

CHIMENEAS INDUSTRIALES

1.- GENERALIDADES

Se definen como tales a los conductos contruidos para dar salida a la atmósfera libre a gases resultantes de una combustión –o de una reacción química (“gases de cola”) – para su dispersión en el aire ambiente.

En la definición de una chimenea intervienen, fundamentalmente, los siguientes elementos:

- 1.- Sección interior, o de paso de gases
- 2.- Altura
 - 2.1.- Para dispersión de gases en la atmósfera libre
 - 2.2.- Para la obtención de una depresión mínima determinada en su base
- 3.- Tipo de material estructural (o externo)
 - 3.1.- Resistencia a las acciones externas
 - 3.1.1.-Viento
 - 3.1.2.- Sismos
 - 3.2.- Cimentación (conocimiento de la geología del terreno)
- 4.- Tipo de material de revestimiento interior
 - 4.1.- Resistencia a la temperatura y ataque físico-químico de los gases

2.- DEFINICIÓN DE LOS GASES A EVACUAR O DISPERSAR

Para determinar las características de una chimenea es imprescindible conocer el tipo de fluido que se espera que circule por ella. Normalmente se trata de humos producto de la combustión de combustibles fósiles (carbón, derivados líquidos o gaseosos del petróleo), madera, etc., en aire ambiente. Sin embargo, aun en estos casos, hay que tener en cuenta la posible “contaminación” de estos humos con sustancias desprendidas de los procesos en los que intervienen, como por ejemplo, el los hornos de reverbero.

En el caso frecuente de combustibles líquidos (fuel-oil, gasoil, etc.) o gaseosos (hidrocarburos gaseosos o “gas natural”), estos humos se componen de:

- *N₂: procedente del aire comburente.
- *CO₂ y H₂O (vapor): procedentes de la combustión de los hidrocarburos, junto con pequeñas cantidades provenientes de la propia composición de aire comburente.
- *O₂: procedente del aire comburente en exceso respecto al necesario para una combustión estequiométrica.
- *NO_x: si la temperatura alcanzada por la llama supera los 1.300°C en alguna zona, la combinación del nitrógeno del aire (o de los compuestos nitrogenados presentes en el combustible) con el oxígeno se realiza a velocidades apreciables, contaminando los humos con óxidos de nitrógeno en proporciones suficientes como para sobrepasar las normativas de ciertos países.
- *SO_x: algunos combustibles, especialmente los líquidos, contienen azufre en proporciones que pueden variar entre menos de un 1% (combustibles B.T.S.) hasta

algo más de un 5% (fueles pesados) que combinado con el oxígeno del aire, da lugar a diferentes compuestos de azufre, todos ellos considerados como contaminantes por las administraciones de diferentes países

- *CO: resultado de una combustión incompleta
- *Radicales libres, partículas sólidas (fundamentalmente de carbono) y otras producto, procedentes de impurezas en el combustible (metales pesados), aunque todos ellos en muy pequeñas proporciones.

A título de ejemplo, en la tabla adjunta puede verse composiciones típicas de humos producidos por la combustión estequiométrica de un combustible líquido y un “gas natural”, comparadas con el aire ambiente.

Tabla 2.1

Componente	% en peso		
	Aire	Con Fuel Oil	Con “Gas Natural”
CO ₂	0,05	20,8	15,4
H ₂ O	0,56	7,6	12,4
SO ₂	0,00	0,4	0,0
N ₂	75,05	70,0	70,9
O ₂	23,07	0,0	0,0
Ar	1,27	1,1	1,2
Otros	—	0,1	0,1
Calor específico Kcal/Kg/°C	0,23	0,25	0,26
Densidad normal Kg/Nm ³	1,288	1,311	1,254
Kg aire/Kg combustible	—	14,0	17,0

Las propiedades de los humos se asemejan a las del aire ambiente (con un 50% de humedad relativa). Normalmente, la combustión se realiza en ambientes con exceso de aire comburente respecto de la proporción estequiométrica, llegándose a duplicar o triplicar esta proporción. En estos casos con más motivo, las propiedades de los humos se acercan a las del aire. Por estas razones, y a efectos de cálculos técnicos – y en una primera aproximación– se pueden tomar como propiedades de los humos de la combustión de derivados del petróleo, las del aire.

3.- LA SECCIÓN DE PASO DE LOS HUMOS POR LA CHIMENEA

La velocidad mínima de evacuación de los humos por la coronación de la chimenea suele venir fijada por la normativa correspondiente de la Administración Pública del lugar. A modo de orientación, puede decirse que las velocidades medias deberían oscilar entre un mínimo de 3 m/s y los 10 m/s. Una velocidad media de 5 m/s suele considerarse como adecuada.

Dados el volumen de gases (caudal másico Q Kg/s y su temperatura T°C) y su velocidad ($V \approx 5\text{m/s}$), resulta sencillo determinar la sección de paso (diámetro) de los humos por la chimenea:

$$\text{Sección} = \frac{Q}{V \cdot \rho_0} \frac{273 + T_H}{273} \text{ m}^2 \quad (3.1)$$

ρ_0 = densidad de los humos en condiciones normales, $\text{Kg/Nm}^3 \approx 1,29 \text{ Kg/Nm}^3$

$$\text{Diámetro} \geq \sqrt{\frac{4 \cdot Q \cdot (273 + T_H)}{\pi \cdot 273 \cdot V \cdot \rho_0}} \text{ m} \quad (3.2)$$

4.-LA ALTURA DE LA CHIMENEA

4.1.- Para la dispersión de los humos en la atmósfera libre

La altura mínima de una chimenea emitiendo gases considerados por la legislación U.E. como contaminantes, viene determinada por la normativa correspondiente del lugar en el que se ubique.

En el caso del territorio español, esta legislación está basada fundamentalmente en los siguientes Decretos y Órdenes Ministeriales:

Decreto 833/1975, del 6 de Febrero, por el que se desarrolla la Ley 38/1972, del 22 de Diciembre, de *PROTECCIÓN DEL MEDIO AMBIENTE ATMOSFÉRICO*.

ANEXO IV del citado Decreto: *NIVELES DE EMISIÓN DE CONTAMINANTES A LA ATMÓSFERA PARA LAS PRINCIPALES ACTIVIDADES INDUSTRIALES POTENCIALMENTE CONTAMINADORAS DE LA ATMÓSFERA*.

Orden Ministerial del 18 de Octubre de 1976 (B.O.E. nº 290 del 3 de Diciembre de 1976) sobre *PREVENCIÓN Y CORRECCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN INDUSTRIAL DE LA ATMÓSFERA*.

ANEXO II de la citada Orden Ministerial: *INSTRUCCIONES PARA EL CÁLCULO DE LA ALTURA DE CHIMENEAS DE INSTALACIONES INDUSTRIALES PEQUEÑAS Y MEDIANAS*.

Real Decreto 1613/1985, del 1 de Agosto, por el que se modifica parcialmente el Decreto 833/1975, del 6 de Febrero, y se *ESTABLECEN NUEVAS NORMAS DE CALIDAD DEL AIRE EN LO REFERENTE A CONTAMINACIÓN POR DIÓXIDO DE AZUFRE Y PARTÍCULAS*.

ANEXO del citado Decreto: *VALORES LÍMITE PARA EL DIÓXIDO DE AZUFRE Y LAS PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN*.

Real Decreto 717/1987, del 27 de Mayo, por el que se modifica parcialmente el Decreto 833/1975, del 6 de Febrero, y se *ESTABLECEN NUEVAS NORMAS DE CALIDAD DEL AIRE EN LO REFERENTE A CONTAMINACIÓN POR DIÓXIDO DE NITRÓGENO Y PLOMO*.

Real Decreto 1321/1992, del 30 de Octubre, por el que se modifica parcialmente el Real Decreto 1613/1985, del 1 de Agosto, y se *ESTABLECEN NUEVAS NORMAS DE CALIDAD DEL AIRE EN LO REFERENTE A LA CONTAMINACIÓN POR DIÓXIDO DE AZUFRE Y PARTÍCULAS*.

Posteriormente, cada una de las Comunidades Autónomas españolas, a medida que se les transferían las competencias de protección medioambiental, han ido legislando en función de otros criterios, tales como el análisis de la dispersión de los humos por simulaciones numéricas de los contaminantes en función de vientos dominantes y orografía del terreno circundante, así como otras consideraciones de orden ecológico.

4.2.- Para la obtención de una depresión mínima determinada en su base

Además de dispersar los humos en la atmósfera, corrientemente las chimeneas tienen por objeto la creación, en su base, de una depresión o aspiración, que permite la circulación de estos humos desde su origen (hogar, horno, caldera, etc.) hasta su salida a la atmósfera libre, a unas velocidades determinadas. Esto exige la creación, dentro del circuito completo, de un diferencial de presiones que compense tanto las *pérdidas de carga* de los humos dentro de los aparatos en los que se generan (ΔP_1), como en la propia chimenea (ΔP_2) y proporcionarles la energía cinética para su salida por la coronación de la chimenea a la velocidad V ($\Delta P_c = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2$).

El valor de ΔP_1 vendrá determinado por el tipo de instalación de que se trate, y no es tema a tratar en este artículo.

La pérdida de carga ΔP_2 en la chimenea puede expresarse como un factor de la energía cinética de los humos y de su altura relativa H/D :

$$\Delta P_2 = \frac{1}{2} \cdot f \cdot \rho \cdot V^2 \cdot \frac{H}{D} \quad (4.2.1)$$

siendo f el *factor adimensional de Fanning*, que a su vez es una función del *número de Reynolds*. En el Anexo I se explicita esta relación. A esta presión hay que añadir el valor de la *presión dinámica* en la coronación de la chimenea: $\Delta P_c = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2$. El valor total de la depresión necesaria es:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot \left(1 + f \cdot \frac{H}{D}\right) + \Delta P_1 \quad (4.2.2)$$

A efectos prácticos, puede decirse que para chimeneas ya en uso (rugosidad media) la expresión (4.2.2) puede quedar así:

$$\Delta P = \frac{18}{273 + T_H} \cdot V^2 \cdot \left(1 + 0,035 \frac{H}{D}\right) + \Delta P_1 \quad (4.2.2)$$

ΔP = presión, mm c.a.

V = velocidad media de los humos, m/s

H = altura de la chimenea, m

D = diámetro interior, m

Esta depresión puede obtenerse al pie de la chimenea por diferentes procedimientos, de entre los cuales cabe destacar tres:

4.2.1.- Tiro natural

Para ello se aprovecha el efecto de *empuje de Arquímedes* que sufren los gases calientes rodeados por otros fríos. La chimenea contiene una columna de humos calientes, rodeada de aire a una temperatura ambiente, inferior. El empuje o **tiro**, se calcula por la diferencia del peso de ambas columnas, de altura igual a la de la chimenea. La forma más sencilla de estimar esta diferencia consiste en considerar las dos columnas como de aire a temperaturas uniformes: Para la columna caliente, la temperatura será la de entrada de los humos en la chimenea, menos una cantidad por pérdidas, que puede estimarse en $\sim 0,08$ °C/m. Para el aire ambiente, la de éste a nivel del suelo:

$$\Delta P \approx \rho_o \cdot H \cdot 273 \cdot \left(\frac{1}{273 + T_a} - \frac{1}{273 + T_H} \right) \cdot \frac{P}{P_o} \text{ mm c.a.} \quad (4.2.1.1)$$

ρ_o = Densidad de los humos a 0°C y 1 atm, Kg/m³

H = Altura de la chimenea, m

T_a = Temperatura ambiente, °C
 T_H = Temperatura de los humos en la base, menos $0,08 \cdot H$, °C
 P = Presión atmosférica en la base de la chimenea
 P_o = Presión atmosférica a la altura del mar (~10.331 mm c.a.)

que puede quedar así:

$$\Delta P \approx 352 \cdot H \cdot \left(\frac{1}{273 + T_a} - \frac{1}{273 + T_H - 0,08 \cdot H} \right) \cdot \frac{P}{P_o} \text{ mm c.a.} \quad (4.2.1.2)$$

El cálculo exacto puede realizarse mediante la aplicación del conjunto de ecuaciones que se exponen en el Anexo I. Las diferencias entre la fórmula aproximada anterior y el cálculo más preciso, no superan en ningún caso el 2%.

4.2.2.- Tiro forzado (figura 1)



Figura 1

En este caso los humos son aspirados por un ventilador especial, resistente a las temperaturas y agresiones de los componentes de los humos, e impulsados a la chimenea, cuya altura, en este caso, depende exclusivamente de los condicionantes de contaminación.

Este sistema presenta la ventaja de no precisar más altura de chimenea que la ya indicada, pero consume energía y está sujeto a las paradas del ventilador por mantenimiento o avería. Precisa, por lo tanto, de un doble ventilador.

La definición del ventilador es inmediata, conociendo las características de los humos y de la instalación.

4.2.3.- Tiro inducido (figura 2)

En la base o en un punto cualquiera de la chimenea, se instala un boquilla que inyecta aire ambiente, impulsado por un ventilador normal, que induce el tiro (se le suele llamar "efecto Venturi").

Tiene las ventajas e inconvenientes del caso anterior, aunque suele consumir más energía que aquel, si bien la inversión en ventiladores es inferior.

La definición del ventilador, es algo más complicada.

5.- TIPO DE MATERIAL ESTRUCTURAL

Hasta mediados del siglo XX, la mayor parte de las chimeneas se construían de ladrillo, conservándose hoy en día, verdaderas obras maestras de arquitectura industrial de ladrillo.

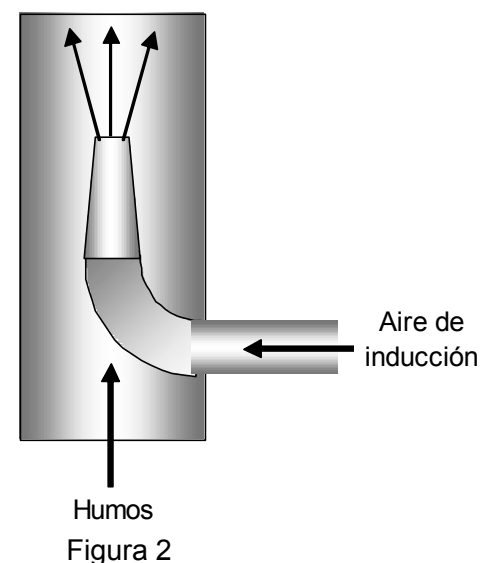


Figura 2

Posteriormente, se utilizaron bloques prefabricados de hormigón, huecos, que se iban rellenando de hormigón y las varillas correspondientes de acero, para armar el conjunto a medida que se iba subiendo en altura.

Por último, las técnicas actuales utilizan los encofrados deslizantes para la construcción de chimeneas (y silos) de hormigón armado.

También se han utilizado y se siguen usando, las chimeneas metálicas de chapa de acero, que resultan ser, en muchas ocasiones, más económicas y fáciles de instalar.

En muchos casos, como se verá más adelante, y en función de la calidad de los humos, se recubren interiormente con materiales refractarios resistentes al ataque químico de ciertos productos que acompañan a los humos.

6.- RESISTENCIA A LAS ACCIONES EXTERNAS

6.1.- Cargas de uso

Las chimeneas deben estar provistas de un conjunto de pasarelas para mantenimiento y acceso a los elementos de control de contaminantes, con sus accesos reglamentarios (figura 3). Salvo indicaciones particulares, unas cargas sobre estas pasarelas se deberán considerar excéntricas y con valores puntuales de 1.000 N, que se sumarán a una carga uniforme y simétrica de 2.000 N/m² en cada pasarela.

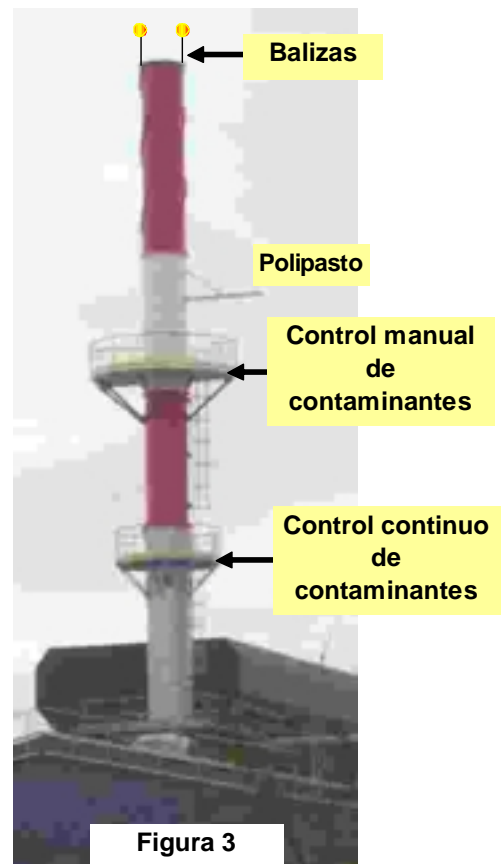
NOTA: En la definición de las cargas propias (masa de la estructura) no debe olvidarse la masa correspondiente al revestimiento interior de la chimenea.

6.2.- Viento

Una chimenea debe ser considerada, a los efectos del cálculo de la resistencia mecánica a las acciones externas, como una viga empotrada en una de sus extremos. La primera acción mecánica a tener en cuenta es la del viento. Para ello deberá aplicarse la NORMA NBE-AE-88 para *Construcciones cilíndricas de baja rugosidad*, sin olvidar el *Factor eólico de esbeltez*, importante en estos casos.

Puesto que las chimeneas deben llevar un conjunto de pasarelas para mantenimiento y acceso a los elementos de control de contaminantes, también debe ser considerada la influencia del empuje del viento sobre estos elementos, de acuerdo con la NORMA ya citada.

Un viento, aun siendo uniforme, puede dar lugar a fuerzas periódicas que pueden establecer vibraciones que entren en resonancia con la frecuencia propia de la estructura,



Este fenómeno debido a los llamados *vórtices de Kármán*, produce frecuencias de vibración que se deducen de la fórmula de *Blenk, Fuchs y Liebers*:

$$v \approx 0,207 \cdot \frac{V_v}{D_e}, \text{ en la que:}$$

v : es la frecuencia de la vibración producida por el viento, seg^{-1}

V_v : la velocidad del viento, m/s

D_e : diámetro exterior de la chimenea, m

Para paliar este peligroso fenómeno, deberán adoptarse medidas tales como equipar a la parte superior de la chimenea con hélices (figura 3), que pretenden romper la formación de los vórtices, o masas de agua, etc., que alejen la frecuencia propia de la estructura, de los valores debidos al *efecto Kármán*.

6.3.- Sismos

De acuerdo con la NORMA NCSE-94, se tomarán las precauciones adecuadas en su construcción.

7.- CIMENTACIÓN (CONOCIMIENTO DE LA GEOLOGÍA DEL TERRENO)

Atendiendo a las acciones citadas anteriormente, se definirá la cimentación de la chimenea en función de estas y muy particularmente de las condiciones geológicas del terreno. Para su cálculo es aconsejable utilizar el sistema ofrecido por <http://www.areadecalculo.com/>.

Un punto importante en el diseño de la cimentación es la unión de esta con el conducto de humos y la parte cilíndrica de la chimenea (figura 4). Esta unión debe realizarse mediante una zona de transición en la que se practiquen aberturas especialmente diseñadas para el entronque de la chimenea con la llegada de los humos, así como para su inspección y limpieza por la parte inferior.

En el caso de chimeneas de hormigón armado, el entronque se realizará "según las reglas del arte". Se si trata de chimeneas metálicas, el entronque –que deberá realizarse en hormigón armado, como la cimentación (figura 4) – y la parte metálica, se efectuará mediante la introducción en el hormigón del entronque de los pernos adecuados, en los que atornillará la primera brida de de chimenea, reforzada con las cartelas que los cálculos aconsejen.

8.- TIPO DE MATERIAL DE REVESTIMIENTO INTERIOR

De acuerdo con la composición y temperaturas de los humos, el interior de la chimenea deberá revestirse con materiales adecuados, y sujetos convenientemente al material estructural que lo sostendrá.

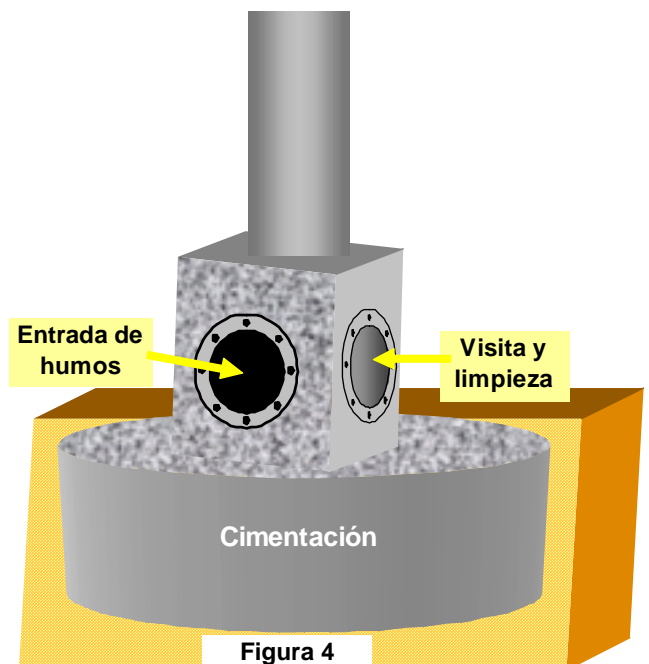


Figura 4

Estos materiales suelen ser de naturaleza refractaria, silicoaluminosos o similares. Comúnmente los humos, por debajo de cierta temperatura, en el ambiente oxidante y húmedo propio del exceso de comburente, toman un carácter ácido (formación de ácidos sulfurosos, nitrosos, etc.) que pueden atacar el interior de la chimenea. En el caso de humos muy ácidos, se recomiendan materiales borosilicatados. Si se trata de humos producidos por la combustión en aire de gas natural, pueden utilizarse aceros especiales, no muy caros, que se usan como material estructural y resisten bien la agresión de estos humos, con lo que se abarata considerablemente la construcción del conjunto.

ANEXO I

VARIACIÓN DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA CON LA ALTURA

La presión atmosférica disminuye con la altura sobre el nivel del mar. Suponemos que esta presión es igual a 760 mm Hg. En otras unidades, esta presión vale P_0 :

$$\begin{aligned} &1 \text{ atmósfera} \\ &101.330 \text{ Pascales} = 101.330 \text{ N/m}^2 \\ &1,033 \text{ Kp/cm}^2 = 1,033 \text{ bares} \\ &10.333 \text{ mm c.a.} \end{aligned}$$

El valor de la presión nominal a una altura h valdrá:

$$P(h) = P_0 \cdot e^{\frac{-M_a \cdot g \cdot h}{R \cdot T}}$$

M_a : peso molecular equivalente del aire, función de su humedad relativa ($\approx 28,9$ g/mol)

g : $980,65 \text{ cm/s}^2$

h : altura, cm

R : constante de los gases perfectos = $0,082054 \text{ atm} \cdot \text{l} / ^\circ\text{K} / \text{moñ}$
= $8,31434 \cdot 10^7 \text{ erg} / ^\circ\text{K} / \text{mol}$

T : temperatura absoluta del aire = $^\circ\text{C} + 273,16$

PESO DE LA COLUMNA DE AIRE RODEANDO A LA CHIMENEA

Cota geográfica del pie de la chimenea : h_0

Cota geográfica del la coronación: h_H

Altura de la chimenea: $H = h_H - h_0$

Temperatura absoluta del aire: T

$$\Delta P_a = P_0 \cdot \left(e^{\frac{-M_a \cdot g \cdot h_0}{R \cdot T}} - e^{\frac{-M_a \cdot g \cdot h_H}{R \cdot T}} \right)$$

PESO DE LA COLUMNA DE HUMOS EN LA CHIMENEA

$$\Delta P_H = P_0 \cdot \left[1 - \left(\frac{T_b}{T_a} \right)^{\frac{M_H \cdot g \cdot H_h}{R \cdot (T_a - T_b)}} \right]$$

T_a : temperatura absoluta de los humos en el pie de la chimenea

T_b : temperatura absoluta de los humos en la coronación

M_H : peso molecular equivalente del humo, función de su composición

TEMPERATURA DE LOS HUMOS EN LA CORONACIÓN

$$T_c = (T - T_a) \cdot e^{\frac{-\pi \cdot U \cdot D_c \cdot H}{q \cdot C_p}} + T_a$$

en la que:

- T_c : temperatura de los humos en la coronación de la chimenea, °C
- T : temperatura de los humos en la base de la chimenea, °C
- T_a : temperatura del aire ambiente, °C
- D_c : diámetro exterior máximo de la chimenea, m
- H : altura de la chimenea, m
- q : caudal de los gases, Kg/h
- C_p : calor específico de los humos, Kcal/Kg/°C
- U : coeficiente global de transmisión calorífica humos / aire ambiente, Kcal/h/m²/°C

El valor de U a su vez se determina a partir del conocimiento de:

- h_h : coeficiente de transmisión calorífica humos / pared interior de chimenea
- h_a : coeficiente de transmisión calorífica aire ambiente / pared exterior de la chimenea

$\frac{\lambda}{e}$ (conductividad térmica / espesor), de la pared de la chimenea

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_h} + \frac{1}{h_a} + \frac{e}{\lambda}}$$

Para el cálculo de los coeficientes de transmisión calorífica entre pared y fluidos, se proponen las fórmulas aproximadas siguientes:

$$h_h \text{ (Kcal/h/m}^2\text{/}^\circ\text{C)} = 10,9 \cdot C_p \text{ (Kcal/Kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C)} \frac{[V \text{ (m/s)} \cdot \rho \text{ (Kg/m}^3\text{)}]^{0,8}}{[D_i \text{ (m)}]^{0,2}}$$

$$(h_a \text{ (Kcal/h/m}^2\text{/}^\circ\text{C)} = 3,53 \frac{[V_{\text{aire}} \text{ (m/s)}]^{0,6}}{[D_e \text{ (m)}]^{0,4}}$$