

5. ESTUDIO ECONÓMICO.

En primera instancia cabe destacar que la estimación económica de este tipo de instalaciones resulta bastante compleja dado que se emplean equipos de un tamaño fuera de lo común, que en su mayoría son construidos en campo por sus grandes dimensiones, no siendo éstos generalmente objeto de estudio de los manuales típicos de ingeniería química. Si bien muchos de los equipos empleados son usados en la industria química y cabría pensar utilizar las numerosas correlaciones existentes, éstas no son válidas para el caso que nos concierne debido a que están fuera del rango de tamaños para los que fueron obtenidas.

Tanto la **EPA** (*Environmental Protection Agency*) como el **EPRI** (*Electric Power Research Institute*), han tratado de cubrir este vacío con diversas publicaciones a lo largo de los años, desarrollando modelos basados en costes históricos y en precios de equipos suministrados por diversos fabricantes. Sin embargo, dicho esfuerzo se ha centrado en las tecnologías de desulfuración mayoritariamente implantadas en los EE.UU (*Lime/Limestone FGD, DFGD*), no habiéndose encontrado ninguna publicación de estas instituciones que aborden la estimación económica de la **SWFGD**.

Como se ha comentado anteriormente, dada la dificultad de abordar la estimación de los costes de inversión para nuestra planta de desulfuración, se ha recurrido a un modelo detallado en la publicación *EPA/600/R-00/093*, del cual se han obtenido

correlaciones de equipos como los ventiladores, conductos de gases, etc. Los cuales son comunes para SWFGD y la Limestone FGD. Para la estimación de los costes de otros equipos como las bombas, o los compresores se ha recurrido a los manuales clásicos de diseño en la ingeniería química.

Finalmente, se ha seguido la metodología propuesta por **Vatavuk**, *Estimating Costs of Air Pollution Control*; para obtener el *Capital Total Invertido (TCI)* y el *Coste Total Anual (TAC)*.

5.1. ESTIMACIÓN CAPITAL TOTAL INVERTIDO (TCI).

A continuación se detallan los costes de adquisición de los equipos principales y auxiliares:

- Scrubbers:

$$N_a = 2$$

$$G_{Abs} = (25,3 + 1,22) \times 22,4 \times \frac{1}{2} = 297 \text{ Nm}^3$$

$$T = 80^\circ\text{C} \rightarrow ACFM \cong 813.650$$

$$P_{Abs}(2014) = 173978 \times \left(\frac{ACFM}{1000}\right)^{0,5575} \times N_a \times \frac{567,7}{389,5} \times \frac{1}{1,3} \times 1,2$$

$$P_{Abs} = 20.000.000 \text{ €} \rightarrow \text{Coste Instalado.}$$

- Relleno:

$$P_{relleno} = V_{relleno} (m^3) \times 1800 \frac{\$}{m^3} \times \frac{1 \text{ €}}{1,3 \$}$$

$$V_{relleno} = \frac{\pi}{4} \times 16^2 \times 2,5 \times 2 = 1005,3 m^3$$

$$P_{relleno} = 1.400.000 \text{ €} \rightarrow \textit{Precio de compra.}$$

- Ventiladores de tiro inducido:

$$G_{ID.Fans}(140^\circ\text{C}) = 857,35 \frac{m^3}{s} \rightarrow ACFM = 1.816.622$$

$$P_{FANS}(2014) = 91,24 \times \left(\frac{ACFM}{N_F}\right)^{0,6842} \times N_F \times \frac{567,7}{389,5} \times \frac{1}{1,3}$$

$$P_{FANS} = 3.038.000 \text{ €} \rightarrow \textit{Coste Instalado.}$$

- Conductos de Gases:

$$ACFM = 1.816.622$$

$$ACFM1 = 1.296.966,5$$

$$A = -0,1195 \left(\frac{ACFM}{1000}\right)^2 + 777,76 \left(\frac{ACFM}{1000}\right) + 238203$$

$$B = 1,2 \times 10^{-5} \times \left(\frac{ACFM}{1000}\right)^3 - 0,1651 \left(\frac{ACFM}{1000}\right)^2 + 1288,82 \left(\frac{ACFM}{1000}\right)$$

$$C = 559.693 - 0,2009 \left(\frac{ACFM1}{1000 \times N_a}\right)^2 + 1266,4 \left(\frac{ACFM1}{1000 \times N_a}\right) + 420.141$$

$$P_{Ducts}(2014) = (A + B + C) \times \frac{874,5}{533,6} \times \frac{1}{1,3}$$

$$P_{Ducts} = 6.120.000 \text{ €} \rightarrow \text{Coste Instalado}$$

- Chimenea e Instalaciones de apoyo.

$$ACFM1 = 1.296.966,5$$

$$P_{CHIMENEA}(2014) = 23370 \times ACFM1^{0,3339} \times \frac{533,9}{374,5} \times \frac{1}{1,3}$$

$$P_{CHIMENEA} = 2.820.000 \text{ €}$$

$$BM_R = 0,0003MWe^3 - 1.0677MWe^2 + 1993,8MWe + 1.177.674$$

$$BM_R(2014) = 2.033.437 \$ \times \frac{567,7}{389,5} \times \frac{1 \text{ €}}{1,3 \$} = 2.280.000 \text{ €}$$

$$P_{CHIMENEA+AUX} = P_{CHIMENEA} + BM_R$$

$$P_{CHIMEA+AUX} = 5.100.000 \text{ €} \rightarrow \text{Coste Instalado.}$$

- Bombas Absorbedores.

$$P_{BOMBAS}(2014) = 490 \text{ \$/HP} \times 938,72 \text{ HP} \times 3 \times \frac{567,7}{468,2} \times \frac{1 \text{ €}}{1,3 \$}$$

$$P_{BOMBAS} = 1.300.000 \text{ €} \rightarrow \text{Coste de Compra.}$$

- Balsa de aireación:

$$P_{BALSA}(2014) = 0,5 \frac{\$}{gal} \times V_{BALSA}(gal) \times \frac{533,9}{322,7} \times \frac{1 \text{ €}}{1,3 \$}$$

$$P_{BALSA} = 2.800.000 \text{ €}$$

Dicho valor obtenido de un manual de diseño de sistemas de aireación para EDAR, ha sido contrastado

con el coste de la construcción reciente de un depósito de tormentas con un volumen y dimensiones parecidas a nuestra planta de tratamiento de agua de mar, unos 10.000 m³, siendo el coste de la obra de 4.000.000 €. Por seguridad y dado que el coste real de construcción de la balsa será función de las características del suelo y del nivel freático, se estima un **coste alzado** de unos **4.000.000 €**.

- Turbocompresores:

$$P_C(2014) = 1920 \times P(KW)^{0,8} \times N_c \times \frac{567,7}{444,2} \times \frac{1}{1,3}$$

$$P = 280 \text{ KW}$$

$$P_C = 514.000 \text{ €} \rightarrow \text{Coste de Compra.}$$

- Difusores y Tuberías de aire:

$$P_{dif}(2014) = 30 \frac{\$}{dif} \times 3784 \text{ dif} \times \frac{1 \text{ €}}{1,3 \$}$$

$$P_{dif} = 87.323 \text{ €}$$

$$P_{Tuberías Aire} = 40.000 \text{ €}$$

- Bombas Quenchs.

$$P_{Bombas Quenchs}(2014) = 16 \frac{\$}{gpm} \times Q(gpm) \times N_b \times \frac{924,7}{511,9} \times \frac{1 \text{ €}}{1,3 \$}$$

$$Q = 212,2 \text{ gpm}$$

$$N_b = 4$$

$$P_{\text{Bombas Quenchs}} = 18.871 \text{ €} \rightarrow \text{Coste de Compra.}$$

- Quenchs:

$$V_{\text{Quenchs}} = 2 \times 0,006 \times [10 \times 10 + 5,5 \times 10] \times 2 = 3,72 \text{ m}^3$$

$$M_{\text{Quenchs}} = 7850 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 3,72 = 29.202 \text{ Kg}$$

$$P_{\text{Quenchs}}(2014) = 6,5 \left(\frac{R.L}{C.S} \right) \times 29,2 \text{ Tn} \times 921(C.S) \frac{\$}{\text{Tn}} \times \frac{1 \text{ €}}{1,3 \$}$$

$$P_{\text{Quenchs}} = 134.476 \text{ €} \rightarrow \text{Coste de Compra.}$$

- Precio Líneas de Agua de Mar.

$$DN 1600 \text{ mm} \rightarrow \frac{723,53 \text{ €}}{\text{m}} \times 160 \text{ m} = 115.765 \text{ €}$$

$$DN 1500 \text{ mm} \rightarrow \frac{679,91 \text{ €}}{\text{m}} \times 150 \text{ m} = 101.987 \text{ €}$$

$$DN 1100 \text{ mm} \rightarrow \frac{390,77 \text{ €}}{\text{m}} \times (5 \times 3 + 22 \times 2) \text{ m} = 23.056 \text{ €}$$

$$DN 1000 \text{ mm} \rightarrow \frac{317,86 \text{ €}}{\text{m}} \times (5 \times 2) = 3.179 \text{ €}$$

$$DN 100 \text{ mm} \rightarrow \frac{29,47 \text{ €}}{\text{m}} \times 160 \text{ m} \times 2 = 9.430 \text{ €}$$

$$P_{\text{Líneas Agua}}(2014) = 253.417 \text{ €} \rightarrow \text{Coste de Compra}$$

A continuación, de forma resumida detallaremos los costes dividiéndolos en Costes de Adquisición y en Costes Instalados, para poder obtener el Capital Total invertido:

- Costes de Compra:

$$A = 3.748.087 \text{ €}$$

- Costes Instalados:

$$D = 34.258.000$$

Capítulo 5: Estudio Económico.

DETALLE DE COSTES	FACTOR
<u>Costes de Directos</u>	
Coste de adquisición de equipos	
Bombas, Quenchs, Soplantes, Relleno, Difusores, Tuberías	A=3.748.087 €
Instrumentación	0,10 A
Impuestos	0,03 A
Transporte	0,05 A
Costes de adquisición de equipos	B = 1,18 A=4.422.743 €
Costes directos de instalación	
Cimientos & soportes	0,12 B
Manejo & Construcción	0,40 B
Instalación eléctrica	0,01 B
“Piping”	0,30 B
Aislamiento	0,01 B
Pintura	0,01 B
Costes directos de instalación (TOTAL)	0,85 B
Equipos Principales (Scrubbers, Conductos, Ventiladores, Chimenea)	34.258.000 €
Balsa de Oxidación	4.000.000 €
TOTAL COSTES DIRECTOS (DC)	1,85 B + EP + BOx
DC = 46.440.075 €	
<u>Costes Indirectos (Instalación)</u>	
Ingeniería	0,10 DC
Construcción y gastos en campo	0,15 DC
Comisiones del contratista	0,03 DC
“Start-up” (puesta en marcha)	0,01 DC
“Performance tests” (pruebas de rendimiento)	0,01 DC
Contingencias, Imprevistos	0,25 DC
TOTAL COSTES INDIRECTOS (CI)	0,55 x DC
IC = 25.542.041 €	
INVERSIÓN TOTAL DE CAPITAL (TCI) = DC + IC	TCI = 72.000.000 €

Por último cabe destacar que la precisión de este tipo de estudios económicos preliminares suele rondar $\pm 35\%$ del valor del coste real.

A modo comparativo se ha contrastado los costes de inversión obtenidos mediante el análisis de costes propuesto y las estimaciones suministradas por los fabricantes.

Según diversos fabricantes como *Doosan Lentjes*, *Alstom* o *TSK*, estiman que el *TCI* de un sistema de desulfuración por vía húmeda mediante lechada de caliza ronda los 150 – 250 €/KWe. Dado que estos coinciden en considerar que los costes de inversión de un sistema que emplee agua de mar como absorbente (*SWFGD*) rondan entre el 70 – 80 % de los de la tecnología de caliza, entonces el *TCI* de una instalación de desulfuración con agua de mar para una central eléctrica de 580 MWe estará comprendido entre los 60.900.000 – 116.000.000 €.

Otra forma de tener una idea preliminar del Coste Total de Inversión, es apoyarse en los datos que tengamos disponibles de otro proyecto más o menos similar y escalarlo para nuestro caso particular. Empleando el *TCI* del sistema de desulfuración con agua de mar, de la central Chilena de *Ventanas 2* (218 MWe) podemos estimar aproximadamente el *TCI* de dicha instalación para la central que nos concierne:

$$TCI (2010 \$) = 55.000.000 \$ \times \left(\frac{580}{218}\right)^{0.8} \cong 120.320.573$$

$$TCI (2014 \text{ €}) = 120.320.573 \times \frac{567,7}{550,8} \times \frac{1 \text{ €}}{1,3 \$} \cong 95.400.000$$

5.2. ESTIMACIÓN COSTE TOTAL ANUAL (TAC).

Para la estimación de los Costes Directos Anuales hemos supuesto que la planta opera a plena carga 300 días al año.

Además se ha estimado que la mano de obra necesaria para garantizar el correcto funcionamiento de la planta de desulfuración es de media hora por turno de trabajo. Este tipo de plantas se encuentran completamente automatizadas no necesitando de un operador que las supervise a tiempo completo, como si puede suceder en plantas que operen con tecnología de caliza. La función del operario será realizar una inspección visual de la planta y controlar que los equipos funcionen correctamente. Se ha considerado que el coste del supervisor es un 15 % el del operario.

$$C_{Operador} = \frac{1}{2} \frac{h}{turno} \times \frac{24 \frac{h}{d}}{8 \frac{h}{turno}} \times 300 \frac{d}{año} \times 15 \frac{€}{h} = 6.750 \text{ €/año}$$

$$C_{Supervisor} = 0,15 \times C_{Operador} = 1.012,5 \text{ €/año}$$

Estableciendo un precio medio de la energía eléctrica de 0,09 €/kWh, estamos en condiciones de estimar el consumo eléctrico de nuestra instalación.

$$\begin{aligned}
 E_{Fans} &= N_{Fans} \times \frac{G_1 \frac{m^3}{s} \times \Delta P_{SWFGD} (mm. c. a) \times 9,8 \times 10^{-3}}{\eta_{Fan} \times \eta_M \times \eta_{Acople}} \times 300 \frac{d}{año} \times 24 \frac{h}{d} \\
 &= 4 \times \frac{215,4 \times 241,5 \times 9,8 \times 10^{-3}}{0,8 \times 0,9 \times 0,9} \times 300 \times 24 \\
 &= 22.657.208 \text{ kWh/año} \rightarrow \mathbf{2.040.000 \text{ €/año}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_{Bombas Abs.} &= N_b \times \frac{(Q_b) \frac{m^3}{s} \times h_b (m. c. a) \times 9,8}{\eta_b \times \eta_M \times \eta_{Acople}} \times 300 \frac{d}{año} \times 24 \frac{h}{d} \\
 &= 2 \times \frac{(8161/3600) \times 20 \times 9,8}{0,821 \times 0,9 \times 0,9} \times 300 \times 24 \\
 &= 9.621.245 \text{ kWh/año} \rightarrow \mathbf{866.000 \text{ €/año}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_{Bombas Quenchs} &= 2 \times \frac{48,2 \frac{m^3}{h} \times 27,3 m. c. a \times 9,8}{0,637 \times 0,8 \times 0,8 \times 3600 \frac{s}{h}} \times 300 \frac{d}{año} \times 24 \frac{h}{d} \\
 &= 126.525 \text{ kWh/año} \rightarrow \mathbf{11.387,3 \text{ €/año}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_{Soplantes} &= P_{TC} (KWe) \times N_{TC} \times 300 \frac{d}{año} \times 24 \frac{h}{d} = 280 \times 2 \times 300 \times 24 \\
 &= 4.032.000 \text{ kWh/año} \rightarrow \mathbf{362.880 \text{ €/año}}
 \end{aligned}$$

El coste de mantenimiento y reemplazo lo hemos considerado como la suma de un término de mantenimiento y otro de reemplazo del relleno una vez haya transcurrido 10 años.

$$C_{Mantenimiento} = 0,01 \times TCI = 720.000 \text{ €/año}$$

$$\begin{aligned}
 C_{Reemplazo} &= P_{Relleno} \times F_{instalación} \times CRF_{Reemplazo} \\
 &= 1.400.000 \times 1,3 \times 0,1424 \cong 260.000 \text{ €/año}
 \end{aligned}$$

$$CRF_{Reemplazo} = \frac{i \times (1 + i)^n}{[(1 + i)^n - 1]} = \frac{0,07 \times (1 + 0,07)^{10}}{[(1 + 0,07)^{10} - 1]} = 0,1424$$

$$C_{M\&R} = C_{Mantenimiento} + C_{Reemplazo} = 980.000 \text{ €/año}$$

El término “Overhead” incluye los gastos relacionados con la operación, supervisión y trabajo de mantenimiento; como la Seguridad Social, aseguraciones, vacaciones, etc. Habitualmente se puede estimar como el 60% de la mano de obra.

Por último se tendrá en cuenta el *Coste de Recuperación de Capital* (CRC), el objetivo de éste es llegar a obtener un gasto anual que considere el *Capital Inicial Depreciable Invertido* incluyendo un porcentaje de recuperación aceptable de éste.

Considerando que la vida útil de nuestra instalación es de 25 años, la tasa de interés mínima atractiva para la empresa es de un 7% y el valor residual de la instalación al final de su vida útil es de 500.000 €, obtenemos:

$$CRC = (TDI - P_{rep}) \times CRF - S \times SFF$$

$$CRF = \frac{i \times (1 + i)^n}{[(1 + i)^n - 1]} = \frac{0,07 \times (1 + 0,07)^{25}}{[(1 + 0,07)^{25} - 1]} = 0,08581$$

$$SFF = \frac{i}{[(1 + i)^n - 1]} = \frac{0,07}{[(1 + 0,07)^{25} - 1]} = 0,0158$$

$$TDI \cong TCI = 72.000.000 \text{ €}$$

$$P_{rep} = P_{Relleno} \times F_{Instalación} = 1.820.000 \text{ €}$$

$$S \cong 500.000 \text{ €}$$

$$CRC = 6.014.246 \text{ €/año}$$

Costes Directos Anuales, DC.

Mano de Obra

Operador 6.750 €

Supervisor 1.012,5 €

Materiales de Operación

Solventes -

Químicos -

Vertido Agua Residual -

Mantenimiento&Reemplazo 980.000 €

Electricidad

Ventiladores 2.040.000 €

Bombas 877.400 €

Turbocompresores 362.880 €

Costes Indirectos Anuales, IC.

“Overhead” 0,6 x Mano de Obra = 4657,5€

Cargas Administrativas 0,02 x TCI = 1.440.000 €

Impuestos a la Propiedad 0,01 x TCI = 720.000 €

Seguro 0,01 x TCI = 720.000 €

Coste Recuperación Capital (CRC) 6.014.246 €

Coste Total Anual.

DC+IC

13.166.946 €/año

A modo comparativo, considerando exclusivamente los *Costes Directos Anuales* (DC), el coste operación de la planta de desulfuración es:

$$P_{Desulf.} = \frac{4.268.042,5 \text{ €/año}}{580 \times 10^3 \text{ kWe}} \times \frac{1 \text{ año}}{300 \text{ d}} \times \frac{1 \text{ d}}{24 \text{ h}} \cong 1 \times 10^{-3} \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

El coste de desulfuración por kWh de un planta que emplee la tecnología con caliza ronda los *0,3 Cents €/kWh* o más en función del contenido en azufre del carbón.

Si se tiene en cuenta los *Costes Totales Anuales* (TAC) el precio de desulfuración, mediante nuestra instalación, por kWh asciende a los *0,3 Cents €/kWh*.