

«Evaluación de costes de las mejoras medioambientales atmosféricas»

La necesidad de adaptación a una normativa medioambiental europea, como paso previo para una competitividad real del sector industrial, hace necesario el planteamiento de una gestión medioambiental integral. Dentro de este contexto, la limitación de emisiones atmosféricas plantea entre otras alternativas, la utilización de sistemas de control, cuya elección viene marcada, no solamente por necesidades técnicas, sino, en una parte muy importante, por factores económicos. La elección final viene determinada, habitualmente, por la posibilidad del equipo de cumplir las regulaciones de emisión al más bajo coste. Es necesario, por lo tanto, realizar un análisis de los diversos componentes que afectan el coste de las mejoras medioambientales, producidas por la utilización de equipos de control, evaluando cada uno de ellos dentro de una estimación global.

Industri sektorearen benetako konpetitibitate baterako aurrepauso bezala, ingurugiroari buruz Europa mailako arautegi bat ezarri beharra, ezinbestekoa gertatzen da inguruneari buruzko gestio integral bat planteatzeko orduan. Testuinguru honen harnean, eguratserako jaulkipenak mugatzeak, zera planteatzen du, beste alternatiben artean: beren hautapena beharizan teknikoek ezezik neurri handi batean faktore ekonomikoek ere markatua egongo den kontrol-sistemak erabiltzea. Azken hautapena, jeneralean, ekipoak jaulkipenen erregulazioa ahalik eta kosturik bajeanean egiteko duen gaitasunak erabakia egon ohi da. Horregatik, bada, kontrol-ekipoen era-bilpenak eragindako ingurugiro-hobekuntzen kostuan parte hartzen duten osagai desberdinen azterketa bat egin beharra dago, horietako bakoitza estimazio global baten barnean ebaluatuz.

The need for adaptation to a European environmental standard, as a previous step towards real competitiveness in the industrial sector, makes it necessary to consider integral environmental management. Within this context, the limitation of atmospheric emissions involves, among other alternatives, the use of control systems, the choice of which is determined, not only by technical requirements, but, to a great extent, by economic factors. The final choice is determined, normally, by the possibility for equipment to meet emission regulations at the lowest cost. It is necessary, therefore, to analyse the different components which affect the cost of environmental improvements, produced by the use of control equipment, considering each of these within an overall assessment.

- 1. Legislación medioambiental atmosférica europea**
- 2. Control de emisiones. Estrategias**
- 3. Evaluación de los costes. Consideraciones generales**
- 4. Situación en la C.A.P.V.**

Bibliografía

Anexo

A.1. Metodología de cálculo

A.2. Descripción de algunos ejemplos

Palabras clave: Gestión medioambiental, control de emisiones atmosféricas.

Nº de clasificación JEL: K32, Q01, Q51, Q52, Q53, Q56

La gestión de la calidad de aire se puede subdividir en varios aspectos:

- Establecimiento de límites de calidad de los combustibles (fijando el contenido en azufre)
- Establecimiento de los límites de emisión para las fuentes de contaminación y, finalmente,
- Definición de valores de calidad del aire (valores de inmisión).

En el cumplimiento de estas dos últimas facetas se requiere la utilización de una tecnología de control, cuyo coste económico (función de coste) debe ser evaluado e incluido como coste medioambiental en los costes de producción del sector industrial. También se debe computar, en sentido positivo, la repercusión en bienes y servicios derivados de la instalación de las tecnologías de control de la contaminación.

En este artículo se trata de definir, desde un punto de vista práctico, diversos métodos para la evaluación

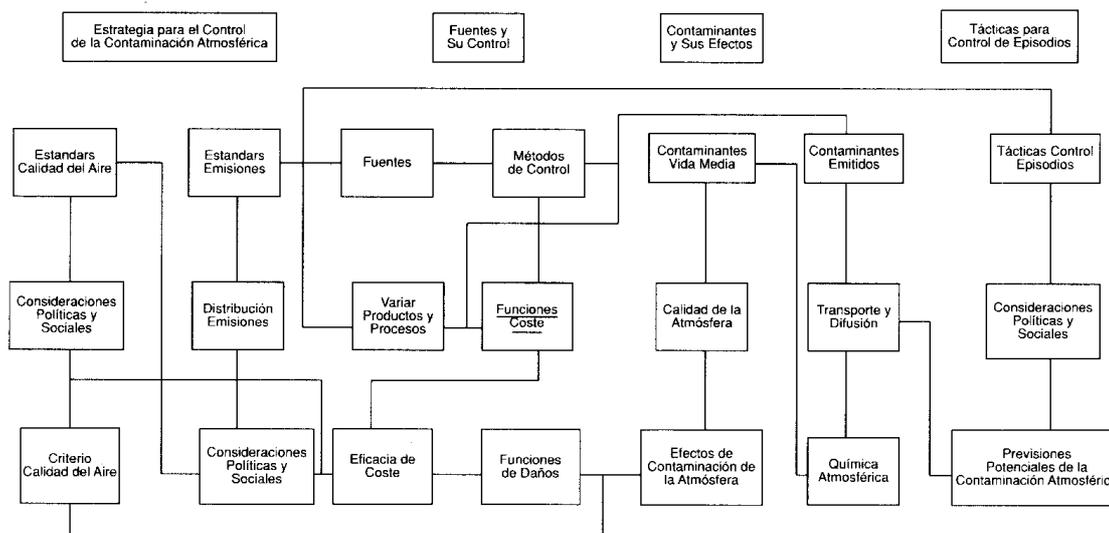
económica de los sistemas de reducción de emisión de contaminantes. En primer lugar se revisa la legislación europea, de obligado cumplimiento para todas las industrias del país, a continuación se realiza una descripción de los modelos económicos utilizados con más frecuencia en este tipo de estudios, aplicando, para finalizar, uno de los métodos descritos a un caso concreto.

1. LEGISLACIÓN MEDIOAMBIENTAL ATMOSFÉRICA EUROPEA

Coherentemente con el esquema presentado anteriormente (gráfico nº 1) la Comunidad Económica Europea ha establecido diferentes normativas dirigidas a cubrir todas las fases mencionadas.

En el tema de calidad de combustibles, es la directiva 75/716/CEE, la que establece medidas restrictivas para el contenido de azufre de los combustibles líquidos.

Gráfico n.º 1. Un modelo del sistema de gestión de contaminación atmosférica



En el control de las fuentes, así como en el establecimiento de valores límites y valores guía para la calidad de aire, la normativa que obliga a nuestras industrias a bajar sus niveles de emisión (excluidas grandes instalaciones, objeto de una normativa especial, 88/609/CEE) viene marcada por la directiva 80/779/CEE, relativa a los valores límite y recomendados de la calidad atmosférica para el anhídrido sulfuroso y las partículas en suspensión, y por la directiva 85/203/CEE, relativa a las normas de calidad del aire para el dióxido de nitrógeno.

Hay que tener en cuenta que, caso de tratarse de fuentes de nueva instalación la normativa es más restrictiva, necesiándose un estudio de evaluación de impacto ambiental.

2. CONTROL DE EMISIONES. ESTRATEGIAS

En la elaboración de los procesos de control de las emisiones atmosféricas se presentan a menudo cinco alternativas, cuyo propósito sería la reducción y/o eliminación de las emisiones de contaminantes:

1. Eliminación del proceso
2. Relocalización de la factoría.
3. Modificación del proceso.
4. Aplicación de la tecnología de reducción adecuada.
5. Combinación de alguno de los anteriores.

Las dos primeras alternativas parecen ser las más drásticas y, tal vez por ello, las más irrealizables. La eliminación de un proceso de fabricación determinado conlleva la mayoría de las veces la desaparición total de una factoría. Por otro lado, una nueva ubicación geográfica normalmente significa la modernización y modificación del proceso, así como la utilización de tecnologías de control de las emisiones. Caso de no poder realizar ninguna de las anteriores acciones, la relocalización de la planta entra en un proceso mucho más complicado, que escapa a la toma de decisiones estrictamente técnicas, necesiándose estudios de tipo socio-económico, e incluso decisiones políticas.

En vista de los relativamente altos costes asociados a menudo con los sistemas de reducción de la

contaminación, la ingeniería está dirigiendo un esfuerzo considerable a la modificación de los procesos para eliminar los problemas en la medida de lo posible, en la fuente. Esto incluye evaluar alternativas de fabricación y técnicas de producción, sustitución de materias primas, y mejora de proceso y métodos de control. Desafortunadamente, si no hay alternativa debe de considerarse la aplicación de equipos reductores (Cuadro nº 1).

La selección apropiada de este equipo es esencial. El equipamiento debe ser diseñado para cumplir con las limitaciones reguladoras de las emisiones en una base igual a la de funcionamiento de la factoría, ya que las interrupciones en el funcionamiento del equipo pueden dar lugar a penalizaciones severas provocadas por la aparición de episodios de contaminación que pueden resultar extremadamente peligrosos, dependiendo de las circunstancias meteorológicas. Los requerimientos de diseño en una base continua conceden una gran importancia a las valoraciones de operación y mantenimiento del equipo de control, ya que la rápida escalada de costes de energía, trabajo, y materiales pueden hacer que éstas resulten partidas económicas aún más importantes que las inversiones iniciales de capital.

Un gran número de factores ha de ser considerado previamente a la selección de un equipo de control de la contaminación ambiental. En general, se pueden agrupar en tres categorías principales: medioambientales, de ingeniería, y económicos.

a) Factores medioambientales

Estos incluyen: espacio aprovechable, condiciones del entorno, aprovechabilidad de medios adecuados (por ejemplo: energía, agua, etc.), medios auxiliares del sistema (por ejemplo: tratamiento y disposición de residuos, etc.), máximas emisiones permisibles (factores de emisión), consideraciones estéticas (por ejemplo: penacho de vapor de agua, etc.), contribución del sistema de control de contaminación aérea a contaminación de aguas o terrenos, y contribución del sistema de control a los niveles de ruido de la planta, así como a la creación de cualquier tipo de residuo.

b) Factores de ingeniería

- Características del contaminante, por ejemplo: propiedades físicas y químicas, concentración, distribución de forma y tamaño (en el caso de partículas), reactividad química, corrosividad, abrasividad, toxicidad, etc.
- Características de la corriente de gas, por ejemplo: volumen de flujo, temperatura, 163 presión, humedad, composición, viscosidad, densidad, reactividad, combustibilidad, etc.
- Características de diseño y realización del sistema particular de control, por ejemplo: tamaño y peso, curvas de eficiencia funcional, transferencia de masa, caída de presión, requerimientos de energía, limitaciones de temperatura y pH, requerimientos de mantenimiento y flexibilidad para el cumplimiento de límites de emisión más restrictivos.

c) Factores económicos

Incluyen costes de capital (equipamiento, instalaciones, ingeniería, etc.), costes de operación (mantenimiento, etc.) y costes de amortización, de acuerdo con la duración prevista para el equipo.

La elección final viene determinada, habitualmente, por la posibilidad del equipo de cumplir las regulaciones de emisión al más bajo coste.

3. EVALUACIÓN DE LOS COSTES. CONSIDERACIONES GENERALES

El coste real de la instalación y operación de los equipos de control de la contaminación es una función de varios factores, directos e indirectos:

- Inversión inicial de instalación, incluyendo los estudios de ingeniería, ubicación, preparación de la instalación, control informático de los mismos, equipo auxiliar, modificación de la estructura general.

Cuadro n.º 1. **Métodos de Control y Reducción**

I. APLICABLE A TODAS LAS EMISIONES

- A. Reducir o eliminar la producción de emisiones
 1. Cambiar las características del producto
 2. Cambiar el diseño del producto
 3. Cambiar la temperatura del proceso, presión o ciclo
 4. Cambiar la especificación de los materiales
 5. Cambiar el producto
- B. Confinar las emisiones
 1. Encerrar la fuente de emisiones
 2. Capturar las emisiones en un sistema de escape industrial
 3. Impedir corrientes
- C. Separar el contaminante de la emanación de gas
 1. Lavar con líquido

II. APLICABLE ESPECÍFICAMENTE A EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO

- A. Reducir o eliminar la producción de material particulado
 1. Cambiar a proceso que no requiere voladora, aleación, pulimento, calcinación, perforación, secado, trituración, molido, limpieza con arena, aserrado, etc.
 2. Cambiar de material sólido a líquido o gaseoso
 3. Cambiar de material sólido seco o mojado
 4. Cambiar el tamaño de partícula del material sólido
 5. Cambiar a un proceso que no requiere material particulado
- B. Separar el contaminante de la emanación de gas
 1. Separador de gravedad
 2. Separador centrífugo
 3. Filtro
 4. Precipitador electrostático

III. APLICABLE ESPECÍFICAMENTE A EMISIONES GASEOSAS

- A. Disminuir o eliminar producción de gas o vapor
 1. Cambiar a un proceso que no requiere reconocimiento, hornada, revestimiento, deshidratación, remojo, destilación, tratamiento desodorante, chapeado, reducción, tostación, fundición, etc.
 2. Cambiar de material líquido o gaseoso a sólido
 3. Cambiar a un proceso que no requiere material líquido o gaseoso
- B. Quemar el contaminante a CO₂ y H₂O
 1. Incinerador
 2. Quemador catalítico
- C. Absorber el contaminante
 1. Carbón activado

- Costes de operación y mantenimiento incluyendo trabajo, materiales de repuesto y el tratamiento y almacenamiento de los residuos caso de producirse éstos, así como el consumo adicional de energía.
- Otros costes tales como impuestos, seguros, e intereses del capital invertido.

Las funciones de coste son difíciles de establecer, debido a un amplio rango de inexactitudes provocadas, entre otros muchos motivos, por la existencia de datos estadísticos inhomogéneos, relacionados con una gran variedad de especificaciones técnicas en equipos similares; a la indeterminación en las evaluaciones de costes, e incluso a la gran variedad de procesos industriales.

Una de las variables más difíciles de evaluar y que aparece en un primer análisis, es la expectativa de vida de un equipo, en base a la cual se computa la depreciación anual (Cuadro n° 2). La

duración de un equipo puede variar según el nivel de operación del mismo y según los procedimientos de mantenimiento. Una segunda dificultad aparece debida a la interacción, que puede ser positiva o negativa, entre los equipos de control y el proceso de producción, lo cual puede ocasionar unos costes o unos beneficios que deben ser tenidos en cuenta. Este sería el caso, por ejemplo, de equipos que permitieran un reciclaje de materias primas en el proceso de producción.

Antes de realizar una estimación de los parámetros que influyen en las estimaciones de los costes debemos de aclarar el grado de aproximación que con consideraciones generales podemos obtener. En un estudio de tipo estimativo, sin características precisas de la instalación a tratar, una aproximación de $\pm 30\%$ resulta adecuada para determinar el orden de aproximación en el coste de la tecnología necesaria para el control de las emisiones. En el caso de estudios definitivos y concretos, una aproximación entre un 5% y 10% resulta necesaria.

Cuadro n.º 2. Vida media de equipos y piezas

(Años)

	Funcionamiento		
	Alto	Promedio	Bajo
Equipos			
Precipitadores electrostáticos	5	20	40
Lavaderos venturi	5	10	20
Filtros de tela	5	20	40
Incineradores térmicos	5	10	20
Incineradores catalíticos	5	10	20
Absorbedores	5	10	20
Absorbedores	5	10	20
Refrigeradores	5	10	20
Llamas	5	15	20
Piezas o material			
Mangas para filtrar	0,3	1,5	5
Absorbentes	2	5	8
Catalítico	2	5	8
Refractarios	1	5	10

4. SITUACIÓN EN LA C.A.P.V.

Las emisiones atmosféricas en la C.A.P.V. han sufrido en los últimos años reducciones considerables (Gráfico n° 2) debido a diferentes causas, entre las que cabe destacar la creciente gasificación del sector industrial, el decrecimiento en la producción así como el cierre de algunas factorías y, por último, la adopción de medidas reductoras en algunos casos concretos.

Tomando como referencia las inversiones efectuadas hasta 1984, el Gobierno Vasco ha evaluado en 15.000 millones de pesetas las inversiones necesarias para solucionar los problemas de contaminación atmosférica (incluido ruido).

Un estudio posterior realizado en 1989 por el Ministerio de Industria y Energía, dentro del «Programa de creación de una base industrial, energética y tecnológica medioambiental», estima en 718.649 millones de pesetas la inversión

necesaria para todo el país con el fin de conseguir el cumplimiento de la normativa comunitaria en materia atmosférica, tomando como referencia las emisiones estimadas para el año 1980 sobre las que deben aplicarse las reducciones dictadas por la C.E.E.

Teniendo en cuenta que las emisiones debidas a grandes instalaciones de combustión (>50 MW) representan aproximadamente un 90% de las totales y realizando una aproximación simple es posible calcular la representatividad de las emisiones de la C.A.P.V. frente a la totalidad del país debidas al sector industrial, excluidas grandes instalaciones (Gráfico n° 3).

Manteniendo los anteriores porcentajes la inversión en mejora medioambiental atmosférica resulta del orden de 14.000 millones de pesetas.

Sin embargo, resulta necesaria una valoración más detallada en cada uno de los sectores afectados, teniendo en

Gráfico n.º 2. Evolución de las emisiones en la C.A.P.V.

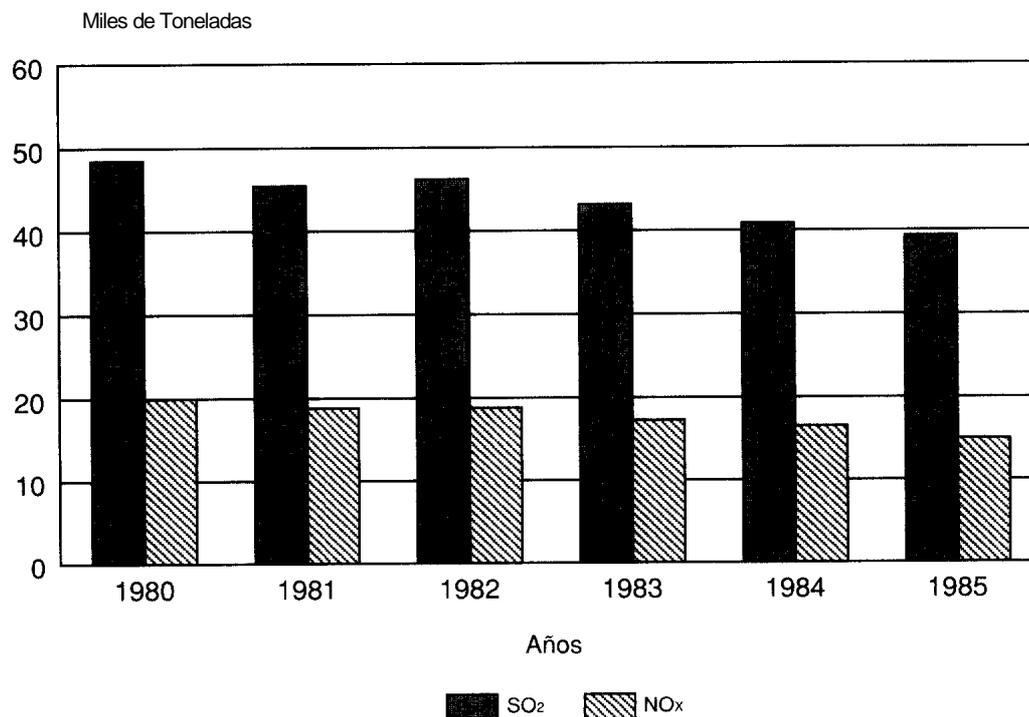
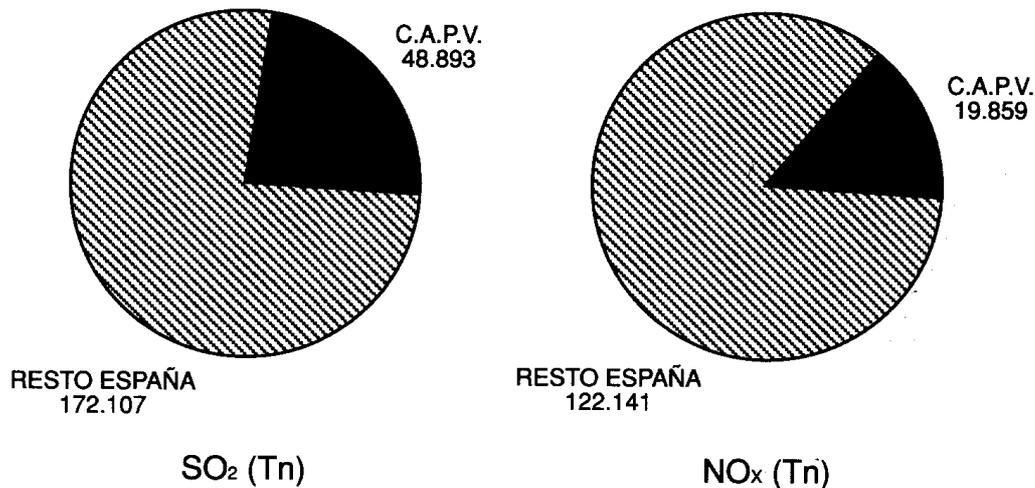


Gráfico n.º 3. Emisiones C.A.P.V./España



cuenta no sólo la reducción necesaria sino los métodos tecnológicos de más

fácil implementación y con un menor coste en cada uno de los casos.

BIBLIOGRAFÍA

- RIDKER, R.G. (1967). «Economic Costs of Air Pollution.» Frederick A. Praeger Publishers. New York.
- STERN, A.C. (1968). «Air Pollution», Vol. 1. Academic Press. New York.
- MAGILL, P.L. (1956). «Air Pollution Handbook». McGraw-Hill. New York.
- NOLL, K.E. y DUNCAN, J. (1973). «Industrial Air Pollution Control.» Ann Arbor Science Publishers. Ann Arbor, Michigan.
- CRAWFORD, M. (1976). «Air Pollution Control Theory.» McGraw-Hill. New York.
- VÍAN, A. (1975). «El Pronóstico Económico en Química Industrial.» Alhambra. Madrid.
- VALLE-RIESTRA, J.F. (1983). «Project Evaluation in the Chemical Process Industries.» McGraw-Hill. New York.
- ULRICH, G.D. (1984). «A Guide to Chemical Engineering Process Design and Economics.» John Wiley. New York.
- NEVERILL, R.B. (1978). «Capital and Operating Costs of Selected Air Pollution Control Systems.» Gard Inc. Niles. Il
- CHAUVEL, A., et al. (1980). «Manual of Economic Analysis of Chemical Processes.» McGraw-Hill. New York.
- CALVERT, S. (1984). «Handbook of Air Pollution Technology.» H.M. Englund. New York.
- COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. (1988). Optimal Control Strategies for Reducing Emissions from Energy Conversion and Energy Use.
- COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. (1988). Optimal Control Strategies for Reducing Emissions from Energy Conversion and Energy Use - Review of Emission Reduction Technologies.
- RENTZ, O., MORGENSTERN, TH. (1988). «Comparative Cost-Effectiveness Studies of Emission Control Strategies for the Federal Republic of Germany.» Proc. Envrisk.Como.
- RENTZ, O., REMMERS, J., PLINKE, E. (1988). «ECEWorkshop on Emission Control Costs.» Esslingen, Geneva, Karlsruhe.

ANEXO

A.1. Metodología del cálculo

- 1.1. Definiciones
- 1.2. Estimación de los costes de instalación
- 1.3. Método Tihansky
- 1.4. Coste total anualizado
 - 1.4.1. Trabajo de operación del sistema
 - 1.4.2. Trabajo de mantenimiento
 - 1.4.3. Sustitución de piezas
 - 1.4.4. Otros gastos

A.2. Descripción de algunos ejemplos

A.1. METODOLOGÍA DEL CÁLCULO

1.1. Definiciones

Generalmente se utilizan dos tipos de costes: coste de instalación y coste total anualizado. En el primer caso, se tiene en cuenta el coste de la inversión del sistema de control de la contaminación e incluye apartados tales como el equipo y los costes de instalación, tanto directos o indirectos del mismo, como el terreno y la mano de obra de la instalación.

El coste total anualizado se define

$$\text{como: } TAC = D + I - R$$

siendo: TAC = Coste total anualizado

D = Costes directos de operación (pts/año)

I = Costes indirectos de operación (pts/año)

R = Ahorros en costes (ptas/año)

Este es el parámetro utilizado normalmente para hacer comparaciones entre los diversos métodos de control, ya que tiene en cuenta las inversiones y los gastos necesarios para poner en funcionamiento y mantener adecuadamente el sistema de control.

Un sistema intermedio entre los dos anteriores, método Tihansky, permite definir la función de coste de forma proporcional a su eficacia, estableciendo al mismo tiempo subfunciones de inversión, operación y mantenimiento.

1.2. Estimación de los costes de instalación

Como ya hemos mencionado anteriormente, los costes de instalación se subdividen en componentes directos

e indirectos. Los costes directos incluyen los precios de compra del equipo y los correspondientes impuestos. También se incluyen los trabajos de instalación, así como los materiales de adaptación para la ubicación física del equipo. Los costes indirectos incluyen los gastos no relacionados directamente con el sistema de control, tales como el arranque y el estudio previo de la instalación.

Existen diversas maneras de evaluar estos costes, la forma más exacta de hacerlo sería con la valoración uno a uno de los diferentes sistemas y de su instalación, pero esto parece impracticable ya que en la mayoría de los casos resultan imprescindibles datos muy concretos de la instalación, que no están disponibles cuando se están realizando estudios estimativos. La otra posibilidad es determinar el coste por extrapolación del coste de otro sistema similar de diferente tamaño. Esta extrapolación normalmente se hace por una ley potencial de la forma:

$$TIC_2 = TIC_1 \left[\frac{S_2}{S_1} \right]^n$$

TIC = coste total de instalación del sistema 1 ó 2

S = tamaño del sistema (flujo de gas)

n = exponente entre 0-1

El primer método es excesivamente preciso y este último no lo suficiente. Pero en el caso de un estudio estimativo, un tercer método puede ser aplicado. Los costes de instalación, directos e indirectos, pueden ser calculados

multiplicando el precio total del sistema de control y de los elementos auxiliares por un factor individual, que dependerá de la fuente a controlar. En este método se puede combinar precisión con simplicidad. Necesitaremos únicamente datos de instalaciones ya existentes para poder calcular estos factores independientes.

Una evaluación de este tipo ha sido ya realizada y suele utilizarse como base en todos los cálculos de coste de instalación, con aplicación de los factores que pueden verse en el Cuadro nº A.1.

Otra situación que influye en los costes de instalación, puede ser la readaptación de sistemas ya existentes en factorías. En estas situaciones, es imposible desarrollar factores generalizados como en el caso anterior. En algunos casos, esta modificación de sistemas antiguos supone un aumento en el coste respecto a la instalación de equipos nuevos, que puede ser del orden de un 25% ó 50%. No obstante, en casos de aprovechamiento de equipos ya instalados, resulta necesario una evaluación muy precisa, para inclinarse por un sistema u otro.

1.3. Método Tihansky

Método diferente a los mencionados hasta ahora, para utilizar en el caso en que el equipo de control no se encuentre entre aquellos cuyos factores multiplicativos conocemos. Aplicado a una planta específica, un equipo adecuado introduce costes que son función del tamaño del equipo, de su capacidad, de su eficiencia de reducción de la contaminación y de su nivel de operatividad. Podemos pues definir una serie de variables:

KA: Capacidad de reducción del equipo m, que es la máxima cantidad de flujo de contaminante que el equipo puede tratar.

P : La intensidad real de reducción, esto es, la cantidad efectiva de flujo contaminado tratada por el equipo m ($P < KA$).

r : La tasa de reducción del equipo m, que es tomada como la razón entre el flujo de entrada y el de salida.

en base a las cuales podemos definir la función de coste de un equipo m como:

$$C_m = f(KA, P, r)$$

Esta función general de coste puede ser dividida en subfunciones de coste de inversión, operación y mantenimiento. La construcción de tales subfunciones implica grandes dificultades, existiendo varios modelos de construcción de las mismas.

Utilizando uno de los métodos más sencillos, el de Tihansky, basado en la relación proporcional existente entre el coste de operación-mantenimiento-reparación, y el cuadrado de la eficacia de depuración del sistema, podemos obtener unas sencillas relaciones que nos permiten determinar dichos costes, así como los costes propios de instalación.

Así pues, utilizando la notación anterior:

$$C_1 = k_1 \cdot r^2 \cdot KA : \text{costes de instalación}$$

$$C_{OMR} = k_2 \cdot r^2 \cdot P : \text{costes OMR (operación-mantenimiento-reparación)}$$

de esta forma, los costes están directamente relacionados con la eficiencia de eliminación de contaminantes del sistema depurador.

1.4. Coste total anualizado

El coste total anualizado se compone de tres partes: costes directos e indirectos de operación y costes de recuperación de créditos.

Los costes directos de operación son de tres clases: variables, semivARIABLES y fijos. En los primeros se incluyen por ejemplo servicios; su valores normalmente proporcional a las cantidades de gas procesadas por el sistema de control por unidad de tiempo.

Los costes que dependen del flujo de gas, pero sólo parcialmente, son semivARIABLES. Excepto la supervisión, todos los costes indirectos de operación son fijos, puesto que son calculados como porcentajes de la inversión.

Cuadro n.º A.1. Factores de coste promedio para equipos de control de la contaminación atmosférica

	Precipitador Electrostático	Lavador Venturi	Filtro de Tela	Incinerador Termal y Catalítico	Absorbedor Carbón	Absorbedor Gas	Llama
COSTES DIRECTOS <i>Equipos Comprados:</i> Primario Auxiliar Instrumentos y mandos Impuestos Portes Precio básico	A B 0,10 (A + B) 0,03 (A + B) 0,05 (A + B) X (total de lo de arriba)						
<i>Instalación:</i> Base y soportes Manipulación y montaje Eléctrico Tuberías Aislamiento Pintura	0,04 0,50 0,08 0,01 0,05 0,03 0,02	0,06 0,40 0,01 0,05 0,03 0,01	0,04 0,50 0,08 0,01 0,07 0,02	0,08 0,14 0,04 0,02 0,01 0,01	0,08 0,14 0,04 0,02 0,01 0,01	0,12 0,40 0,01 0,30 0,01 0,01	0,12 0,40 0,01 0,02 0,01 0,01
Factor multiplicador para costes directos de instalación	0,07	0,56	0,72	0,30	0,30	0,85	0,57
COSTES INDIRECTOS <i>Instalación:</i> Ingeniería y supervisión Construcción y campo Tasa de construcción Puesta en marcha Prueba de funcionamiento Estudio de modelo Imprevistos	0,20 0,20 0,10 0,01 0,01 0,02 0,03	0,10 0,10 0,10 0,01 0,01 0,03	0,10 0,20 0,10 0,01 0,01 0,03	0,10 0,05 0,10 0,02 0,01 0,03	0,10 0,05 0,10 0,02 0,01 0,03	0,10 0,10 0,10 0,01 0,01 0,03	0,10 0,10 0,10 0,01 0,01 0,03
Factor multiplicador para costes indirectos de instalación	0,57	0,35	0,45	0,31	0,31	0,35	0,35

1.4.1. *Trabajo de operación del sistema*

La cantidad de trabajo necesaria para hacer funcionar un sistema depende de su tamaño, complejidad, nivel de automatismo y modo de operación (ya sea en batch o en continuo). La relación entre el trabajo necesario para el funcionamiento de un sistema y su capacidad es muy difícil de obtener; usualmente se utiliza una relación potencial del tipo:

$$\frac{L_2}{L_1} = \left[\frac{C_2}{C_1} \right]^n$$

donde

L₁, L₂ = Requerimiento de trabajo para sistemas 1 y 2

C₁, C₂ = Capacidades de sistemas 1 y 2 (por ejemplo, medidos por el ratio de flujos de gas)

n = 0,2 a 0,25 (normalmente)

Esta relación puede ser utilizada para estimar el trabajo necesario cuando se dispone de datos de un sistema con una capacidad determinada (Cuadro n° A.2).

En general, a los resultados obtenidos debe añadirse una parte para cubrir los trabajos de supervisión. Esta cantidad a añadir suele ser del orden de un 15% del trabajo de base, considerado razonable.

1.4.2. *Trabajo de mantenimiento*

Este trabajo es calculado de la misma forma que el trabajo de operación del sistema, estando influenciado por las mismas variables; si bien, en general es un trabajo que requiere una mayor especialización y por lo tanto se valora más altamente que el de operación, aproximadamente un 10%. En esta partida deben de tenerse también en cuenta pequeños gastos de mantenimiento tales como lubricantes, aceites, soldaduras, etc., pero cuyo coste real incrementa ligeramente el obtenido en la valoración de las horas de trabajo.

1.4.3. *Sustitución de piezas*

Este coste se calcula separadamente del trabajo de mantenimiento, puesto que puede representar un gasto importante. El coste anual de estos materiales puede calcularse por:

$$A_p = P \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right]$$

donde:

A_p = coste anualizado de piezas de repuesto, pts/año

P = coste inicial de las piezas de repuesto, pts

n = vida útil de las piezas, año

i = tasa de descuento

Cuadro n.º A.2. **Mano de obra estimada para cada turno**

(Turno = promedio 8 horas)

Equipo Primario	Operación (H)	Mantenimiento (H)
Filtros de tela	2a4	1 a 2
Precipitadores	1/2 a 2	1/2 a 1
Lavaderos	2 a 8	1 a 2
Incineradores	1/1	1/2
Absorbedores	1/2	1/2
Absorbedores	1/2	1/2
Refrigeradores	1/2	1/2
Llamas	—	1/2

1.4.4. Otros gastos

Además de los apartados considerados hasta el momento, debe de tenerse en consideración una pequeña partida correspondiente a los apartados de servicios, tratamiento de los residuos generados, e incluso los seguros y tasas propios del equipo, así como, el coste de oportunidad del capital, que es función de la inversión de instalación del equipo y de la duración del mismo.

Lavado con caliza

$$C_T = 125,3 + Q_E u n (118 C_e + 2,43 C_{ap} + 1,00 C_{ar} + 197 C_{ca} + 7,10 \cdot 10^{-2} C_{fu} + 3,02 \cdot 10^{-2} C_v + 1,06 \cdot 10^{-4} C_{mo})$$

Lavado con caliza y oxidación posterior

$$C_T = 146,1 + Q_E u n (146 C_e + 2,21 C_{ap} + 2,11 C_{ar} + 155 C_{ca} + 7,10 \cdot 10^{-2} C_{fu} + 3,02 \cdot 10^{-2} C_v + 1,06 \cdot 10^{-4} C_{mo})$$

A.2. DESCRIPCIÓN DE ALGUNOS EJEMPLOS

Como ya se ha especificado en todos los apartados anteriores la elección de un equipo de reducción viene determinada por un cúmulo de análisis de diversos tipos que se condicionan entre sí.

A continuación vamos a indicar algunas de las funciones matemáticas construidas en base a los apartados anteriores (TAC), que permiten evaluar el coste de diversos sistemas de depuración, en este caso los más corrientes, para eliminar óxidos de azufre, si bien el procedimiento puede ser aplicado a cualquier tipo de tecnología y contaminante.

Supondremos que deseamos depurar una corriente gaseosa de caudal comprendido entre 100.000 y 150.000 m³N/h, con un contenido en azufre que oscila entre 2.500 y 3.000 ppm. Los métodos analizados han sido:

- lavado con caliza
- lavado con caliza y oxidación posterior
- lavado con borbotado

en los cuales se han analizado por separado las principales partidas, definitorias de cada uno de ellos, a saber:

- * electricidad
- * agua del proceso
- * agua de refrigeración
- * caliza
- * fuel
- * vapor de baja presión

obteniéndose para el coste total anualizado las siguientes expresiones:

Borboteo

$$C_T = 66,8 + Q_E u n (113 C_e + 2,21 C_{ap} + 2,11 C_{ar} + 141 C_{ca} + 7,10 \cdot 10^{-2} C_{fu} + 3,02 \cdot 10^{-2} C_v + 1,06 \cdot 10^{-4} C_{mo})$$

Como puede verse, el segundo miembro de las expresiones del coste contienen un primer sumando que corresponde a los costes fijos (incluida la amortización) y un segundo sumando que incluye los costes de operación y mantenimiento.

En el Gráfico n° A.1., se ha representado, de una forma más sencilla, la variación de los costes de operación e inversión, con respecto a la potencia de la instalación, caso de aplicar el procedimiento de desulfuración por lavado con cal.

Nomenclatura

- C_{ap}: Coste unitario del agua de proceso, ptas/m³
- C_{ar}: Coste unitario del agua de refrigeración, ptas/m³
- C_{ca}: Coste unitario de la caliza, ptas/kg.
- C_e: Coste unitario de la electricidad, ptas/kWh
- C_{fu}: Coste unitario del fuelóleo, ptas/Tn
- C_{mo}: Coste de la mano de obra, ptas/Hh
- C_T: Coste total
- C_v: Coste unitario del vapor, ptas/Tn
- Q_e: Caudal de gases que emite la planta, m³/h
- u: Coeficiente de utilización de la instalación
- n: Rendimiento de la instalación

Gráfico n.º A.1. Variación del inmovilizado y de los costes de operación con respecto a la capacidad de la instalación

