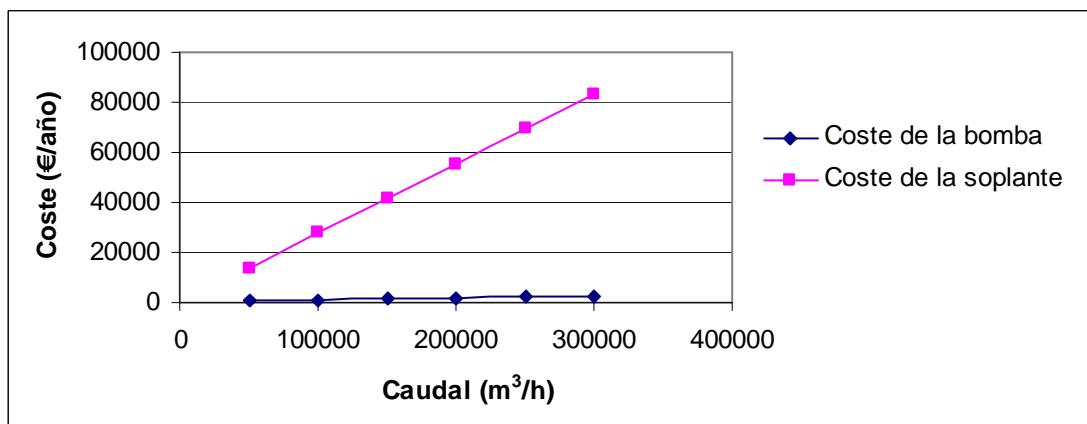


**Figura 4.3** Representación gráfica de los costes principales variando el caudal de diseño del biodepurador de gases.

Dado que los costes de operación son los mayores haremos un estudio de los mismos para el caso de la variación del caudal. En la figura 4.4 se observa que, a medida que aumenta el caudal, la influencia de los costes de electricidad sobre el coste total de operación es mayor. Los equipos responsables de los costes de electricidad son la soplante y la bomba de humidificación. Dentro de estos equipos de impulsión de fluidos se destaca principalmente el coste de la soplante (figura 4.5) frente al coste de la bomba. El coste de la soplante equivale en torno a 20 o 30 veces el coste de la bomba para caudales elevados. De modo que, a caudales altos de operación se prestará atención a la soplante. Su consumo eléctrico será bastante determinante en los costes de operación. Por este motivo el equipo ha de funcionar con un rendimiento máximo. Optimizaremos nuestra soplante a fin de que gaste la mínima cantidad de electricidad para mantener un caudal de gas. En este caso otro aspecto a tener en cuenta será el coste eléctrico ya que de esta manera se podrán aminorar los gastos de consumo eléctrico tanto de la bomba como de la soplante. Un buen mantenimiento de este equipo será pues un factor clave para el control de costes durante la vida útil del equipo.



**Figura 4.4** Diagrama del porcentaje de los costes implicados en el coste anual de operación a diferentes caudales.



**Figura 4.5** Representación de los costes correspondientes a los equipos de operación: la bomba y la soplante.

Por otra parte, cabe mencionar que a caudales más pequeños todos los costes disminuyen notablemente. Para los costes de inversión , de acuerdo con la ecuación 1.1, resulta bastante lógico que al disminuir el caudal deba disminuir también el volumen del biofiltro para mantener el tiempo de residencia constante. Por tanto pagaremos una inversión menor por un biofiltro más pequeño; en cuanto al coste de substitución del lecho ocurre algo similar que con el caso del coste de inversión. Debemos de cambiar el lecho comprando uno más pequeño de modo que del nuevo filtro a reponer será más económico.

A medida que aumenta el caudal, tal como se muestra en la tabla 4.8, el valor de los costes de operación es más grande en comparación con los costes de inversión y

substitución del medio. Sin embargo no podemos descartar la valoración de los costes de inversión ya que, fijándonos en la figura 4.3, a caudales relativamente altos, vemos que contribuye a un porcentaje también importante en el coste total del biofiltro. En consecuencia, realizamos la tabla 4.9 en la que ilustraremos los diferentes componentes que forman parte de los costes de inversión en función de la variación de caudal. Se verifica con estos resultados que tanto los costes de los rellenos como los de los equipos (soplante y bomba) sobresalen respecto de los demás costes. Por tanto para reducir los costes de inversión buscaremos especialmente reducir los costes de los rellenos y equipos disponibles en el mercado.

**Tabla 4.8** Costes principales a caudales relativamente bajos.

caudal (m <sup>3</sup> /h)	coste inversión (€/año)	coste operación (€/año)	coste recambio medio (cada 5 años)	coste total (€/año)
5000	4494	15646	1172	21312
10000	6571	18109	2344	27024
15000	8628	20572	3515	32715
20000	10674	23035	4687	38396

**Tabla 4.9** Costes de inversión en función del caudal.

Caudal (m <sup>3</sup> /h)	COSTES DE INVERSIÓN (€)									
	Preparación del área	Rellenos	Equipos	tuberías	Equipo eléctrico	Instalación de equipos	Diseño de ingeniería	Revestimiento	Movilización / Retirada	Varios
50000	21315	65045	7720	19577	7831	7831	23492	32107	5425	5425
100000	42630	130090	13146	36919	14768	14768	44303	61720	5425	5425
150000	63945	195135	19124	54282	21713	21713	65139	90923	5425	5425
200000	85260	260180	25653	71694	28678	28678	86033	119914	5425	5425
250000	106575	325225	32735	89165	35666	35666	106998	148769	5425	5425
300000	127890	390270	40370	106701	42680	42680	128041	177527	5425	5425

Se ha construido una gráfica (figura 4.6) en la que se observa que realmente se cumple la disminución de costes con el aumento del caudal, como ya se comentó en la introducción. En definitiva un caudal de diseño mayor implica unos costes por unidad de caudal inferiores.

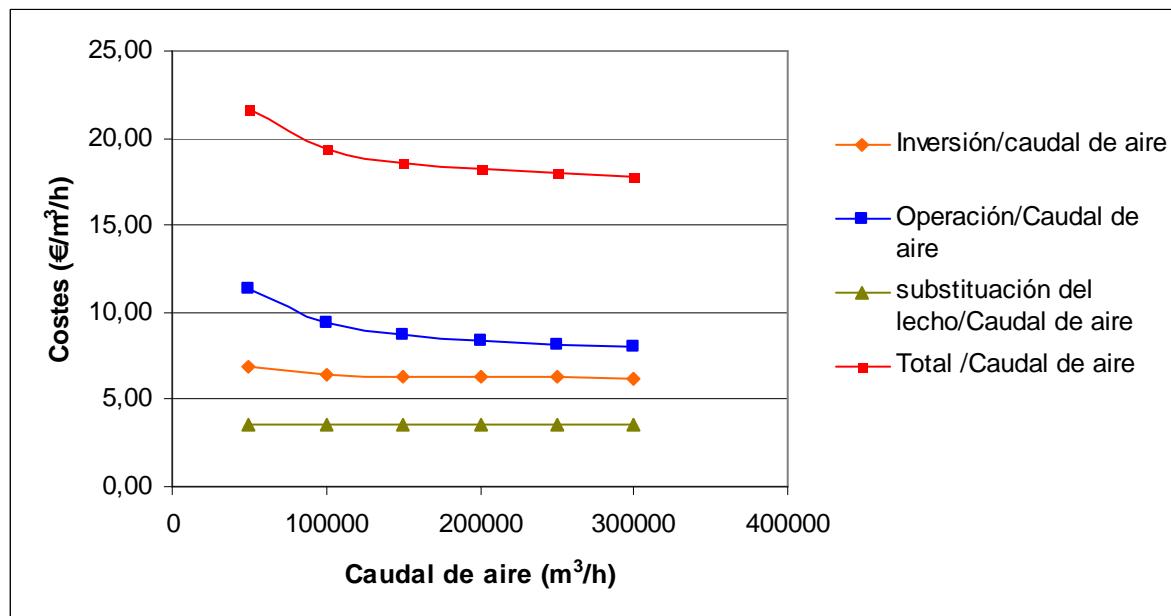


Figura 4.6 Representación de los costes fundamentales por unidad de volumen de gas a tratar.

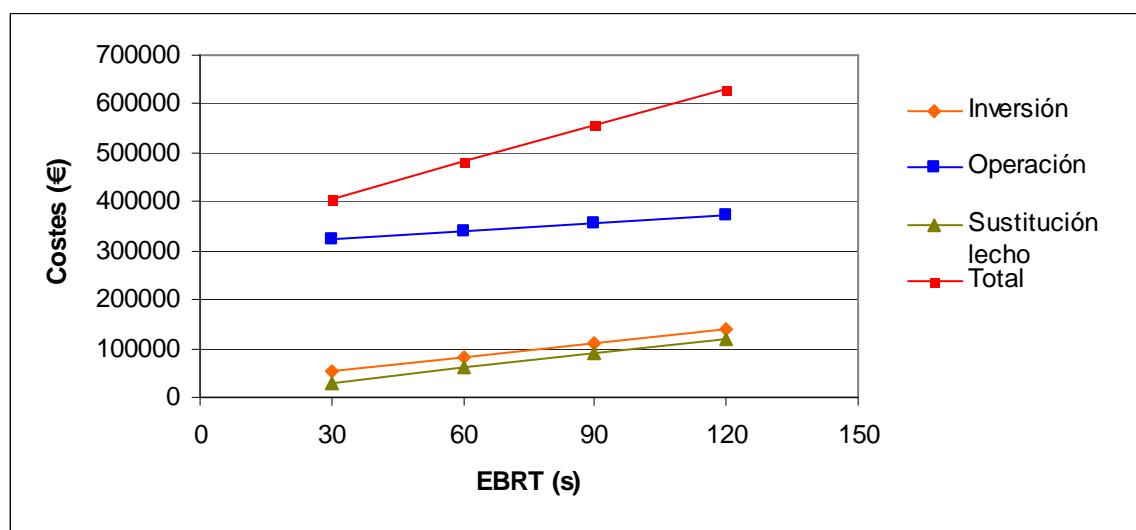
#### 4.2.1.2 EFECTO DEL TIEMPO DE RESIDENCIA

Este parámetro de entrada habitualmente se encuentra entre un tiempo de 20 y 120s. Durante este periodo el contaminante ha de ser transferido del gas a la biopelícula y los microorganismos han de disponer del suficiente tiempo para degradar el contaminante mientras éste se encuentre dentro del equipo. De modo que se necesita un tiempo mínimo de degradación del contaminante gas. Así que, a la hora de variar los valores de diseño de este parámetro partiremos del tiempo mínimo hacia adelante para que el biofiltro ejerza su función correctamente. En la figura 4.7 se ilustran los gastos de inversión, operación, sustitución del lecho y totales. Al igual como ocurría con el caudal, el aumento de este parámetro, el tiempo de residencia, implica un aumento generalizado de todos los costes. Sin embargo debemos tener presente que en la variación de este parámetro no se obtienen unos valores de costes tan elevados como ocurre con el caudal de gas. Fijándonos en la figura 4.7 y en la figura 4.3 se deduce lo comentado (obsérvese que las cifras de la figura 4.3 están en unidades de €/año). Aun así para este último caso un simple cambio de 30s de tiempo de residencia afecta aumentando su coste total en torno a los cien mil euros.

Para conseguir un mayor tiempo de residencia, para un caudal constante, hemos de aumentar el volumen de nuestro biofiltro (ecuación 1.1). Un biofiltro más grande requiere de un coste de inversión superior. A nivel de costes de operación un mayor biofiltro

significa más necesidad de agua para humidificar el lecho además de más potencia para impulsar más líquido; en cuanto a los costes de substitución del lecho también se incrementarán al necesitar un lecho mayor ya que el biofiltro será más grande. Su disposición se encarecerá al pesar o ocupar más volumen y lo mismo su transporte. Existen bastantes inconvenientes que en su conjunto aumentan considerablemente los costes del biodepurador.

Consecuentemente vemos que la idea de incrementar el tiempo de residencia para que se elimine con mayor eficiencia el gas residual puede resultar bastante cara.



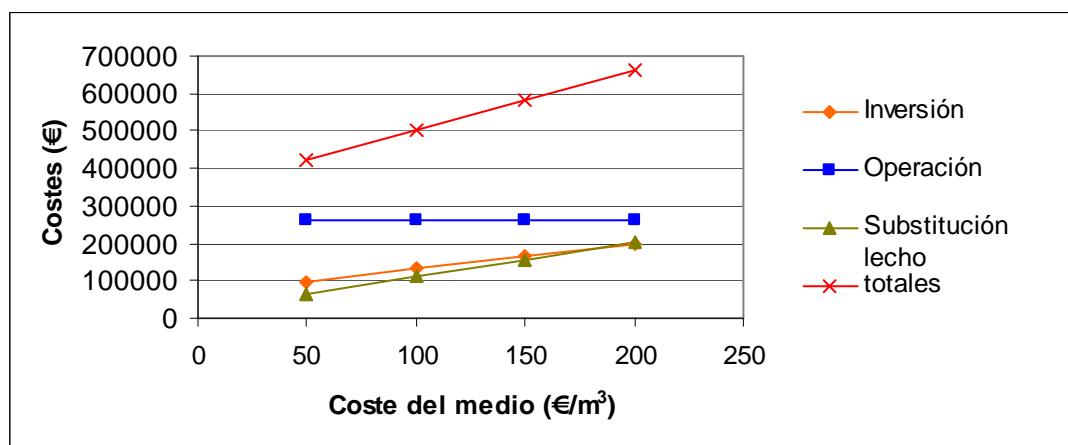
**Figura 4.7** Costes básicos en función del tiempo de residencia (EBRT).

#### 4.2.1.3 EFECTO DEL COSTE DEL MEDIO

Observamos la variación de los costes principales frente a la variación de los costes del medio de la figura 4.8 y verificamos que, tanto los costes de inversión como los de sustitución del lecho se ven afectados. No ocurre de igual modo con los costes de operación, los cuales se mantienen constantes y constituyen el mayor gasto de los tres costes principales. Por tanto hablar de los costes de operación no tiene interés ya que permanecen inalterados. Incidiremos poco sobre los costes de inversión y sustitución del lecho.

En el caso de los costes de inversión resulta bastante evidente que si el precio del medio es más caro tendremos que pagar un coste inicial mayor. Lo mismo sucede a la inversa. Además si necesitamos un equipo con unas dimensiones grandes los costes aún se disparan más por dos motivos: el primero ya se ha comentado anteriormente, al trabajar con un equipo grande debemos pagar más cantidad de medio para llenar el biofiltro incluyendo que el precio de dicho material es bastante caro; el segundo motivo, está basado en que generalmente un gran dimensionamiento del biofiltro acostumbra a caracterizarse por un caudal relativamente alto de la soplante; consecuentemente implicará un gasto importante en los costes operativos.

En cuanto a los costes de substitución del lecho, ocurre exactamente lo mismo que con los costes de inversión. Un relleno más caro implicará un mayor coste cada vez que haya que reponerlo.

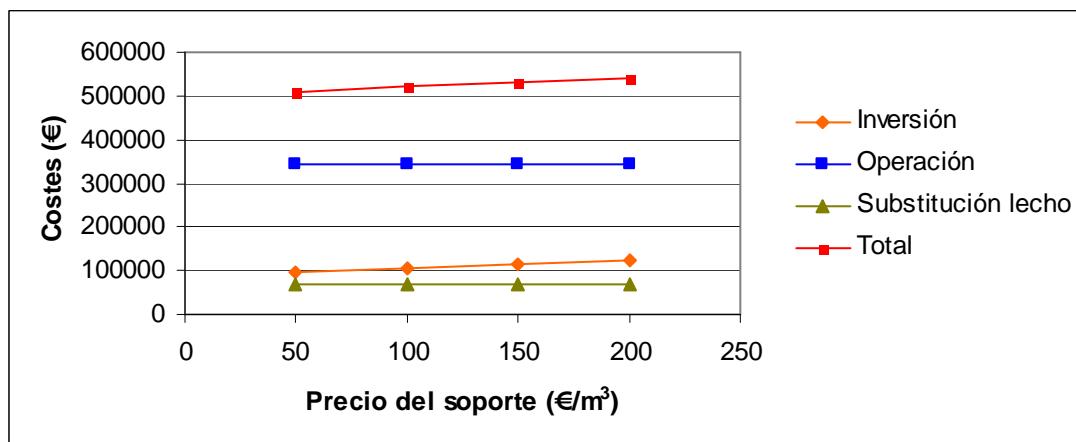


**Figura 4.8** Variación de los costes principales aumentando el precio del medio.

#### 4.2.1.4 EFECTO DEL COSTE DEL SOPORTE

Todo lo que se ha comentado en el apartado anterior para el coste del relleno es válido para los costes del soporte. No obstante existen algunas diferencias que cabe comentar. El aumento del coste del soporte no repercute en los costes de substitución del lecho ya que lo único que cambiamos es el relleno no el soporte. De modo que los costes de substitución se mantienen constantes como se observa en la figura 4.9.

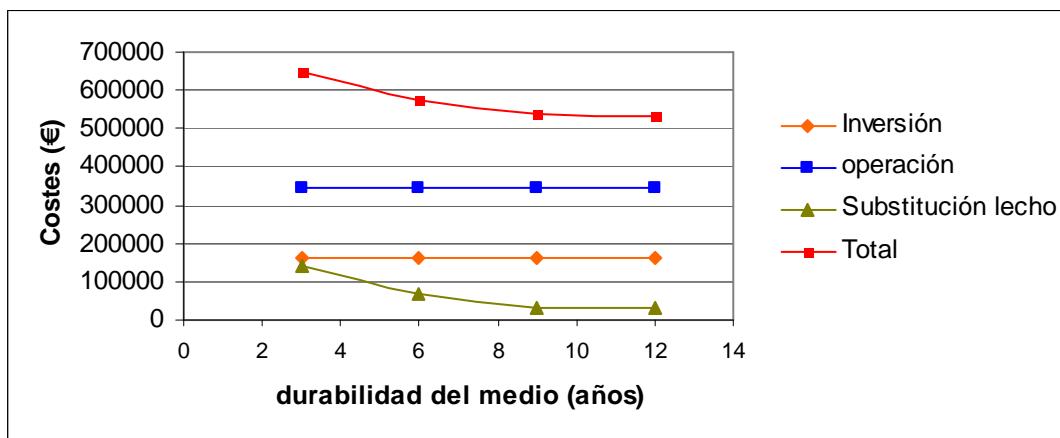
Por otro lado el coste del soporte no implica unos costes de inversión tan grandes como los costes del medio. En parte se debe a que la función del soporte básicamente se basa en que la entrada de gas contaminante hacia el lecho se distribuya de forma regular. No necesitamos una gran volumen de soporte, el cual es menor a proporción con el volumen de relleno a aportar.



**Figura 4.9** Variación de los costes principales aumentando el precio del soporte.

#### 4.2.1.5 EFECTO DELA DURABILIDAD DEL MEDIO

Es importante que el medio conserve el máximo tiempo posible de vida útil ya que así no deberemos cambiar tantas veces de material. Nos ahorraremos nuevos costes de compra, substitución y tratamiento del lecho. Además de que consecuentemente implicará un paro de trabajo de una a dos semanas hasta que la nueva población microbiana se adapte a las características del gas a tratar.



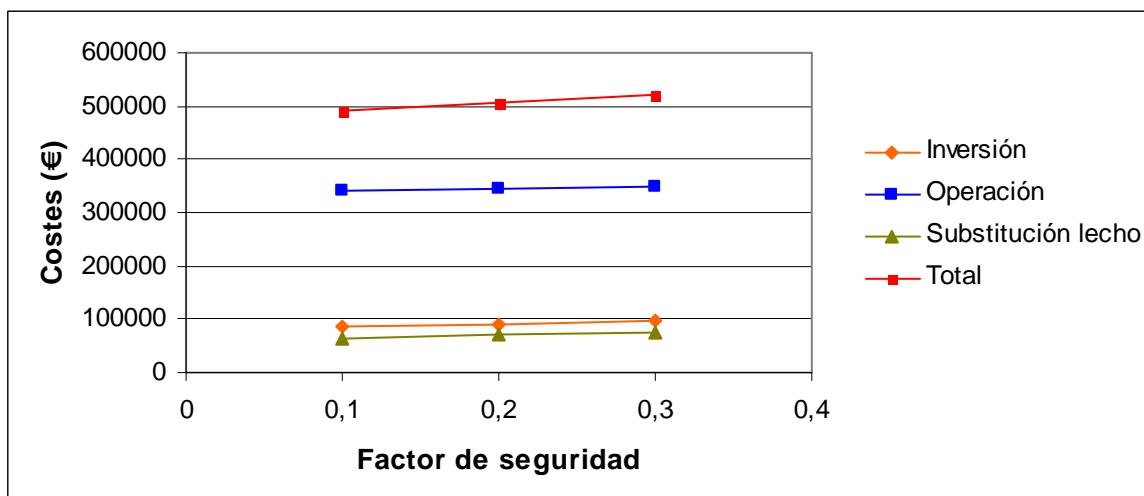
**Figura 4.10** Costes totales del biofiltro dependiendo del tiempo de vida del lecho.

En la figura 4.10 podemos ver que, respecto al coste total, lo único que cambia son los costes de sustitución del lecho. Ni el coste de inversión ni el coste de operación se ven afectados. Consecuentemente la variación del coste total también será mínimo. Por tanto, dentro de un rango razonable de tiempo de vida, entre 3 y 5 años, la sustitución del lecho no nos va a encarecer notablemente los costes totales del biofiltro.

La durabilidad del medio también puede ir asociada a la calidad de pretratamiento del gas a tratar. Si no se ha tratado bien un gas que es corrosivo o bien no se ha eliminado bien las partículas el biofiltro se tapona o se daña disminuyendo su tiempo de vida. De modo que deberemos substituir el lecho en un tiempo más corto encareciendo a la larga dicha sustitución de lecho.

#### 4.2.1.6 EFECTO DEL FACTOR DE SEGURIDAD

Una característica muy común en un biofiltro es sobredimensionar su cantidad de relleno para asegurarse de obtener el grado de eliminación deseado. A mayor relleno mayor número de microorganismos que se alimentarán del gas contaminante, con lo cual se limpiará más el gas.



**Figura 4.11** Costes principales a diferentes valores del factor de seguridad.

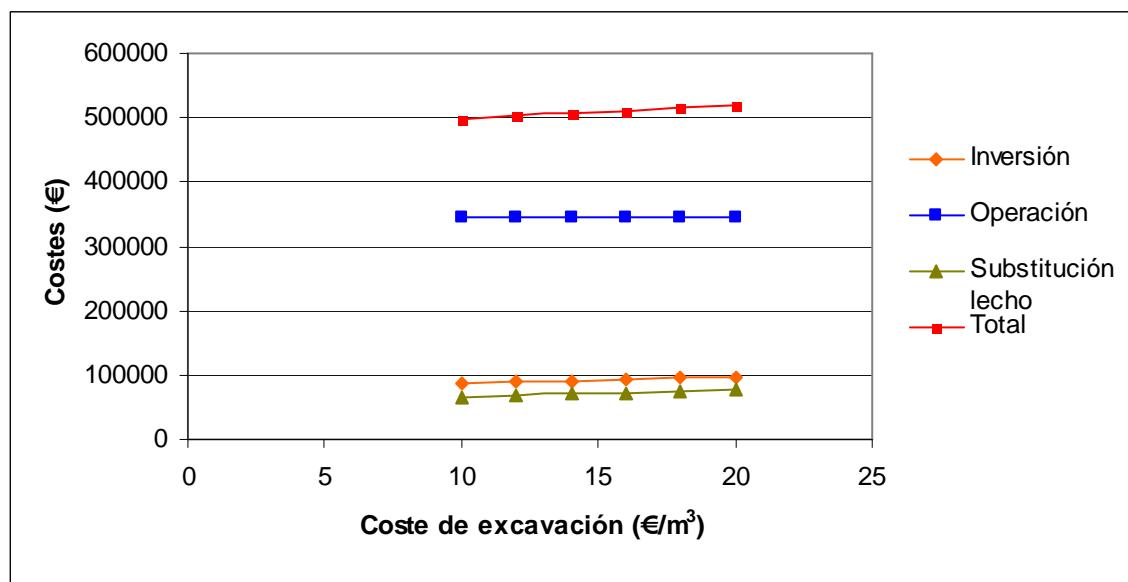
La gráfica de la figura 4.11 constata que una variación del factor de seguridad, con sus valores más comunes, no implica un aumento de los costes significativos en comparación a otros parámetros. Prácticamente se mantiene constante aumentando muy levemente estos gastos principales. Al aumentar el factor de seguridad estamos incrementando la cantidad de relleno que pondremos. Consiguientemente gastaremos más dinero al comprar más relleno, lo que incidirá sobre el coste de inversión. Deberemos excavar más cantidad de tierra para introducir el biofiltro, más trabajo, etc. También el coste de operación se elevará ligeramente. Se precisará un poco más de potencia con el aumento del factor de seguridad (ver ecuación 3.24) provocando un mayor gasto eléctrico. Igualmente se incrementará ligeramente el consumo de agua requerido por la bomba a causa de la necesidad de humidificar más cantidad de relleno.

En cuanto a los costes de substitución de lecho es evidente que un mayor factor de seguridad conlleva a una mayor cuantía de relleno. A la hora de reponer el lecho compraremos un lecho nuevo más grande además de que la disposición del lecho a extraer será más caro. Su peso o volumen será mayor aumentando los costes de disposición. De la misma forma ocurre con los costes de transporte tanto del medio a extraer como el nuevo a reponer; más peso o volumen implica un mayor coste para enviarlos a sus lugares de destino.

#### 4.2.1.7 EFECTO DE LOS COSTES DE EXCAVACIÓN

Los costes de excavación no afectan a los costes de operación ya que durante la manipulación de un biofiltro no se realiza dicha maniobra. En cambio los costes de inversión y de substitución del lecho sí que se ven influidos por los costes de excavación. De hecho el grado de influencia es mínimo y aumenta conforme se incrementan los precios de excavación, como puede observarse en la figura 4.12.

En referencia a los costes de inversión los costes de excavación interfieren dado que al construir un biofiltro bajo tierra hay que perforar el suelo; y, para el caso de substitución del lecho incide en la maniobra de excavar el lecho a reponer.

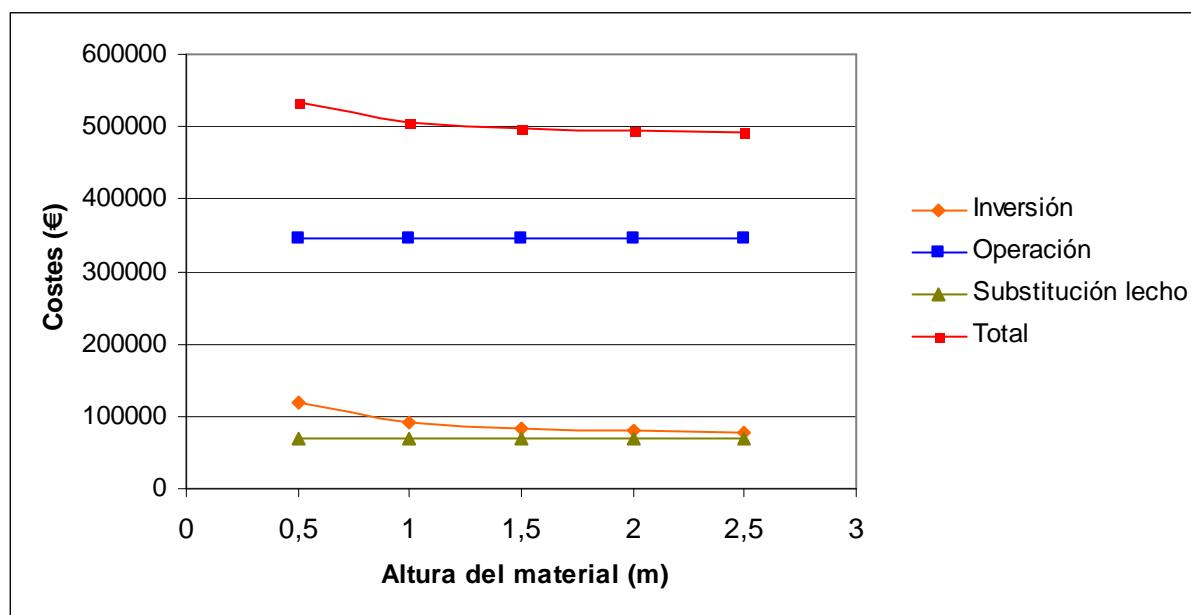


**Figura 4.12** Costes básicos a diferentes precios de excavación.

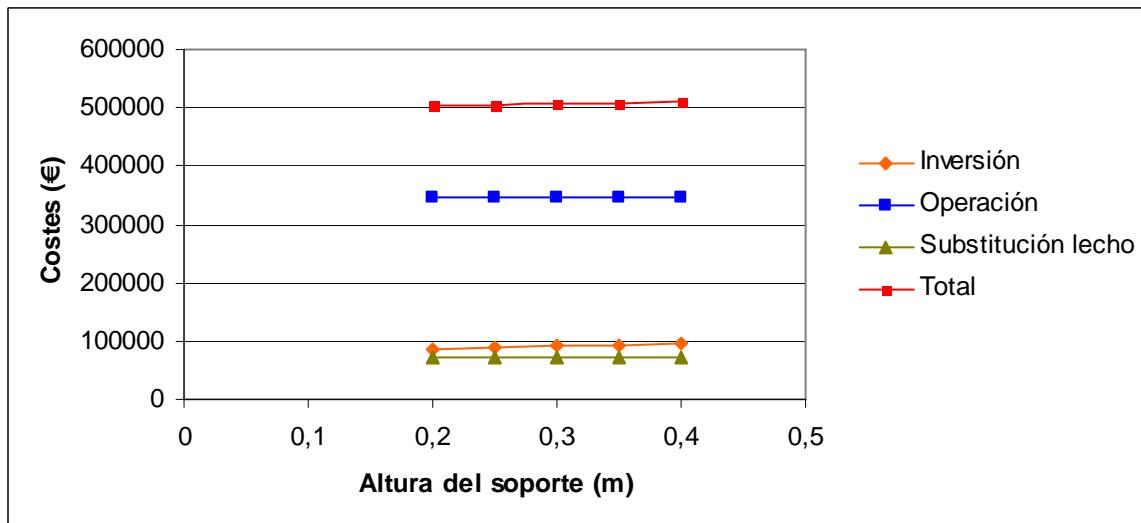
#### 4.2.1.8 EFECTO DE LA ALTURA DE RELLENO Y DEL SOPORTE

Las figuras 4.13 y 4.14 muestran que los costes de inversión son los únicos costes que se ven afectados por el dimensionamiento de las alturas de relleno y del soporte. A mayor altura de ambos menor será el coste de inversión , y a la inversa. La altura del relleno y del soporte condicionan las dimensiones del biofiltro y con ello implican los costes de alquiler de los equipos, los costes de trabajo los gastos fijos el coste del soporte en sí y el del relleno.

Hay que vigilar mucho que las alturas del relleno y del soporte no sobrepasen unos límites estándares establecidos. De lo contrario, a una altura de relleno superior a 1.5-2 metros, puede existir una pérdida de presión notable que provocaría un consumo de energía adicional por parte de la soplante. En este caso se incidiría sobre los costes de operación; otro aspecto a considerar es que si la altura del relleno es muy reducida el lecho no contendrá los suficientes microorganismos para eliminar eficientemente la parte contaminante del gas. El rango establecido por la altura de relleno se sitúa entre uno y dos metros.



**Figura 4.13** Costes principales variando la altura del relleno.

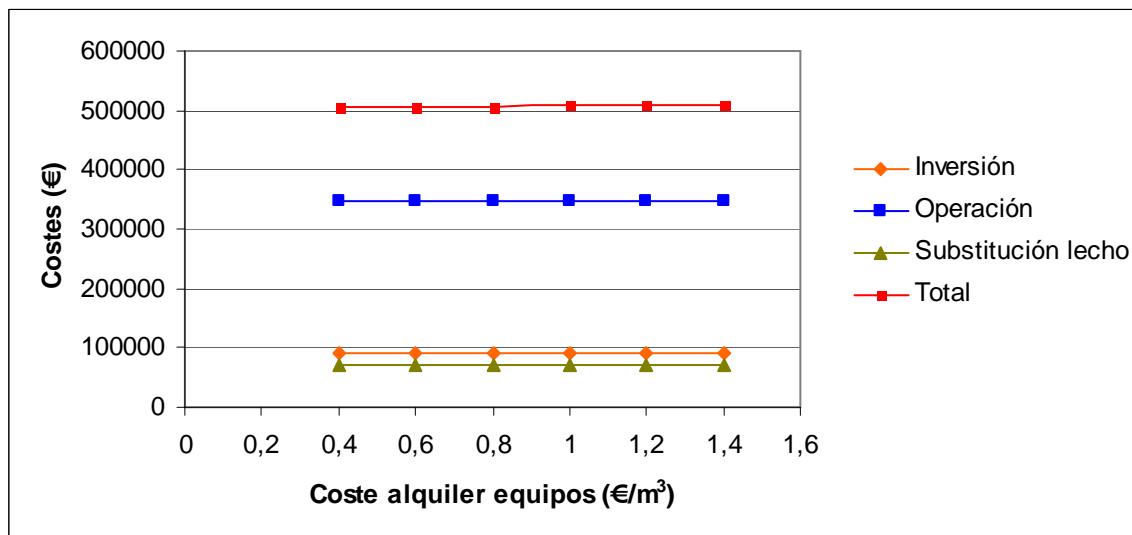


**Figura 4.14** Costes del biofiltro a diferentes alturas del soporte.

#### 4.2.1.9 EFECTO DEL COSTE DE ALQUILER DE LOS EQUIPOS DE EXCAVACIÓN

Para colocar un biofiltro y reponerlo se necesita una serie de maquinaria que en muchas ocasiones es alquilada ya que resulta más económico. El grado de incidencia de la variación de los costes de alquiler a nivel global de costes es reducido en comparación con otros, tales como el caudal, tiempo de residencia, etc, como puede apreciarse en la figura 4.15.

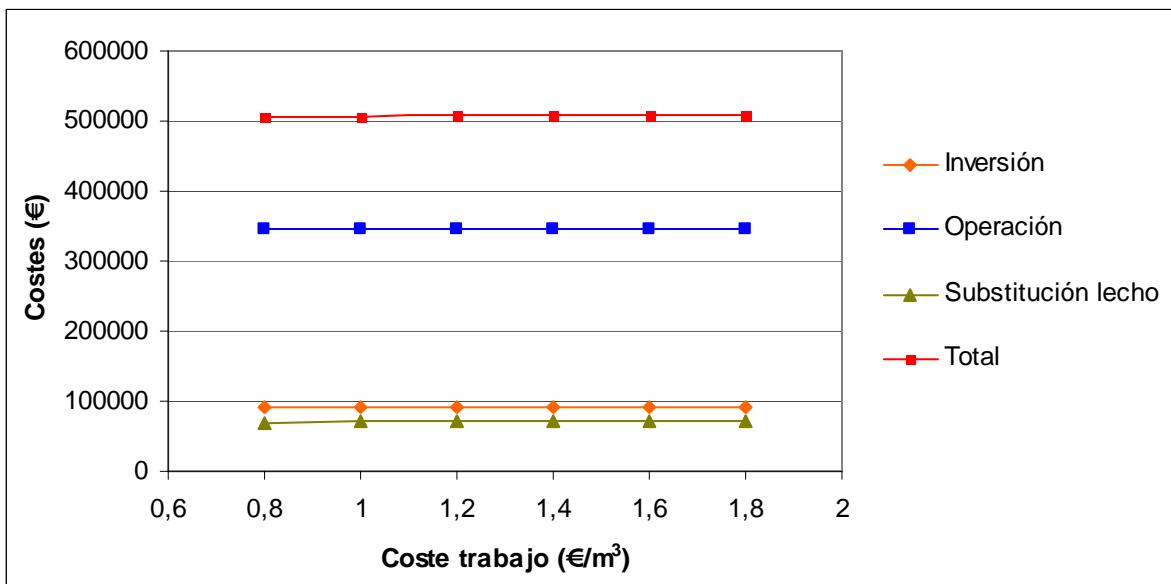
Los costes de alquiler de los equipos son directamente proporcionales al volumen del biofiltro y sólo afectan a los costes de inversión y los de substitución del lecho. Para un biofiltro de grandes dimensiones el coste de alquiler resultará mayor ya que se requerirá de un equipo más pesado.



**Figura 4.15** Costes fundamentales en función de los costes de alquiler de equipos.

#### 4.2.1.10 EFECTO DE LOS COSTES DE TRABAJO DE EXCAVACIÓN

A decir verdad, los costes de trabajo de excavación apenas influyen sobre los costes totales del biofiltro. Los costes de operación permanecen inalterados a medida que aumenta el coste de trabajo, tal como se muestra en la figura 4.16. Solamente varían los costes de inversión y de substitución del lecho de manera muy leve y continúan siendo los valores de coste total minoritarios. Los costes de trabajo, para cavar el agujero donde colocar el biofiltro, dependerán del volumen de éste. Igualmente ocurre con los costes de substitución del lecho se requerirá de un coste de trabajo para cavar y quitar el lecho antiguo y este coste dependerá del volumen del mismo.

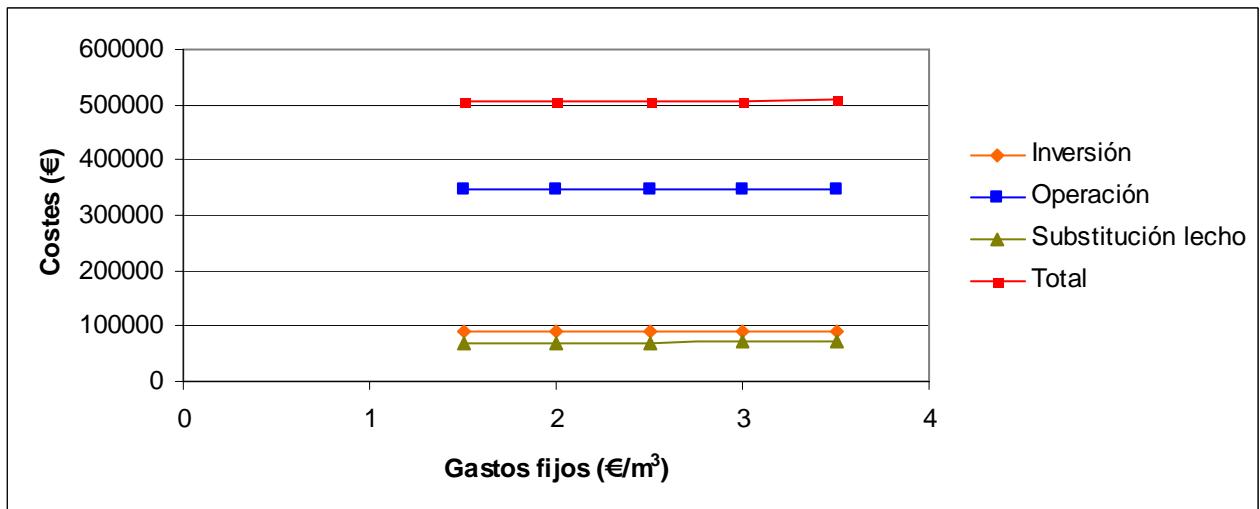


**Figura 4.16** Costes totales variando los costes de trabajo.

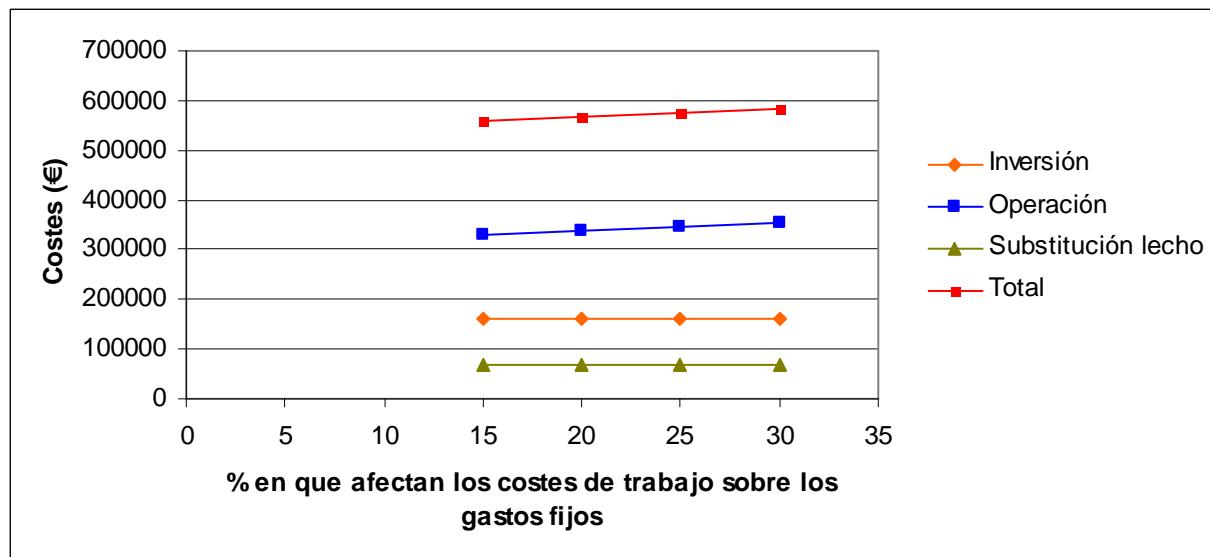
#### 4.2.1.11 GASTOS FIJOS

Los gastos fijos se dividen en costes por unidad de volumen del material de relleno (ecuación 3.10), o en costes equivalentes a un porcentaje de los costes de trabajo del operario (ecuación 3.32). Para el primer caso (figura 4.17) sólo los costes de inversión y de substitución del lecho se ven afectados. En el segundo caso (figura 4.18) los gastos fijos equivalen a un tanto por ciento del trabajo de los operarios al poner en funcionamiento el equipo. Únicamente afectará a los costes de operación.

La variación de los gastos fijos en ambas figuras no constituye ningún aumento significativo de los costes totales del biodepurador. De manera que podemos concluir que estos gastos fijos, que pueden ser licencias, permisos de todo tipo, etc, no conllevan un gran coste adicional en relación a los costes totales.



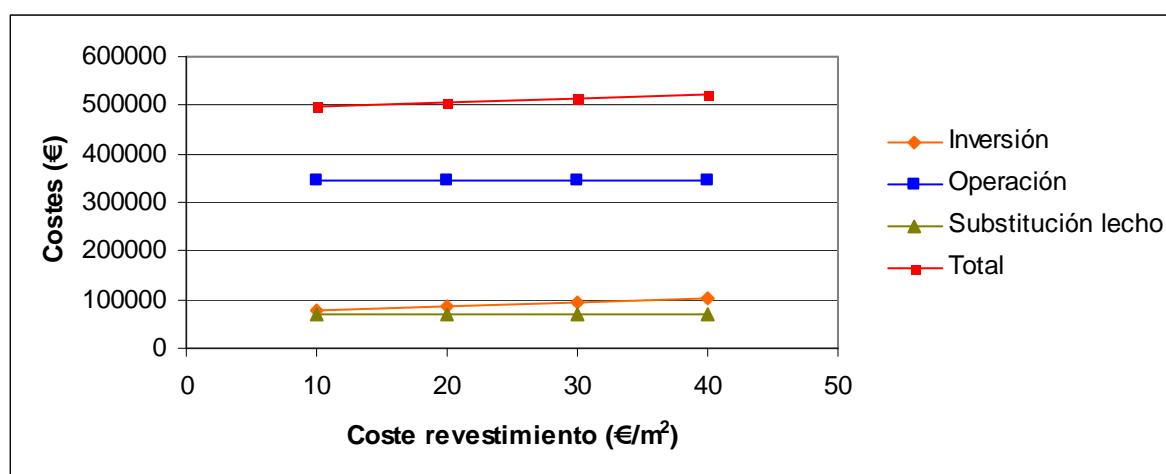
**Figura 4.17** Costes principales en función de los gastos fijos. Estos gastos son un parámetro de entrada del biofiltro. Las unidades son euros por unidad de volumen de seguridad del equipo. De modo que estos gastos fijos por unidad de volumen afectarán a los gastos fijos reales (ecuación 3.10) y, a su vez, afectará a los costes totales.



**Figura 4.18** Costes básicos en función del porcentaje en que los costes de trabajo de los operarios afectan a los gastos fijos de operación.

#### 4.2.1.12 EFECTO DE LOS COSTES DE REVESTIMIENTO

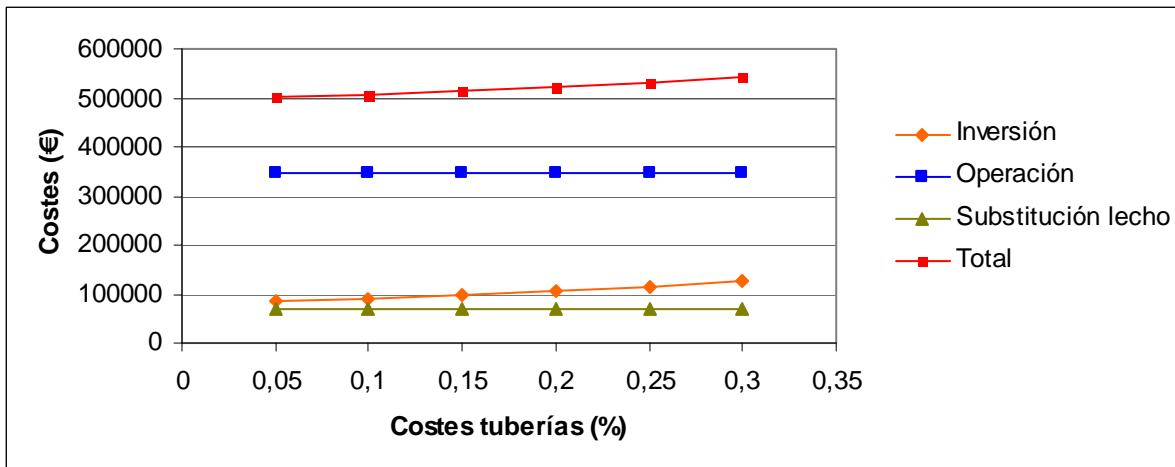
Los costes de revestimiento afectan mínimamente sobre el coste final debido a que sólo los costes de inversión se ven afectados. Los demás costes permanecen constantes ya que son independientes. Se observa (figura 4.19) que el coste de inversión aumenta con el incremento del coste del revestimiento y a la inversa. Un material más caro para cubrir el biofiltro encarece sus costes capitales obviamente. Por consiguiente resulta oportuno un buen revestimiento para el biofiltro aunque el material sea algo caro ya que, por un lado, no afectará notablemente sobre el coste total del equipo y, por otro lado, el revestimiento protegerá eficientemente al equipo en condiciones de tratar gases corrosivos u otro tipo que por sus características degraden el material de revestimiento.



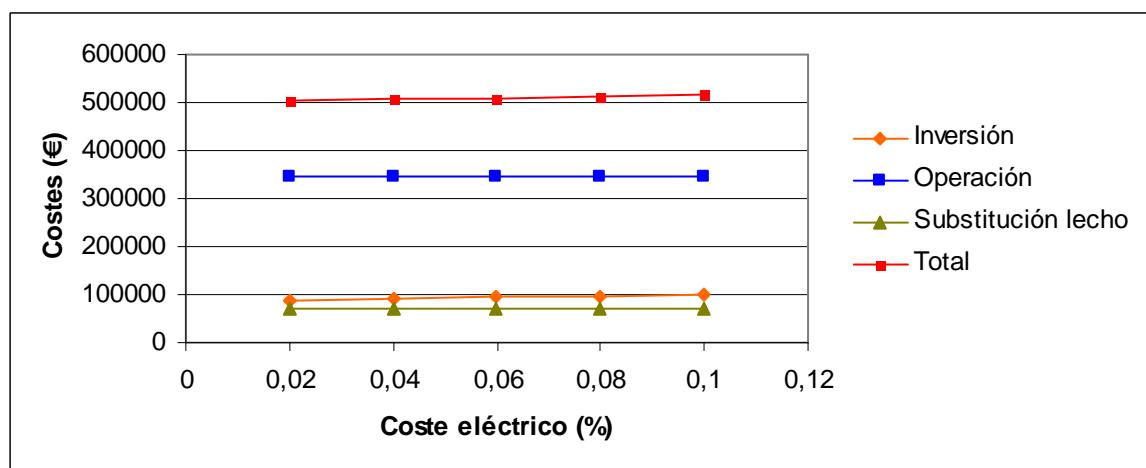
**Figura 4.19** Costes básicos en función de diferentes costes de revestimiento.

#### 4.2.1.13 EFECTO DE LOS PARÁMETROS DEPENDIENTES EN PORCENTAJE DEL COSTE DE INVERSIÓN

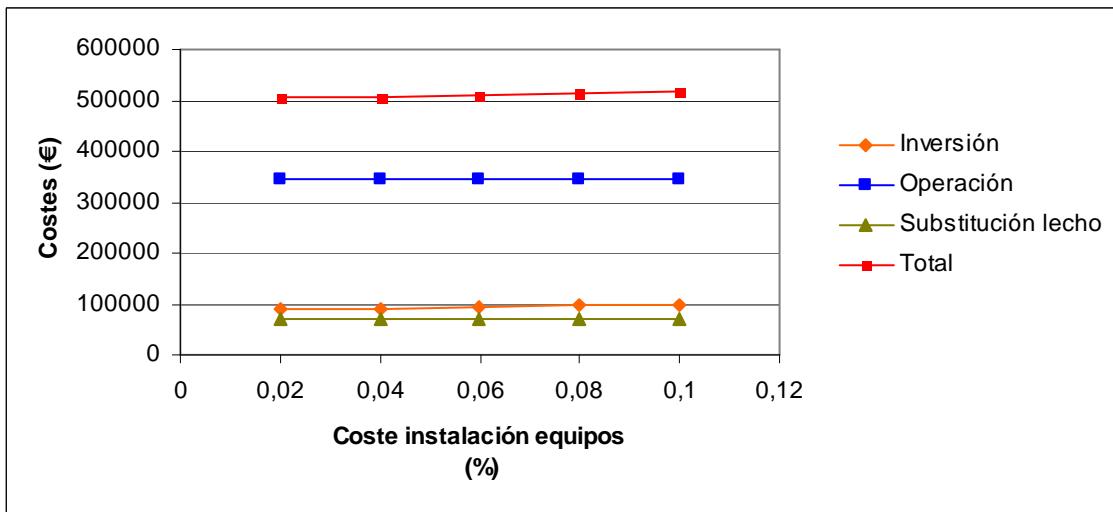
Estos parámetros de entrada del equipo son los porcentajes de costes de tuberías, coste eléctrico, de instalación de equipo y de diseño de ingeniería. Cada uno de estos parámetros depende del coste de inversión y el valor de su porcentaje se deberá al grado de complejidad de la instalación y el equipo. Cuanto mayor sea este valor mayor será su porcentaje. Puede observarse (figuras 4.20, 4.21, 4.22, 4.23) que el grado de influencia de estos porcentajes sobre los costes de inversión es bastante pequeño.



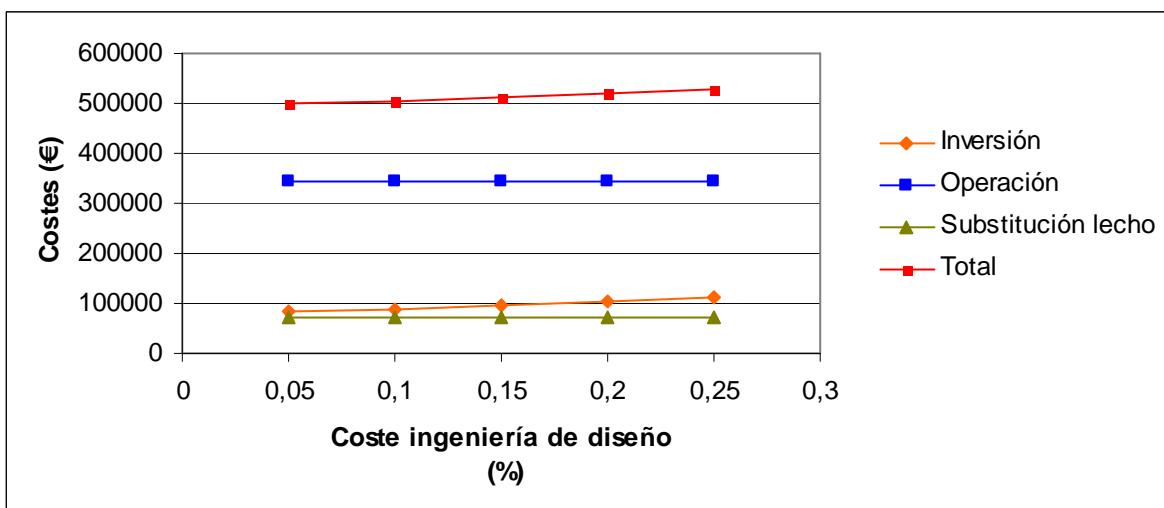
**Figura 4.20** Costes principales variando el porcentaje de costes de las tuberías respecto de los costes totales de inversión.



**Figura 4.21** Costes principales a diferentes porcentajes del coste eléctrico respecto la inversión total.



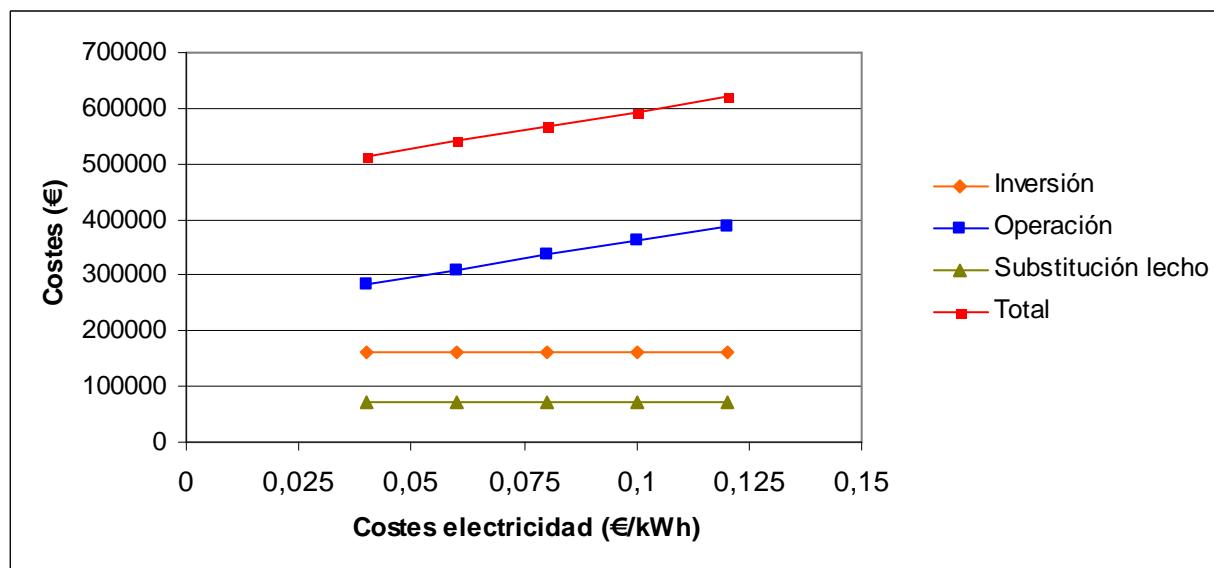
**Figura 4.22** Costes fundamentales en función del porcentaje del coste de instalación de equipos referidos al coste de inversión total.



**Figura 4.23** Costes básicos en función del porcentaje de los costes de ingeniería de diseño.

#### 4.2.1.14 EFECTO DE LOS COSTES DE ELECTRICIDAD

Los costes de electricidad del biofiltro se ven influidos únicamente por los costes de operación donde existe consumo eléctrico de la bomba de humidificación y la soplante. El resto de costes se mantiene constante sin depender de los costes de electricidad. A medida que se encarece el coste de electricidad los costes totales aumentan apreciablemente como se puede constatar en la figura 4.24. De manera que este parámetro lo deberemos tener bastante en cuenta a la hora de hacer una estimación de los costes del equipo.



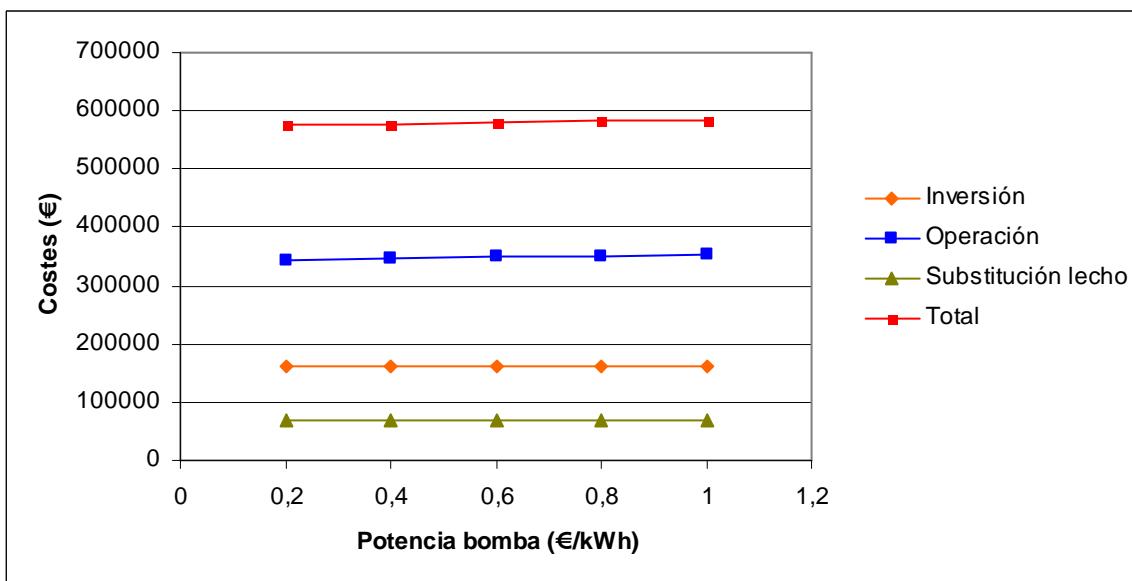
**Figura 4.24** Costes principales a diferente coste de eléctrico.

#### 4.2.1.15 EFECTO DE LA POTENCIA DE LA BOMBA DE HUMIDIFICACIÓN

Se puede observar en la figura 4.25 que la variación de la potencia de la bomba no afecta para nada a los costes de inversión ni a los de substitución del lecho. Se observa en cambio que el aumento de la potencia implica un mayor coste operativo.

La bomba está diseñada de manera que su potencia sea función del caudal de gas que entra en el biofiltro (ecuación 3.24). No obstante existen situaciones en que se necesita un mayor aporte de agua para humidificar la torre empacada. Un clima cálido o una época del

año calurosa causa una mayor evaporación del agua y como consecuencia los microorganismos no tienen la humedad adecuada para su desarrollo y actividad. Por tanto, su grado de eliminación de contaminantes disminuye. Para solucionar este problema se humidifica el biofiltro de manera más exhaustiva sobredimensionando la bomba. Es decir, utilizamos una potencia superior a la de diseño y así aseguramos un buen rendimiento de depuración de contaminantes por parte de los microorganismos. En la figura siguiente se muestra que el hecho de aumentar la potencia de la bomba no afecta significativamente sobre los costes totales. Por este motivo concluimos que el sobredimensionamiento de la bomba no será un parámetro prioritario a la hora de hacer el estudio de los gastos de un biofiltro.

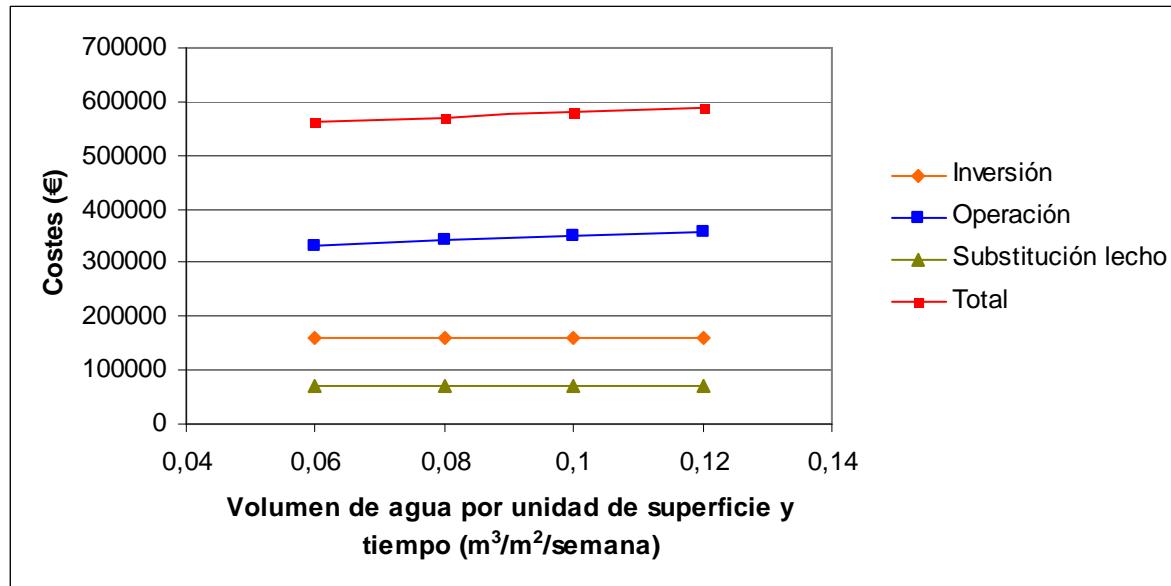


**Figura 4.25** Costes fundamentales variando la potencia de la bomba de humidificación.

#### 4.2.1.16 EFECTO DE LOS REQUERIMIENTOS DE AGUA DEL LECHO

En cuanto a las necesidades de agua que requerirá un lecho dependerá de muchos factores como la temperatura, la clase de microorganismos utilizados para limpiar el gas, el tipo de gas, etc. Igual que en el caso anterior podemos sobredimensionar el parámetro de entrada, en este caso el caudal semanal de agua por unidad de superficie, a fin de que los microorganismos contengan la cantidad mínima de agua necesaria para su desarrollo y actividad. Asimismo en la figura 4.26 vemos que un aumento de las necesidades de agua no

implica un gasto considerable. Globalmente es un gasto menor. Por tanto no prestaremos una especial atención sobre este parámetro al realizar pequeños cambios en el caudal de la bomba.

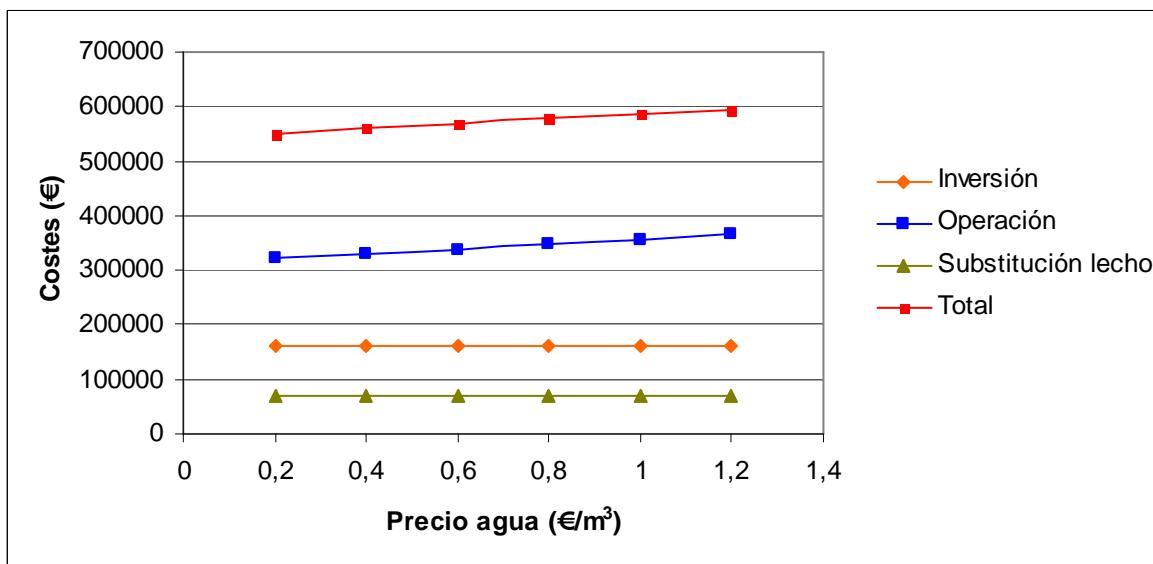


**Figura 4.26** Costes principales en función del caudal de la bomba.

#### 4.2.1.17 EFECTO DEL COSTE DEL AGUA

Al subir los precios del agua como podemos observar en la figura 4.27 también asciende el coste de operación del biofiltro. En cambio tanto los costes de inversión como los de substitución del lecho no varían ya que dentro de éstos no existe consumo alguno de agua.

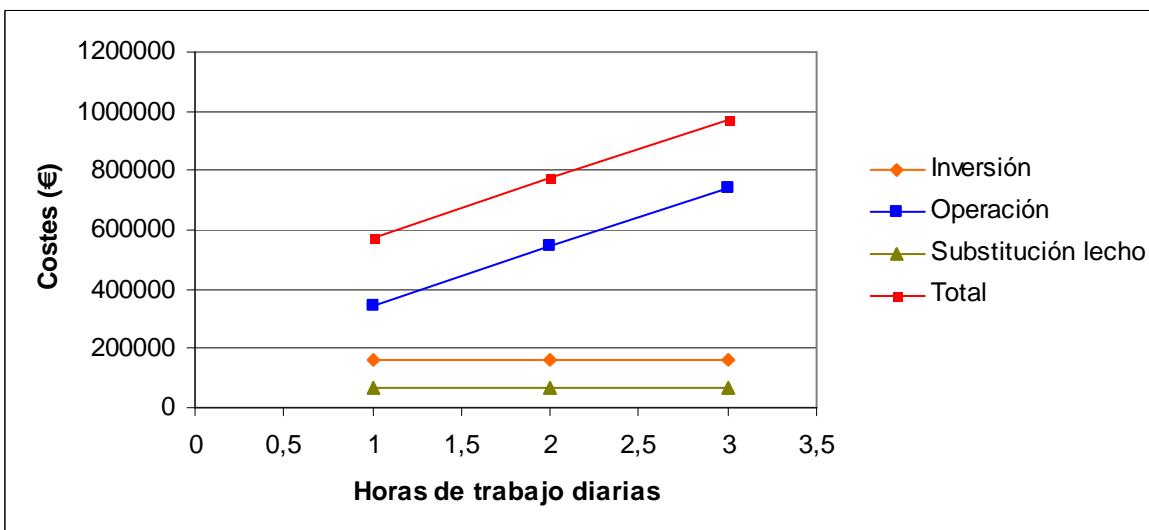
El precio del agua puede ser variable de un lugar geográfico a otro. Así que en cierta manera estaremos condicionados a un determinado precio que no podremos variar. De todos modos los cambios de los precios son mínimos y a efectos de costes totales no nos aporta un gasto excesivo. Por este motivo el coste del agua tampoco es uno de los datos de entrada que nos condicione notablemente en la estimación económica de nuestro equipo.



**Figura 4.27** Costes básicos a diferente coste del agua.

#### 4.2.1.18 GASTOS DE MANIPULACIÓN DEL BIOFILTRO

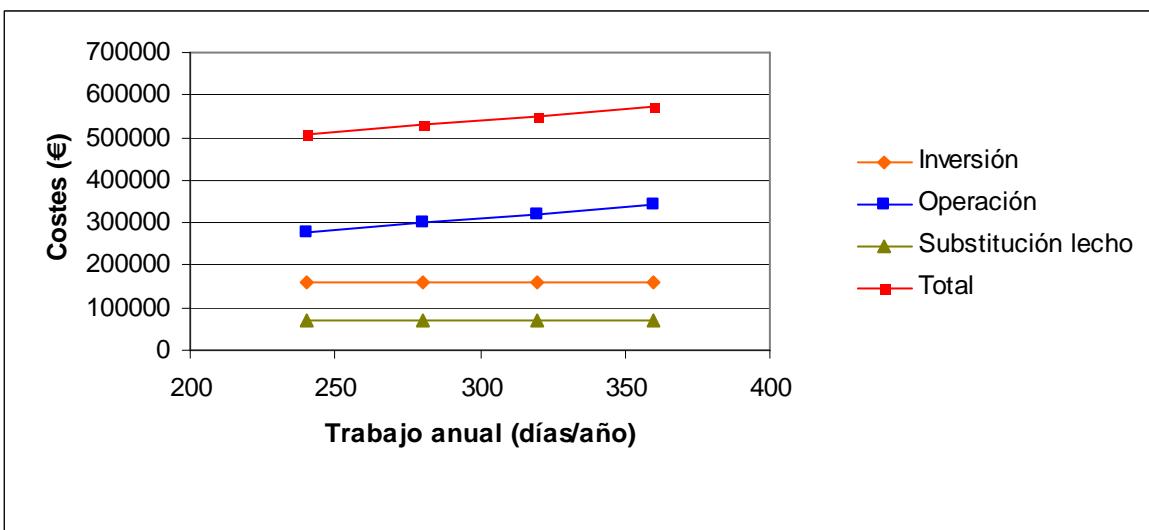
Un aspecto económico a considerar en la manipulación del biofiltro es el número de horas que se dedican al equipo. Tal como se muestra en la figura 4.28 una hora o dos más diarias produce un gasto importante a nivel global ya que el coste de operación, que es el mayoritario se ve muy afectado. No en cambio los costes de inversión ni de substitución del lecho que no dependen del número de horas trabajadas. Consecuentemente para no provocar un gasto bastante grande será fundamental la elección del número de horas que el operario dedique a la manipulación del biofiltro.



**Figura 4.28** Costes principales dependiendo del tiempo horario dedicado a la manipulación del biofiltro.

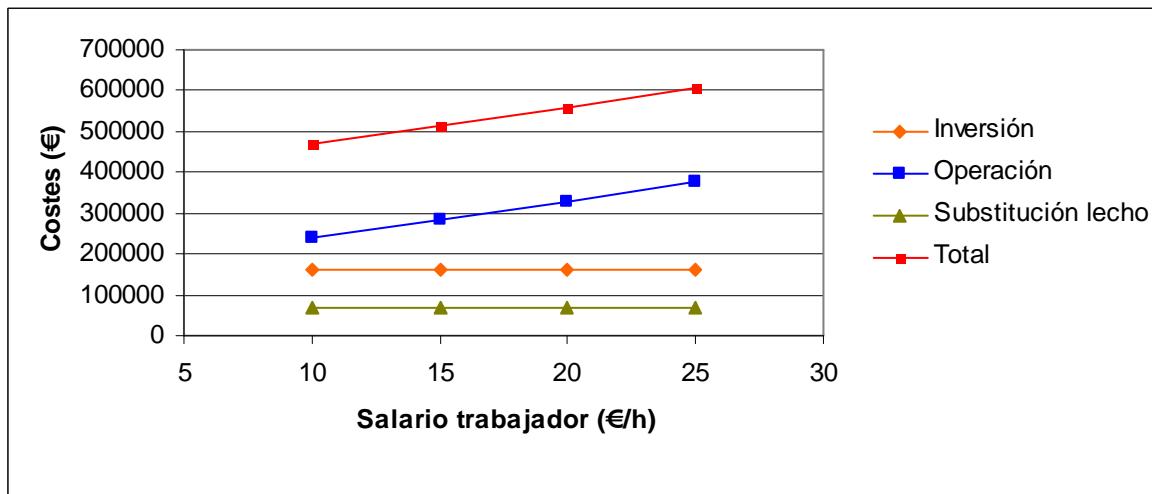
El número de días anuales en que el trabajador opere este sistema de tratamiento de gases es esencial igualmente para la estimación de costes como podemos observar en la figura 4.29.

Un biofiltro sencillo en el que no se den casos de taponamiento ni dispense de una constante atención para su buen funcionamiento no necesitará de excesivos días de trabajo anuales. Por este motivo es conveniente que nuestro biofiltro sea robusto de manera que pueda realizar su tarea no siendo imprescindible un control diario de éste.



**Figura 4.29** Costes totales a razón de la cantidad de días trabajados al año.

El salario del trabajador contribuye sensiblemente en el incremento de los costes de operación y, en consecuencia, los costes totales del biofiltro. Fijándose en la figura 4.30 se constata que un aumento pequeño del sueldo del operador influye notablemente sobre los costes de operación y globales.



**Figura 4.30** Costes fundamentales en función del salario del operario que manipula el biofiltro.

#### 4.2.2 RESUMEN DE PARÁMETROS DE ENTRADA

En este apartado vamos a comparar en qué medida influye cada parámetro sobre los costes totales del biofiltro. Para ello se realiza un análisis de sensibilidad de cada uno de estos parámetros y se comparan entre sí. En la ecuación 4.1 se expone el método de cálculo de la sensibilidad. Siendo A un valor de referencia de un parámetro de entrada cualquiera. El parámetro B es un 10% superior al A. Con el valor A de un parámetro se obtiene un coste A y, de igual modo, con el valor B se determina el coste B. Por consiguiente a través de la siguiente ecuación se constata el porcentaje de variación de los costes totales al aumentar el valor de un parámetro cualquiera en un diez por ciento.

$$\text{Sensibilidad} = \frac{\frac{\text{coste } A - \text{coste } B}{\text{Coste } A}}{\frac{A - B}{A}}$$
(Ecuación 4.1)

$$B = A + 0.1 \cdot A \Rightarrow B = 1.1A$$
(ecuación 4.2)

En la tabla 4.10 se representan todos los valores de entrada de parámetros del biofiltro además de otros como el interés, la inflación, etc. El valor más destacado con diferencia es el caudal del gas a tratar. Resulta bastante obvio, teniendo en cuenta que la soplante requerirá de un mayor consumo eléctrico, que constituye uno de los costes más grandes dentro de los costes de operación, los cuales a su vez son los costes de más peso en el conjunto de los costes totales del biofiltro. Además un caudal de diseño mayor implica un dimensionamiento del equipo más grande con lo que se encarecerán mucho más los costes de inversión y de substitución del lecho. Consecuentemente debemos minimizar lo más posible el caudal de diseño ya que a pequeños cambios de caudal el coste total se puede ver bastante afectado; de igual modo ocurre con el tiempo de residencia que en parte también es responsable del volumen del biofiltro. Si cambiamos el tamaño del biofiltro al pretender

variar el tiempo de residencia aumentamos las dimensiones del equipo. De modo que se deberá pagar más cantidad de relleno, de revestimiento, etc; los costes asociados al operario tienen un grado de influencia grande. Sin embargo los valores de estos parámetros de trabajo tienen poca variabilidad y no afecta especialmente sobre los costes totales en la realidad; existen una serie de parámetros financieros como son el interés y la inflación que presentan un grado de influencia relativamente grande numéricamente. Pero en la realidad estos parámetros presentan poca variabilidad y no podemos actuar en gran medida sobre ellos; otro parámetro de entrada interesante es el precio del medio o relleno. Tiene un valor de sensibilidad relativamente alto en comparación con los demás y se caracteriza por una variabilidad entre 50 y 200 €/m<sup>3</sup> que constituyen aumentos de hasta el 400% según la calidad de relleno que queramos comprar. Resulta igualmente lógico que incida notablemente sobre los gastos del biofiltro ya que se encarece su capital y la substitución del lecho; otro parámetro con una sensibilidad elevada es el coste de electricidad. Parece bastante obvio después de ver en el apartado anterior que los costes de operación son los que más repercuten sobre los gastos totales del biodepurador. Estos costes son debidos al consumo de electricidad de la bomba y especialmente de la soplante. El incremento de los precios de costes de electricidad no es grande y, aún así, afecta notablemente sobre los costes totales.

**Tabla 4.10** Sensibilidad de diferentes parámetros de entrada del biofiltro a 15 años por orden descendente .

Parámetros de entrada	sensibilidad
Caudal (m <sup>3</sup> /h)	7,61E-01
Tiempo (años)	-4,81E-01
Tiempo de residencia (s)	2,14E-01
Costes del medio (€/m <sup>3</sup> )	1,95E-01
Altura del compost (m)	-1,34E-01
Inflación (%)	1,11E-01
Coste de electricidad (€/kWh)	1,01E-01
Interés (%)	1,00E-01
Requerimientos agua lecho	4,27E-02
Gastos fijos (%)	4,18E-02
Costes del soporte (€/m <sup>3</sup> )	3,03E-02
Costes de revestimiento (€/m <sup>2</sup> )	2,58E-02

Parámetros de entrada	sensibilidad
Altura del soporte (m)	2,34E-02
Coste de tuberías (%)	1,83E-02
Coste de diseño de ingeniería (%)	1,75E-02
Precio del agua (€/m <sup>3</sup> )	1,58E-02
Coste de instalación de equipos (%)	7,83E-03
Gastos fijos (€/m <sup>3</sup> )	6,12E-03
Potencia de la bomba (kW)	3,92E-03
Costes de trabajo (€/m <sup>3</sup> )	3,26E-03
Durabilidad del material (años)	-2,45E-03
Coste de alquiler de equipos (€/m <sup>3</sup> )	1,61E-03
Coste eléctrico de los equipos (%)	2,61E-04

(\*) Estos porcentajes están referidos a los costes de inversión del equipo de tratamiento de gases biológico

Se han encontrado sensibilidades negativas como es el caso de la altura del compost, su durabilidad y el tiempo de actividad de un biofiltro. Una sensibilidad negativa significa que el aumento del valor de un parámetro de diseño contribuye a la disminución de los costes totales. Cuanto más negativa es la sensibilidad más afecta el parámetro sobre la disminución de dichos costes. El parámetro más grande es la altura de compost. Al aumentar su altura se disminuye el área del terreno para mantener así el volumen del biofiltro constante. De manera que al ocupar menos terreno hay que pagar menos costes de emplazamiento. También se reducen los costes de revestimiento a causa de que disminuye la superficie del biofiltro. Al reducir estos costes de inversión los costes de tuberías, ingeniería de diseño, etc, se ven igualmente afectados porque dependen directamente del valor del coste de inversión total. De todas formas la altura del lecho no puede variar unitariamente en gran medida sólo entre 1 y 2 m por problemas de pérdidas de presión y su consecuente gasto grande de energía; los costes totales van decreciendo conforme aumenta la durabilidad del material debido principalmente a que al durar más tiempo el material se ahorra tener que reponerlo más veces, ni enviarlo el medio antiguo a tratamiento, ni excavar más veces y otras operaciones que conlleva.

Los parámetros que dependen del porcentaje del coste de inversión no serán especialmente importantes debido a su reducido rango de valores. El resto de valores presenta una baja sensibilidad sobre los costes totales en comparación a los demás parámetros de entrada comentados. Su bajo rango de variabilidad no permite que se alteren notablemente los costes del biofiltro.

## 5. CONCLUSIONES

El sistema de tratamiento de gases por biofiltración puede resultar muy útil ya que generalmente es el equipo más económico de todos, a la vez que es el más ecológico. Unos gastos de limpieza de gases menores favorecen la competitividad de una empresa en la industria. Por este motivo es conveniente su implementación.

Sin embargo no siempre es posible aplicar esta técnica debido a que existen muchos condicionantes para su uso y aún no está lo suficientemente desarrollada. De manera que cada tipo de gas contaminante requiere de un estudio individual. Cada empresa genera sus propios gases residuales que poseen unas características propias. Un gas tóxico, caliente o con partículas puede matar a los microorganismos o bien puede taponar el lecho respectivamente, con lo que el gasto eléctrico y el rendimiento del biofiltro disminuyen notablemente.

En este proyecto se ha comentado un sistema de biofiltración muy sencillo. Los costes estimados pueden variar notablemente de un tipo de biofiltro a otro. Se han considerado las condiciones más óptimas y esto desde luego no siempre es así. Si existe un gas muy caliente a temperaturas o pH por encima o debajo de las condiciones de supervivencia de microorganismos harán falta una serie de pretratamientos de este gas antes de que pase directamente al lecho del biofiltro.

Los costes que estamos estimando son de construcción y operación, es decir, que no se tienen en cuenta otros costes previos a la puesta en marcha de un biofiltro. Inicialmente se precisa de una investigación del tipo de microorganismos adecuados para tratar el gas contaminante en cuestión. Para ello también se necesitará una planta piloto para realizar dichos estudios. Consecuentemente se requerirá de un buen escalado para asegurar la buena eficiencia del biofiltro; incluso es necesario un tiempo de adaptación de los microorganismos para limpiar el gas. Por tanto no sería una buena referencia quedarse con la idea de que en este proyecto se abarcarán todos los costes implicados en un biofiltro. Simplemente se ha realizado un estudio general observando como varían los costes en función de unos parámetros de diseño de un biofiltro muy sencillo.

En el estudio de sensibilidad de los diferentes parámetros de entrada del biofiltro se han destacado especialmente el caudal, el tiempo de residencia, el salario del operario y la durabilidad del material. Por tanto la variación de dichos parámetros influye notablemente sobre los costes totales del biofiltro en comparación a los parámetros de entrada restantes. Consecuentemente para el diseño de nuestro equipo prestaremos especial atención sobre estos datos de entrada de alta sensibilidad.

## 6. BIBLIOGRAFIA

### Libros

- Boyette, R.A., Williams, T., and Wynne, D. Biofiltration demonstration for controlling volatile organic emissions, in Proceedings of the 1995 Conference on Biofiltration (on Air Pollution Control Technology), Hodge, D.S. and Reynolds, F.E., Eds., The Reynolds Group, Tustin, CA, 1995.
- Deshusses, M.A., Biodegradation of Mixtures of Ketone Vapours in Biofilters for the Treatment of Waste Air, Ph.D. thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 1994.
- Devinny, J.S., Deshusses, M.A., Webster, T.S. 1999. Biofiltration for air pollution control. Boca Raton: Lewis Publishers
- Dullien, F.A.L. 1989 .Introduction to industrial gas cleaning. San Diego: Academic Press, Inc.
- Eitner, D., Biofilter in der praxis, in Biologische Abluftreinigung, Expert Verlag Ehningen bei Boeblingen, Germany, 1990.
- Fouhy, K., Cleaning waste gas naturally, Chem. Eng. 1992.
- Gerrard, A.M., Economic design of biofilter systems, J. Chem. Technol. Biotechnol., 1997.
- Jol, A. and Dragt, A., Filtering out volatile organic compounds from waste gases, Process Eng., 1988.
- McCabe, W.L., Smith, J.C., Harriot, P. 1991. Operaciones unitarias en ingeniería química. 4<sup>a</sup> Ed. Madrid: MacGraw-Hill.

- Peavy, H.S.1985. Environmental engineering ; Howard S. Peavy, Donald R. Rowe, George Tchobanoglous .New York: McGraw-Hill McGraw-Hill. McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering.
- Perry, R.H., Green, D.W., Maloney, J.O.1984. Perry's Chemical engineers' handbook. 6<sup>a</sup> Ed. New York : McGraw-Hill.. McGraw-Hill chemical engineering series.
- Puig i Godes, O. 1995. Manual de mesures correctores d'emissions atmosfèriques de la indústria. Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient. Direcció general de qualitat ambiental.
- Ruddy, E.N., Carroll, L.A., *Select the Best VOC Control Strategy*, Chem. Eng., 1993.
- Seinfeld, J.H. 1986. Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution. New York: Jhon Wiley and Sons.
- Theodore, L., Buonicore, A.J.1994. Air pollution control equipment. Selection, design, operation and maintenance. BerlinNew York : Environmental engineering. 9,10.
- Van Lagenhove, H. and De Heyder, B. 2001. Biological treatment of sewage odours. In “Odours in wastewater treatment. Measurement, modelling and control”. Eds. Stuetz, R and Frechen, F.B. IWA Publishing. Padstow, Cornwall, UK.
- Van Lith, C., Leson, G., and Michelson, R., Evaluating design options for biofilters, J. Air Waste Manage. Assoc., 1997.
- Wark, K., Warner,C.W.1998. Contaminación del aire. Origen y control. México: Limusa.

## **Webs**

- <http://engineeringtoolbox.com>
- <http://fondosdigitales.us.es>
- <http://web.usal.es>
- <http://www.engineersedge.com>
- <http://www.epa.gov>
- <http://www.gencat.es>
- <http://www.mcp.es>

## 7. ANEXOS

### ANEXO A:

### RESOLUCIÓN ESQUEMÁTICA DEL CASO ESTÁNDAR

#### *COSTES DE INVERSIÓN*

##### A. Costes de preparación del emplazamiento

1. Volumen de relleno=  $Q \times EBRT$  (ecuación 1.1)

$$Q = 20000 \frac{m^3}{h}$$

EBRT=70 s

$$V = 20000 \frac{m^3}{h} \cdot \frac{1h}{3600s} \cdot 70s = 389 m^3$$

2. Asumiendo un 20% de factor de seguridad determinamos el volumen total de compost que introduciremos:

$$V_{seg} = V \cdot (1 + FS) = 389 m^3 \cdot (1 + 0.2) = 467 m^3$$

Calculamos el ancho y largo del biofiltro:

$$W = L = \sqrt{\frac{EBRT \cdot Q}{H(1+FS)}} = 21.60 m$$

3. Asumiendo otro 0.305 m por la altura de grava el volumen de la grava es:

$$V_{sop} = H_{sop} \cdot W \cdot L = 0.305 m \times 21.60 m \times 21.60 m = 142 m^3 \text{ (ecuación 3.3)}$$

4. Volumen para ser excavado = volumen medio + volumen de grava=  $467 m^3 + 142.33 m^3 = 609 m^3$  (ecuación 3.4)

5. Excavación (incluye equipamiento, trabajo, costes operativos/beneficio) y disposición (asumir no-arriesgado y 10 millas de ida y vuelta)=  $14 €/m^3$

6.Coste total para la preparación del emplazamiento=  $14 €/m^3 \times 609 m^3 = 8526 €$  (ecuación 3.5)

## B. Costes medios

1. Asumiendo un coste del compost de 40.15 €/m<sup>3</sup> obtenemos el coste total del compost.

$$C'_{rell} = C_{rell} \cdot V_{seg} = 40.15 \frac{\text{€}}{\text{m}^3} \cdot 467 \text{ m}^3 = 18736 \text{ €} \text{ (ecuación 3.6)}$$

1. Asumiendo 35.81 €/m<sup>3</sup> de grava el costes de la grava,  $C'_{sop}$ , se define como:

$$C'_{sop} = C_{sop} \cdot V_{sop} = 35.81 \frac{\text{€}}{\text{m}^3} \times 142 \text{ m}^3 = 5097 \text{ €} \text{ (ecuación 3.7)}$$

2. En la Instalación del medio y la grava intervienen diversos costes adicionales como el coste de alquiler de equipamiento, el de trabajo y el de gastos fijos.

$$C'_{alq} = C_{alq} \cdot V_{exc} = 0.76 \frac{\text{€}}{\text{m}^3} \cdot 609 \text{ m}^3 = 356 \text{ €} \text{ (ecuación 3.8)}$$

$$C'_{trab} = C_{trab} \cdot V_{exc} \Rightarrow 1.19 \frac{\text{€}}{\text{m}^3} \cdot 609 \text{ m}^3 = 559 \text{ €} \text{ (ecuación 3.9)}$$

$$C'_{ben} = C_{ben} \cdot V_{exc} = 2.71 \frac{\text{€}}{\text{m}^3} \cdot 609 \text{ m}^3 = 1271 \text{ €} \text{ (ecuación 3.10)}$$

3. Total costes medios = coste compost + coste grava + gastos fijos + coste alquiler equipamiento = 18736€ + 5097€ + 356€ + 559€ + 1271€ = 26019€

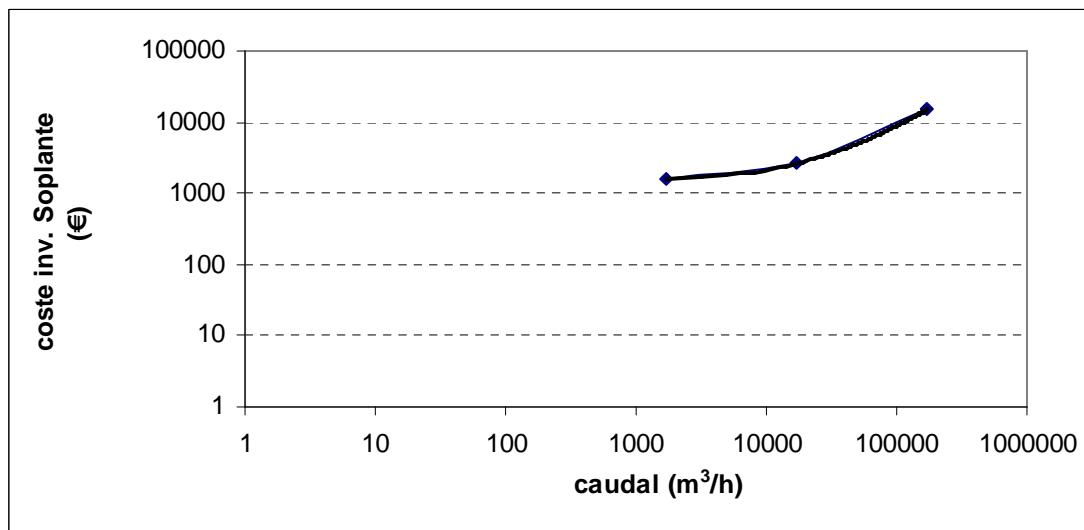
## C. Equipamiento

### C.1 Coste de inversión de la soplante

Para calcular el coste de inversión de la soplante estándard 10-hp nos valdremos de un diagrama bibliográfico (Max, S. et al. 1990. Plant design and economics for chemical engineers. 4<sup>a</sup>Ed. Barcelona: McGraw-Hill. McGraw-Hill chemical engineering series. 531). Visualmente escogeremos tres puntos de la gráfica y los expondremos (tabla 7.1). Con el programa Microsoft Office representaremos gráficamente dichos puntos y buscaremos una función (figura 7.1) que se aproxime al máximo a estos puntos.

**Tabla 7.1** Representación de tres puntos del diagrama de coste de inversión (Adaptación de Max, S. et al 1990).

caudal (m <sup>3</sup> /h)	coste inv. soplante(€)
1699	1560
16990	2600
169901	15000



**Figura 7.1** Diagrama de coste de inversión de una soplante en función del caudal de gas a tratar. Se han escogido los tres puntos representativos de la tabla 7.1 y se ha construido la gráfica que más se aproxima a dichos puntos. Por interpolación podemos hallar el coste de inversión para un caudal cualquiera de la soplante. La ecuación de la función interpolada queda explícita en el gráfico.

La ecuación obtenida de la gráfica construida por Excel es la siguiente:

$$Y = 8 \cdot 10^{-8} X^2 + 0.0666X + 1446.7$$

Siendo **Y** el coste de inversión de la soplante y **X** su caudal.

Por tanto, a un caudal **X** de  $20000\text{m}^3/\text{h}$ , su coste de inversión **Y** será:

$$Y = 8 \cdot 10^{-8} \cdot (20000\text{m}^3/\text{h})^2 + 0.0666 \cdot 20000\text{m}^3/\text{h} + 1446.7 = 2811\$$$

No obstante, este precio es válido para el año en que fue publicado el libro, 1990. Por tanto deberemos actualizar este precio al año actual, el 2010. Aplicando la ecuación 3.1 obtenemos el precio actual.

$$P_n = P_0 \cdot (1+K)^n = 2811\$ \cdot (1+0.035)^{20} = 5593\$ \text{ (ecuación 3.1)}$$

Con  $n=20$  años;  $K=0.035$  de inflación

Seguidamente pasamos a euros el precio actual  $P_n$ :

$$5593\$ \cdot \frac{1\text{€}}{1.3\$} = 4302\text{€} = \text{coste de inversión actualizado de la soplante}$$

## C.2 Costes de inversión de la bomba.

Sabiendo que los caudales de gas oscilan entre 5000 y 300000 m<sup>3</sup>/h, el caudal de agua de la bomba para humidificar el gas al 95% se sitúa en torno a 11 y 637 m<sup>3</sup>/semana. En este rango de caudales de la bomba su coste de inversión es de 850€ (adaptado de Catálogo Coole Parmer)

- D. Tuberías (10% de los costes capitales)**
- E. Eléctrico (4% de los costes capitales)**
- F. Equipamiento de instalación (4% de los costes capitales)**
- G. Diseño de ingeniería (10% de los costes capitales)**
- H. Revestimiento necesario**

Para calcular el coste de revestimiento del biofiltro primero debemos saber su área, A<sub>rev</sub>.

$$A_{rev} = W \cdot L + 2 \cdot H \cdot (L + W) = 467 \text{ m}^2 + 2 \cdot 21.60 \text{ m} \cdot (21.60 + 21.60) = \\ = 579 \text{ m}^2 \text{ (ecuación 3.19)}$$

A continuación sabiendo que el coste del material tipo 3-mil PE es de 23.87 €/m<sup>2</sup> establecemos el coste del revestimiento. .

$$C_{rev} = C_{rev} \cdot A_{rev} = 23.87 \text{ €/m}^2 \cdot 579 \text{ m}^2 = 13832 \text{ € (ecuación 3.22)}$$

- I. Movilización y demovilización de personal de construcción y equipamiento ( 5425€ suma total)**

- J.Otros (5425€ suma total para licencias, piezas derepuesto, permisos, etc)**

Una vez vistos todos los gastos que inciden sobre los costes de inversión procedemos a calcular el coste total de inversión, X:

$$X = \frac{C_{empl} + B + C_{buf} + C_{hum} + C_{rev} + I + C_{div}}{0.7} = \\ \frac{8526 + 26018 + 4302 + 850 + 13832 + 5425 + 5425}{0.7} =$$

= **coste de inversión total = 91968€**

(ecuación 3.23)

Ahora calculamos aquellos costes que dependen de los costes de inversión:

- Coste de tuberías =  $0.10 \times 91968\text{€} = 9197\text{ €}$  (ecuación 3.15)

- Coste eléctrico =  $0.04 \times 91968\text{€} = 3679\text{ €}$  (ecuación 3.16)

- Equipamiento de instalación =  $0.04 \times 91968\text{€} = 3679\text{€}$  (ecuación 3.17)

- Ingeniería de diseño =  $0.12 \times 91968\text{€} = 11036\text{ €}$  (ecuación 3.18)

## COSTES ANUALES OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

### A. Electricidad (una soplante y una bomba humidificadora de agua)

Determinaremos los costes de electricidad de la soplante y la bomba humidificadora a partir de la potencia de cada una.

Primero calculamos la potencia de ambos impulsores de fluidos.

$$Pot_{bomba} = 1.75 \cdot 10^{-7} \cdot Q \cdot \tau \cdot (1 + FS) = 1.75 \cdot 10^{-7} \cdot 20000 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 70 \text{ s} \cdot (1 + 0.2) = 0.294 \text{ CV}$$

(ecuación 3.24)

$$\begin{aligned} Potencia \text{ soplante (KW)} &= 3.649 \cdot 10^{-4} \cdot caudal(\text{m}^3/\text{h}) = 3.649 \cdot 10^{-4} \cdot 20000 \text{ m}^3/\text{h} = \\ &= 7.3 \text{ kW} \end{aligned}$$

(ecuación 3.26)

Asimismo calculamos los costes eléctricos de ambos equipos.

$$\begin{aligned} C_{bomba}^{elect} &= Pot_{bomba} \cdot 0.75 \cdot \frac{\text{horas trabajadas}}{1 \text{ día}} \cdot \frac{\text{días trabajados}}{1 \text{ año}} \cdot \text{coste eléct} = \\ &= 0.294 \text{ CV} \cdot \frac{0.75 \text{ kW}}{1 \text{ CV}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \cdot \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}} \cdot 0,0868 \frac{\text{€}}{\text{kW} \cdot \text{hora}} = 168 \text{ €/año} \end{aligned}$$

(ecuación 3.25)

$$\begin{aligned} C_{soplante}^{elect} \left( \frac{\text{€}}{a} \right) &= Pot(KW) \cdot \frac{365 d}{1 a} \cdot \frac{24 h}{1 d} \cdot \text{coste eléct.} \left( \frac{\text{€}}{KW \cdot h} \right) = \\ &= 7.3 \text{ kW} \cdot \frac{365 d}{1 a} \cdot \frac{24 h}{1 d} \cdot 0,0868 \frac{\text{€}}{\text{kW} \cdot \text{h}} = 5550 \text{ €/año} \end{aligned}$$

(ecuación 3.27)

El consumo eléctrico total será la suma de ambos costes de la bomba y soplante.

$$C_{total}^{elect} = C_{bomba}^{elect} + C_{soplante}^{elect} = 168 + 5550 = 5718 \text{ €/año} \quad (\text{ecuación 28})$$

## B. Consumo de agua

La bomba consume una cantidad de agua establecida en función de su caudal que corresponderá precisar inicialmente  $Q_a$ .

$$Q_a = V_{seg} \cdot V_{H_2O} = 467 m^2 \cdot 0.091 \frac{m^3 H_2O}{semana \cdot m^2} = 42.5 m^3 / semana$$

(ecuación 3.29)

Seguidamente calculamos el coste anual del agua consumida por la bomba.

$$C_a' = \frac{365 \cdot Q_a \cdot C_a}{7} = \frac{365 \cdot 42.5 m^3 / semana \cdot 0.7596 \text{ €/m}^3}{7} = 1682 \text{ €/año}$$

(ecuación 3.30)

## C. Trabajo

Se requerirá una persona que manipule el biofiltro una hora diaria durante todo el año cobrando un salario de 21.7 €/h.

$$365 \cdot n^{\circ} \text{ horas trabajo diario} \cdot salario trabajador (\text{€/h}) \cdot n^{\circ} \text{ trabajadores} = costes de trabajo$$

$$365 \text{ días} \cdot \frac{1 \text{ h}}{1 \text{ día}} \cdot 21.7 \frac{\text{€}}{\text{h}} \cdot 1 \text{ trabajador} = 7921 \text{ €/año}$$

(ecuación 3.31)

## D. Gastos fijos (25% costes de trabajo)

$$Gastos fijos = costes de trabajo \cdot \frac{25}{100} = 7921 \text{ €/año} \cdot \frac{25}{100} = 1980 \text{ €/año}$$

(ecuación 3.32)

**Costes operación anual** = costes de electricidad + costes de consumo de agua +  
+ costes de trabajo + gastos fijos =

$$= 5718 + 1682 + 7921 + 1980 = 17301 \text{ €/año}$$

(ecuación 3.33)

## COSTES DE SUBSTITUCIÓN DEL LECHO (CADA 5 AÑOS)

### A. Costes de eliminación del medio antiguo

En la eliminación del medio antiguo existen tres operaciones básicas que son la excavación, el transporte y la disposición del medio. Este coste es de 14€/m<sup>3</sup> (Fuentes empresa COPISA, Barcelona). Por tanto el coste de extracción del medio se obtiene de la siguiente manera (ecuación 3.34):

$$C_{extr}^{med} = V_{seg} \cdot C_{exc} = 467 m^3 \cdot 14 \frac{\text{€}}{m^3} = 6533 \text{ €/actuación}$$

### B. Adición del nuevo medio

En la adición del nuevo medio se precisará comprar el relleno, alquilar unos equipos, realizar un trabajo para introducir el relleno y implicará otros gastos fijos. Es decir que tendremos que contabilizar este conjunto de gastos y lo calculamos así:

$$C_{ad}^{med} = (C_{rell} + C_{alq} + C_{trab} + C_{ben}) \cdot V_{seg} = 20913 \text{ €/actuación}$$

(ecuación 3.35)

Finalmente para establecemos el coste de substitución del lecho:

$$C_{rep}^{med} = C_{extr}^{med} + C_{ad}^{med} = 6533 + 20913 = 27446 \text{ €/actuación}$$

(ecuación 3.36)

## COSTES ANUALIZADOS

### A. Costes de inversión

1. Asumimos un 8% de interés a 15 años
2. Costes de capital anual =  $91968\text{€} \times (A/P, 8\%, 15) = 91968\text{€} \times (0.11683) = 10744 \text{€/año}$   
(ecuación 3.37)

i = interés (tanto por uno) = 0.08

n= número de años = 15 años

$$A/P = \text{pago anual} = \frac{i(i+1)^n}{(1+i)^n - 1}$$

A/P=0,11683

(ecuación 3.38)

### B. Costes de operación

**Asumimos un 3.5 % de porcentaje de inflación a 15 años:**

$$\text{Coste total a 15 años} = \sum_1^n 17301\text{€} \cdot (F / P, 3.5\%, 15) = 345523\text{€}$$

(ecuación 3.39)

En realidad lo que hemos hecho es sumar el coste de operación de cada año teniendo en cuenta que anualmente sube un poco el coste de operación a causa de la inflación. Una vez tengamos la suma total de los 15 años dividiremos por los años totales, es decir 15 años. De este modo tendremos un coste de operación anual promedio.

$$\frac{\text{Coste total a 15 años}}{15 \text{ años}} = C_{op}^{\text{anualiz}} = \frac{345523 \text{€}}{15 \text{ años}} =$$

=coste de operación anualizado=23035 €/año

(ecuación 3.41)

## COSTES DE SUBSTITUCIÓN DEL MEDIO ANUALIZADO

Asumimos un 3.5% de inflación y un 8% de interés a 15 años. El medio será cambiado después de 5 y 10 años sólo.

$$\begin{aligned} \text{Costes anuales de repuesto de medio} &= 27446 \text{ €/actuación} \times (F/P, 3.5\%, 5) \times (P/F, 8\%, 5) \\ &\times (A/P, 8\%, 15) + 27446 \text{ €/actuación} \times (F/P, 3.5\%, 10) \times (P/F, 8\%, 10) \times (A/P, 8\%, 15) = \\ &= 27446 \text{ €/actuación} \times 1.19 \times 0.6806 \times 0.1168 + 27446 \text{ €/actuación} \times 1.41 \times 0.4632 \times \\ &0.1168 = \mathbf{4687 \text{ €/año}} \end{aligned}$$

**Costes totales anualizados** = costes de inversión anualizados + costes de operación del medio anualizados + costes de substitución del medio anualizados =  $10674 \text{ €/año} + 23035 \text{ €/año} + 4687 \text{ €/año} = \mathbf{38396 \text{ €/año}}$

## OTRAS ESTIMACIONES DE COSTE

### A. Costes de inversión por unidad de volumen

1. Costes de inversión/ volumen de lecho de biofiltro
2.  $91968\text{€} / 467\text{m}^3 = \mathbf{197\text{€/m}^3}$  de lecho de biofiltro

### B. Coste de inversión por índice de flujo

1. Coste de capital/ índice de flujo
2.  $91968\text{€} / 20000 \text{ m}^3\text{h}^{-1} = 4.6 \text{ € m}^{-3}\text{h}$

### C. Costes de operación por volumen de aire tratado

1. Costes de operación por cada  $1000\text{m}^3$  de aire tratado
2. En un año, 150 millones de metros cúbicos de aire serán tratado a un flujo de  $20000\text{m}^3\text{h}^{-1}$

$$\frac{\text{Coste de operación}}{1000\text{m}^3\text{aire tratado}} = \frac{1000 \cdot C_{op}^{\text{año}}}{Q \cdot 365 \cdot 24} = \frac{1000 \cdot 23035 \text{ €/año}}{20000\text{m}^3/h \cdot 365 \cdot 24} = \\ = \mathbf{0.13\text{€/1000m}^3}$$

(ecuación 3.46)

### D. Costes anuales por volumen de aire tratado

1. Costes anuales por cada  $1000 \text{ m}^3$  de aire tratado
2. En un año, 150 millones de metros cúbicos de aire serán tratados a un flujo de  $20000\text{m}^3\text{h}^{-1}$

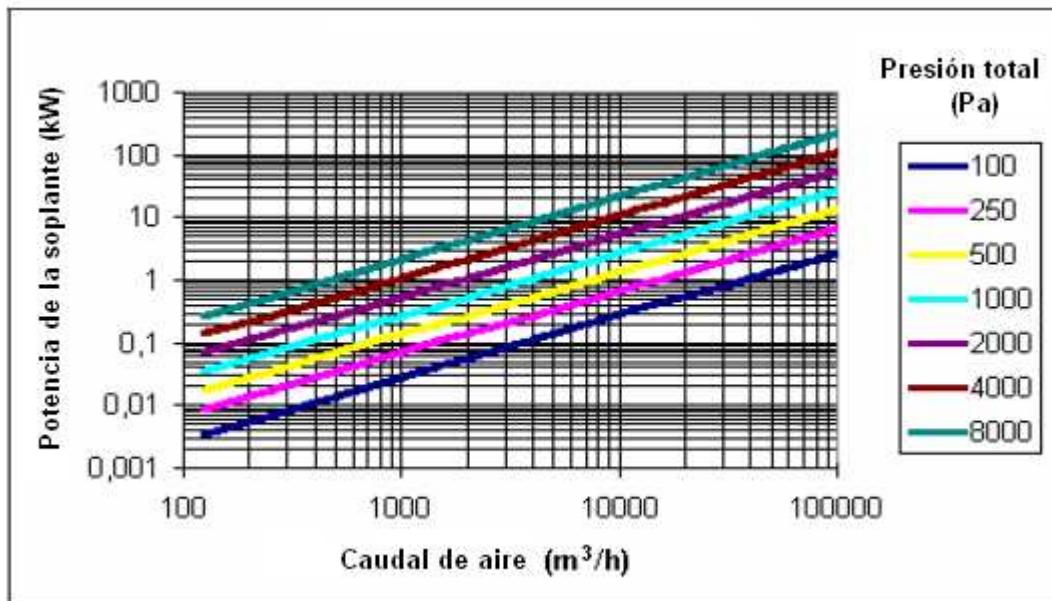
$$\frac{\text{Coste total anualizado}}{1000\text{m}^3\text{aire tratado}} = \frac{1000 \cdot C_{total}^{\text{anualiz}}} {Q \cdot 365 \cdot 24} = \frac{1000 \cdot 38396 / \text{año}}{20000\text{m}^3/h \cdot 365 \cdot 24} = \mathbf{0.22 \text{ €/1000 m}^3}$$

(ecuación 3.47)

## ANEXO B:

### COSTES DE OPERACIÓN DE LA SOPLANTE

Para determinar el coste eléctrico de la soplante utilizamos la gráfica de la figura 7.1. A partir del caudal de operación y escogiendo la recta adecuada podremos saber la potencia de consumo de la soplante y seguidamente su coste.



**Figura 7.2** Diagrama en el que se muestra la potencia de una soplante en función de su caudal para diferentes presiones totales. En nuestro caso escogeremos la línea azul celeste (Adaptado de <http://www.engineeringtoolbox.com>).

Primero decidiremos cuál de las siguientes rectas será la que utilizaremos. Cada recta corresponde a la presión de trabajo que ejerce la soplante sobre el gas. Por las características del tipo de soplante con la que trabajamos la presión que ejerce es equivalente a la presión de una columna de agua de diez centímetros (Cool Parmer). De modo que procederemos a calcular la presión de dicha columna en pascales.

$$P_{H_2O} = \rho_{H_2O} \cdot g \cdot h_{H_2O}$$

$P_{H_2O}$  = presión de la columna de agua (Pa)

$\rho_{H_2O}$  = densidad del agua ( $\text{kg/m}^3$ )

$h_{H_2O}$  = altura de la columna de agua (m)

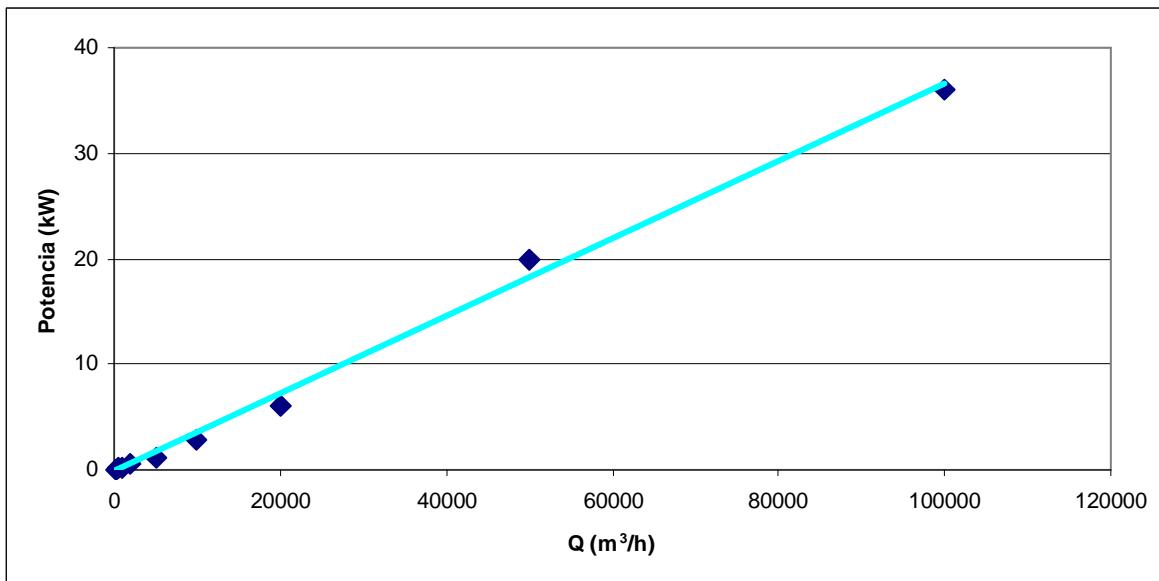
$$P_{H_2O} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 10 \text{ cm} \cdot \frac{1\text{m}}{100\text{cm}} = 981 \text{ Pa}$$

Para que nos sea más cómodo utilizaremos la recta que posee una presión de trabajo de 1000 Pa, la de color azul celeste. La potencia y, por consiguiente, el coste de funcionamiento de la soplante estarán un poco sobredimensionados pero se aproximarán bastante.

Observamos además que nuestra recta de la figura 7.2 es muy gruesa y que, a la hora de definir visualmente los puntos de operación, puede inducir a errores. Por este motivo reconstruiremos dicha gráfica a partir de puntos representativos escogidos visualmente. De todos estos puntos, mostrados en la tabla 7.2, dibujaremos una recta de regresión lineal que será finalmente la recta (figura 7.3) que utilizaremos para determinar la potencia de consumo de la soplante.

**Tabla 7.2** Puntos representativos de la recta azul celeste de la figura 7.1 Caudal vs. Potencia.

Q ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	Potencia (kW)
200	0,055
500	0,14
1000	0,27
2000	0,5
5000	1,2
10000	2,8
20000	6
50000	20
100000	36



**Figura 7.3** Representación de unos cuantos puntos del diagrama caudal vs. potencia de la figura anterior y su recta de regresión lineal. El objeto de esta gráfica es minimizar el error visual del individuo al buscar visualmente los valores de la potencia en función de su caudal.

La ecuación de la recta de regresión se define mediante la siguiente expresión:

$$Potencia soplante (KW) = 3.649 \cdot 10^{-4} \cdot caudal(m^3 / h)$$

Asimismo, una vez hemos determinado la potencia de consumo, seguiremos con la obtención del coste anual de operación de dicha soplante.

$$Pot(KW) \cdot \frac{365d}{1a} \cdot \frac{24h}{1d} \cdot \text{coste eléct.} \left( \frac{\epsilon}{KW \cdot h} \right) = \text{coste eléct soplante anual} \left( \frac{\epsilon}{a} \right)$$

## ANEXO C:

### TABLAS

Seguidamente realizamos unos cálculos intermedios que obtendremos operando con los datos de entrada de las tres tablas anteriores:

**Tabla 7.3** Parámetros de salida calculados a partir de los datos de entrada aplicando las ecuaciones que se indican.

Parámetros del biofiltro	Valores obtenidos	Ecuaciones
Volumen mínimo relleno principal ( $m^3$ )	389	1.1
Volumen de seguridad relleno principal ( $m^3$ )	467	3.2
Volumen material de soporte ( $m^3$ )	142	3.3
Volumen total a excavar ( $m^3$ )	609	3.4
Altura total de relleno (m)	1,305	*
Ancho (m)	21,60	3.21
Largo (m)	21,60	3.21
Área de revestimiento requerida ( $m^2$ )	579	3.19

(\*) La altura total del medio es la suma de la altura del soporte, 0,305 metros, más la altura del relleno, 1 metro.

**Tabla 7.4** Cálculos intermedios de costes de inversión.

	Coste (€)	Ecuaciones
Relleno principal	18736	3.6
Material de soporte	5097	3.7
Alquiler de equipos	356	3.8
Trabajo	559	3.9
Gastos fijos	1271	3.10
Soplante	3880	3.13

**Tabla 7.5** Consumo total del agua utilizada para humidificar la torre empacada del biofiltro.

	Ecuaciones
V agua por unidad de superficie y tiempo ( $m^3/m^2\cdot$ semana)	0,091
Precio agua (€/ $m^3$ )	0,76
Q agua aportado ( $m^3/\text{semana}$ )	36,1
<b>COSTE TOTAL AGUA (€/año)</b>	<b>1682</b>

(\*) Adaptado de Devinny, Joseph, S., Biofiltration for Air Pollution Control, 1999.

**Tabla 7.6** Consumo eléctrico originado por la bomba humidificadora y la soplante.

		Ecuaciones
Coste electricidad (€/kWh)	0,087	*
Potencia bomba humidificación (KW)	0,25	*
Potencia soplante (KW)	7,3	3.26
coste elect. Soplante (€/año)	5550	3.27
Coste elect. bomba humidificación (€/año)	190	3.25
<b>COSTE ELÉCTRICO TOTAL (€/año)</b>	<b>5740</b>	**

(\*) Adaptado de Devinny, Joseph, S., Biofiltration for Air Pollution Control, 1999.

(\*\*) Coste eléctrico de la bomba más coste eléctrico de la soplante

**Tabla 7.7** Costes de trabajo de los operarios de un biofiltro. Datos adaptados de Devinny, Joseph, S., Biofiltration for Air Pollution Control, 1999.

Número de trabajadores	1
Tiempo trabajo diario (h/día)	1
Tiempo de trabajo anual (días/año)	365
Salario del trabajador (€/h)	22
<b>COSTE DE TRABAJO TOTAL (€/año)</b>	7921 (*)

(\*) Resultado calculado mediante la ecuación 3.31

**Tabla 7.8** Resultados de los costes principales a medida que va variando el caudal del gas a tratar.

caudal (m <sup>3</sup> /h)	COSTES			
	Inversión (€/año)	Operación (€/año)	Recambio medio (cada 5 años)	Total (€/año)
50000	22872	37508	11718	72097
100000	43133	61580	23435	128148
150000	63418	85653	35153	184223
200000	83760	109725	46870	240355
250000	104171	133797	58588	296556
300000	124658	157869	70305	352833

**Tabla 7.9** Representación de la evolución de algunos costes unitarios en función de algunos parámetros interesantes.

caudal (m <sup>3</sup> /h)	COSTES			
	Inversión/volumen reactor (€/m <sup>3</sup> )	Inversión/caudal de aire (€/m <sup>3</sup> /h)	Operación (€/1000 m <sup>3</sup> aire)	Anualizados (€/1000 m <sup>3</sup> aire)
50000	168	3,915	0,086	0,165
100000	158	3,692	0,0703	0,1463
150000	155	3,619	0,0652	0,1402
200000	154	3,585	0,0626	0,1372
250000	153	3,567	0,0611	0,1354
300000	152	3,557	0,0601	0,1343

**Tabla 7.10** Costes generales a diferentes precios del medio.

COSTES				
Medio (€/m <sup>3</sup> )	Inversión (€/año)	Operación (€/año)	Recambio medio (cada 5 años)	Total (€/año)
20	9105	23065	3081	35251
40	10663	23065	4675	38403
60	12221	23065	6269	41554
80	13778	23065	7863	44706
100	15336	23065	9457	47857
120	16894	23065	11051	51009

**Tabla 7.11** Costes unitarios del biofiltro variando los precios del medio.

COSTES				
Medio (€/m <sup>3</sup> )	Inversión/volumen reactor (€/m <sup>3</sup> )	Inversión/caudal de aire (€/m <sup>3</sup> /h)	Operación (€/1000 m <sup>3</sup> aire)	Anualizados (€/1000 m <sup>3</sup> aire)
20	167	3,897	0,1316	0,2012
40	196	4,563	0,1316	0,2192
60	224	5,23	0,1316	0,2372
80	253	5,897	0,1316	0,2552
100	281	6,563	0,1316	0,2732
120	310	7,23	0,1316	0,2911

**Tabla 7.12** Costes principales en función de la durabilidad del lecho.

Durabilidad del material (años)	COSTES			
	Inversión (€/año)	Operación (€/año)	Recambio medio (cada 5 años)	Total (€/año)
3	10674	23065	9416	43155
6	10674	23065	4408	38147
9	10674	23065	2186	35925
12	10674	23065	1924	35663

**Tabla 7.13** Costes unitarios en función de la durabilidad del lecho.

Durabilidad del material (años)	COSTES			
	Inversión/volumen reactor (€/m³)	Inversión/caudal de aire (€/m³/h)	Operación (€/1000 m³ aire)	Anualizados (€/1000 m³ aire)
3	196	4,568	0,1316	0,2463
6	196	4,568	0,1316	0,2177
9	196	4,568	0,1316	0,2051
12	196	4,568	0,1316	0,2036

**Tabla 7.14** Costes principales anuales del biofiltro a medida que cambia su caudal. En la figura 4.3 existe se muestran estos resultados.

caudal (m³/h)	coste inversión (€/año)	coste operación (€/año)	coste recambio medio (cada 5 años)	coste total (€/año)
50000	22872	37813	11718	72402
100000	43133	62444	23435	129012
150000	63418	87074	35153	185645
200000	83760	111705	46870	242335
250000	104171	136335	58588	299094
300000	124658	160966	70305	355929

**Tabla 7.15** Diferentes costes de operación anuales en función del caudal (Representación gráfica en la figura 4.4)

Caudal(m³/h)	Costes de operación (€/año)			
	Electricidad	Aqua	Trabajo	Gastos fijos
50000	14295	4205	7921	1980
100000	28590	8410	7921	1980
150000	42885	12614	7921	1980
200000	57180	16819	7921	1980
250000	71475	21024	7921	1980
300000	85770	25229	7921	1980

**Tabla 7.16** Costes anuales de funcionamiento de la bomba y la soplante (figura 4.5).

Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Coste (€/año)	
	Bomba	Soplante
50000	419	13876
100000	839	27751
150000	1258	41627
200000	1677	55503
250000	2097	69378
300000	2516	83254

**Tabla 7.17** Costes principales a varios tiempos de residencia (figura 4.7)

Tiempo de residencia (s)	Costes (€)			
	Inversión	Operación	Recambio medio (cada 5 años)	Total
30	52746	324415	30131	407291
60	81759	340246	60262	482266
90	110529	356077	90392	556998
120	139173	371908	120523	631604

**Tabla 7.18** Representación de los costes fundamentales por unidad de volumen de gas a tratar (figura 4.6).

Q (m <sup>3</sup> /h)	Inversión (€)	Inversión/ Caudal de aire (€/m <sup>3</sup> /h)	Operación/ Caudal de aire (€/m <sup>3</sup> /h)	Substitución lecho/ Caudal de aire (€/m <sup>3</sup> /h)	Total / Caudal de aire (€/m <sup>3</sup> /h)
50000	343073	6,86	11,34	3,52	21,72
100000	646993	6,47	9,37	3,52	19,35
150000	951269	6,34	8,71	3,52	18,56
200000	1256396	6,28	8,38	3,52	18,18
250000	1562566	6,25	8,18	3,52	17,95
300000	1869877	6,23	8,05	3,52	17,80

**Tabla 7.19** Costes principales variando el precio del medio (figura 4.8).

Costes del Medio (€/m <sup>3</sup> )	Costes (€/año)			
	Inversión	Operación	Recambio medio (cada 5 años)	Total
50	97935	259518	64088	421541
100	131269	259518	110755	501541
150	164602	259518	157421	581541
200	197935	259518	204088	661541

**Tabla 7.20** Costes principales variando el precio del soporte (figura 4.9).

Coste del soporte (€/m <sup>3</sup> )	Costes (€)			
	Inversión	Operación	Recambio medio (cada 5 años)	Total
50	94253	345523	70305	510081
100	104420	345523	70305	520248
150	114586	345523	70305	530414
200	124753	345523	70305	540581

**Tabla 7.21** Costes totales en función del tiempo de reposición de lecho (figura 4.10).

durabilidad del material (años)	Costes (€)			
	Inversión	Operación	Recambio medio	Total
3	160116	345970	141247	647332
6	160116	345970	66121	572206
9	160116	345970	32793	538878
12	160116	345970	28862	534948

**Tabla 7.22** Costes principales según los valores del factor de seguridad (figura 4.11).

Factor de Seguridad	Costes (€)			
	Inversión	Operación	Recambio medio	Total
0,1	85765	342445	64446	492656
0,2	91367	345523	70305	507195
0,3	96963	348601	76164	521728

**Tabla 7.23** Costes principales variando el precio de excavación (figura 4.12).

Costes excavación (€/m <sup>3</sup> )	Costes (€)			
	Inversión	Operación	Recambio medio (cada 5 años)	Total
10	87887	345523	65524	498933
12	89627	345523	67914	503064
14	91367	345523	70305	507195
16	93107	345523	72696	511326
18	94847	345523	75087	515457
20	96587	345523	77477	519587

**Tabla 7.24** Costes principales variando la altura del relleno (figura 4.13).

Altura del compost (m)	Costes (€)			
	Inversión	Operación	Recambio medio (cada 5 años)	Total
0,5	117648	345523	70305	533476
1	91367	345523	70305	507195
1,5	82941	345523	70305	498768
2	78939	345523	70305	494767
2,5	76686	345523	70305	492514

**Tabla 7.25** Costes del biofiltro a diferentes alturas del soporte (figura 4.14).

Altura del soporte (m)	Costes (€)			
	Inversión	Operación	Recambio medio (cada 5 años)	Total
0,2	87320	345523	70305	503148
0,25	89247	345523	70305	505075
0,3	91174	345523	70305	507002
0,35	93102	345523	70305	508930
0,4	95029	345523	70305	510857

**Tabla 7.26** Costes fundamentales en función de los costes de alquiler de equipos (figura 4.15).

Coste alquiler equipos (€/m <sup>3</sup> )	Costes (€)			
	Inversión	Operación	Recambio medio (cada 5 años)	Total
0,4	91127	345523	69875	506525
0,6	91260	345523	70114	506898
0,8	91394	345523	70353	507270
1	91528	345523	70593	507643
1,2	91662	345523	70832	508016
1,4	91796	345523	71071	508389

**Tabla 7.27** Costes totales variando los costes de trabajo (figura 4.16).

Coste trabajo (€/m <sup>3</sup> )	Costes (€)			
	Inversión	Operación	Recambio medio (cada 5 años)	Total
0,8	91104	345523	69835	506461
1	91238	345523	70074	506834
1,2	91371	345523	70313	507207
1,4	91505	345523	70552	507580
1,6	91639	345523	70791	507953
1,8	91773	345523	71030	508326

**Tabla 7.28** Costes principales en función de los gastos fijos (figura 4.17).

Gastos fijos (€/m <sup>3</sup> )	Costes (€)			
	Inversión	Operación	Recambio medio (cada 5 años)	Total
1,5	90556	345523	68855	504934
2	90890	345523	69453	505866
2,5	91225	345523	70051	506798
3	91559	345523	70649	507731
3,5	91894	345523	71246	508663

**Tabla 7.29** Costes básicos en función del porcentaje de gastos fijos sobre el trabajo de los operarios (figura 4.18).

gastos fijos (%)	Costes (€)			
	Inversión	Operación	Recambio medio (cada 5 años)	Total
15	160116	329704	70305	560124
20	160116	337613	70305	568034
25	160116	345523	70305	575944
30	160116	353432	70305	583853

**Tabla 7.30** Costes básicos en función de diferentes costes de revestimiento (figura 4.19).

Coste revestimiento (€/m <sup>2</sup> )	Costes (€)			
	Inversión	Operación	Recambio medio (cada 5 años)	Total
10	79885	345523	70305	495713
20	88162	345523	70305	503990
30	96440	345523	70305	512268
40	104718	345523	70305	520545

**Tabla 7.31** Costes principales variando el porcentaje de costes de las tuberías respecto de los costes totales de inversión (figura 4.20).

Coste de tuberías (%)	Costes (€)			
	Inversión	Operación	Recambio medio (cada 5 años)	Total
0,05	85276	345523	70305	501104
0,1	91367	345523	70305	507195
0,15	98395	345523	70305	514223
0,2	106595	345523	70305	522423
0,25	116285	345523	70305	532113
0,3	127914	345523	70305	543742

**Tabla 7.32** Costes principales a diferentes porcentajes del coste eléctrico respecto la inversión total (figura 4.21).

Coste eléctrico (%)	Costes (€)			
	Inversión	Operación	Recambio medio (cada 5 años)	Total
0,02	88829	345523	70305	504657
0,04	91367	345523	70305	507195
0,06	94054	345523	70305	509882
0,08	96905	345523	70305	512732
0,1	99933	345523	70305	515761

**Tabla 7.33** Costes fundamentales en función del porcentaje del coste de instalación de equipos referidos al coste de inversión total (figura 4.22).

Coste instalación equipos (%)	Costes (€)			
	Inversión	Operación	Recambio medio (cada 5 años)	Total
0,02	88829	345523	70305	504657
0,04	91367	345523	70305	507195
0,06	94054	345523	70305	509882
0,08	96905	345523	70305	512732
0,1	99933	345523	70305	515761

**Tabla 7.34** Costes básicos en función del porcentaje de los costes de ingeniería de diseño (figura 4.23).

Coste ingeniería de diseño (%)	Costes (€)			
	Inversión	Operación	Recambio medio (cada 5 años)	Total
0,05	83061	345523	70305	498889
0,1	88829	345523	70305	504657
0,15	95458	345523	70305	511286
0,2	103156	345523	70305	518984
0,25	112205	345523	70305	528033

**Tabla 7.35** Costes principales a diferente coste de eléctrico (figura 4.24).

Coste electricidad (€/kWh)	Costes (€)			
	Inversión	Operación	Recambio medio (cada 5 años)	Total
0,04	160116	283949	70305	514370
0,06	160116	310259	70305	540680
0,08	160116	336569	70305	566990
0,1	160116	362879	70305	593300
0,12	160116	389190	70305	619610

**Tabla 7.36** Costes fundamentales variando la potencia de la bomba de humidificación (figura 4.25).

Potencia bomba (kW)	Costes (€)			
	Inversión	Operación	Recambio medio (cada 5 años)	Total
0,2	160116	344451	70305	574872
0,4	160116	346729	70305	577150
0,6	160116	349007	70305	579428
0,8	160116	351285	70305	581706
1	160116	353563	70305	583984

**Tabla 7.37** Costes principales en función del caudal de la bomba (figura 4.26).

Caudal de agua (m³/m²/semana)	Costes (€)			
	Inversión	Operación	Recambio medio (cada 5 años)	Total
0,06	160116	332939	70305	563360
0,08	160116	341058	70305	571478
0,1	160116	349176	70305	579597
0,12	160116	357295	70305	587715

**Tabla 7.38** Costes básicos a diferente coste del agua (figura 4.27).

Precio del agua (€/m³)	Costes (€)			
	Inversión	Operación	Recambio medio (cada 5 años)	Total
0,2	160116	320778	70305	551199
0,4	160116	329622	70305	560043
0,6	160116	338467	70305	568888
0,8	160116	347311	70305	577732
1	160116	356156	70305	586577
1,2	160116	365000	70305	595421

**Tabla 7.39** Costes principales dependiendo de las horas diarias dedicadas a la manipulación del biofiltro (figura 4.28).

Trabajo diario (horas/día)	Costes (€)			
	Inversión	Operación	Recambio medio (cada 5 años)	Total
1	160116	345523	70305	575944
2	160116	543262	70305	773683
3	160116	741002	70305	971423

**Tabla 7.40** Costes totales a razón de la cantidad de días trabajados al año (figura 4.29).

Trabajo anual (días/año)	Costes (€)			
	Inversión	Operación	Recambio medio (cada 5 años)	Total
240	160116	277804	70305	508225
280	160116	299474	70305	529895
320	160116	321144	70305	551565
360	160116	342814	70305	573235

**Tabla 7.41** Costes fundamentales en función del salario del operario que manipula el biofiltro (figura 4.30).

Salario trabajador(€/h)	Costes (€)			
	Inversión	Operación	Recambio medio (cada 5 años)	Total
10	160116	238901	70305	469322
15	160116	284460	70305	514881
20	160116	330019	70305	560440
25	160116	375578	70305	605999

**Tabla 7.42** Costes de operación por cada 1000 m<sup>3</sup> de aire tratado para diferentes caudales de gas (figura 4.31).

Q (m <sup>3</sup> /h)	Costes	
	Operación (€/año)	Operación / Volumen aire tratado (€/1000m <sup>3</sup> )
50000	37813	0,0863
100000	62444	0,0713
150000	87074	0,0663
200000	111705	0,0638
250000	136335	0,0623
300000	160966	0,0613