

Determinación de los factores de corrección por altimetría para las condiciones atmosféricas del Valle de Aburrá, para el dimensionamiento de los sistemas metálicos individuales de evacuación de los productos de la combustión de los artefactos tipo B1.

José Rodrigo Castillo S.

Ramiro Duarte G.

Monografía para optar al título de
Especialista en combustibles gaseosos

DIRECTOR

Andrés A. Amell Arrieta

Ingeniero MSc.

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

Medellín, 2003

RESUMEN

El dimensionamiento de los sistemas de evacuación de los productos de la combustión de los artefactos tipo B.1 está afectado, entre otros factores, por las condiciones atmosféricas del sitio donde sean instalados. Aunque la NTC 3833 hace alguna alusión a las correcciones en los diseños por estos factores, no tiene en cuenta

las condiciones locales de Colombia sino que adoptó lo establecido en normas extranjeras, específicamente la NFPA 54.

Con este trabajo se pretende, mediante la realización de ensayos en dos calentadores de paso, los más comúnmente utilizados en el medio, encontrar factores de corrección que puedan ser aplicados a las tablas de las normas que puedan ser aplicados al área de cobertura del servicio de gas natural por red de las EE.PP.M. E.S.P., esto es, el Valle de Aburrá.

Las tablas de diseño de la norma tienen en cuenta como parámetros básicos la potencia del artefacto, la altura, la longitud del conector y el diámetro de la chimenea, razón por la cual se seleccionaron dos artefactos de diferentes potencia, diferentes alturas de chimenea y dos longitudes de conector, mientras que el diámetro permaneció constante.

La metodología utilizada se fundamentó en la teoría de diseño de experimentos a partir de la cual se determinó el número de réplicas para cada ensayo.

Los resultados arrojados permiten concluir que las dimensiones de la chimenea pueden ser menores a las indicadas por la tablas cuando se trabajan en sitios para condiciones atmosféricas semejantes al Valle de Aburrá, para artefactos con potencia menores de 30.7 kW cuyo sistema de combustión son quemadores atmosféricos de aire inducido.

INTRODUCCIÓN

En la combustión del gas natural, no obstante ser más limpia que la de otros hidrocarburos, se generan productos gaseosos que son nocivos para la salud humana a ciertos niveles de concentración y que pueden incidir en el comportamiento de la combustión si se presentara una recirculación de ellos. Por lo anterior, se requiere de una buena evacuación de estos hacia el exterior, logrando así que en los recintos donde se instalen artefactos a gas se mantengan las condiciones de salubridad exigidas por las autoridades competentes, y que la calidad del aire sea la requerida para una adecuada combustión del gas.

Cuando se puso en marcha el programa de masificación del uso del gas natural en Colombia, los diseños de los sistemas de evacuación para los artefactos utilizados en los sectores residencial, comercial e industrial se realizaban con base en normas o recomendaciones extranjeras, tales como la NFPA 54 y la norma italiana UNI 7129, sin tener en cuenta las condiciones locales para las cuales ellas fueron establecidas. Cada empresa distribuidora seleccionaba la que a su criterio fuera la más conveniente.

En el año 1995 se aprobó la norma NTC 3833 “Conductos de gas. Especificaciones para el diseño e instalación de sistemas para la evacuación de los productos de combustión de los artefactos de gas para uso doméstico, comercial e industrial”, aplicables a los artefactos de gas del Tipo B1, B2 y C (por definición los artefactos Tipo A no requieren de sistemas de evacuación); la norma incluye tablas para definir las capacidades de evacuación de chimeneas metálicas, de mampostería y de asbesto cemento,

individuales y colectivas, para artefactos del tipo B1 que operan por tiro natural (bajo presión estática no positiva) y del tipo B2 que operan por tiro mecánico inducido (bajo presión estática no positiva), mientras que para los tipo B2 que operan por tiro forzado (bajo presión estática positiva) y para los tipo C (con circuitos de combustión

sellados o de cámara hermética), remite a diseños y recomendaciones de los mismos fabricantes.

El 11 de marzo de 2002 se aprobó por el ICONTEC la primera actualización de dicha norma en la cual se introdujeron algunos cambios tales como el título: “Dimensionamiento, construcción, montaje y evaluación de los sistemas para la evacuación de los productos de la combustión generados por los artefactos que funcionan con gas”, con aplicabilidad en los usos doméstico y comercial. Como en la versión anterior, se incluyen tablas para el dimensionamiento de las chimeneas según el material, el aislamiento, la altura, la potencia y la distancia horizontal del conector, con la limitante de ser elaboradas a condiciones del nivel del mar.

Por la topografía colombiana, en la cual se presentan asentamientos urbanos hasta los 2,800 MSNM (Ver Tabla 1.1), podríamos decir que las tablas de la anterior norma requieren de una reevaluación para aplicarlas a las condiciones de sitio según su posición geográfica, tal como la misma norma lo establece en el numeral A.1.5: “Para determinar la máxima capacidad de evacuación de un sistema instalado a altitudes superiores a 600 m sobre el nivel del mar, se debe emplear la potencia nominal del artefacto” [1]. A este último aspecto se hace referencia en el Código Nacional de Gas Combustible (NFPA 54) cuando establece en el numeral 8.1.2 (Edición 1999): "Para operación a elevaciones por encima de 600 m sobre el nivel del mar, la potencia de los equipos será reducida a una tasa de 4% por cada 300 m de altura sobre el nivel del mar antes de seleccionar apropiadamente los tamaños de los equipos" [2].

De acuerdo con la teoría investigada se espera que el diámetro de un conducto circular o el área transversal de una chimenea, para una misma potencia, sea mayor a medida que aumenta la altura sobre el nivel del mar del sitio donde se encuentre instalado el artefacto, debido a que la capacidad de evacuación es directamente proporcional a la presión atmosférica, la que a su vez disminuye con la altitud. Según lo anterior, podría decirse que los conductos diseñados con la NTC 3833, sin realizar ninguna corrección por altitud, tendrían un mal funcionamiento, con lo cual los productos de la combustión, al no ser evacuados correctamente, producirían

condiciones desfavorables de contaminación del ambiente del recinto donde se encuentren instalados.

Tabla 1.1 Condiciones atmosféricas y población de las principales ciudades de Colombia

CIUDAD	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	H (%)	h (m)	P (mbar)	POBLACIÓN*
Barranquilla	38	27	20	83	4	1,009.5	1,329,579
Cartagena	39	28	19	82	2	1,009.8	978,187
Valledupar	36	27	11	81	109	997.6	348,230
Bucaramanga	31	22	15	83	959	905.7	558,748
Medellín	32	22	11	74	1,500	851.7	2,049,131
Tunja	22	13	3	80	2,782	736.2	124,122
Bogotá	25	14	2	75	2,600	751.6	6,865,997
Manizales	25	16	10	82	2,216	785.2	375,652
Pereira	33	21	8	78	1,411	860.4	499,771
Armenia	32	21	7	82	1,483	853.4	311,000
Cali	34	23	14	75	995	902.0	2,316,655
Neiva	39	28	13	67	442	960.5	358,279
Ibagué	30	20	12	81	1,285	872.8	439,785
Riohacha	36	28	20	80	3	1,009.6	98,318

*Población proyectada por el DANE a 2003

T1: Temperatura máxima registrada

T2: Temperatura promedio

T3: Temperatura mínima registrada

H: Humedad relativa promedio

h: Altura sobre el nivel del mar

P: Presión atmosférica

Fuente: Fuente: Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras

Himat - Calendario Meteorológico 1992.

Para presión se usó la fórmula sugerida por HIMAT. (actualmente IDEAM)

$$P = P_0 * e^{(-h/8800)}$$

donde: h en metros P₀ = 1 010 mbar P en mbar

En el país se han presentado casos de intoxicación por monóxido de carbono hasta el punto de causar la muerte de personas, según lo detectado en actuaciones adelantadas por la Superintendencia de Industria y Comercio (SIC) [6], lo que llevó a dicha Entidad a expedir unas resoluciones por medio de las cuales se hizo necesario certificar tanto las redes de gas en instalaciones para uso residencial y comercial, como la misma instalación de los artefactos (ver resoluciones 15616 y 15617 de mayo de 2001, 29448 de septiembre de 2001 y 14471 de mayo de 2002, así como la Circular Única No 10 de la SIC; para el efecto, se puede consultar la página web www.sic.gov.co). En el municipio de El Retiro se presentó igualmente un caso de fallecimiento por ausencia de conductos de evacuación de calentadores que atendían un baño turco. En la ciudad de Medellín se tiene conocimiento de un caso de mareo por inhalación de monóxido de carbono debido a descalibración de un calentador de acumulación (catalogado por el fabricante como Tipo A) y a condiciones inadecuadas de ventilación.

Se espera que con los resultados obtenidos en este trabajo pueda definirse de manera óptima el funcionamiento y dimensionamiento de los sistemas individuales metálicos para la evacuación de los productos de la combustión en el Valle del Aburrá.

OBJETIVOS

Objetivo General

Determinación de los factores de corrección por altimetría para las condiciones atmosféricas del Valle de Aburrá, para el dimensionamiento de los sistemas metálicos individuales de evacuación de los productos de la combustión de los artefactos tipo B1.

Objetivos Específicos

Avanzar en la implementación de una guía de diseño que considere las correcciones para el dimensionamiento de los sistemas metálicos individuales de evacuación de los productos de la combustión en el área de cobertura de la distribución de gas natural de EE.PP.M. E.S.P.

Someter a consideración del ente normalizador (ICONTEC) los resultados de la investigación.

MARCO TEÓRICO

Generalidades.

Todos los artefactos que emplean en su funcionamiento un combustible requieren para hacerlo correctamente, del suministro de aire en cantidad suficiente (aire comburente y exceso de aire de dilución). La combustión está acompañada de la generación de productos de combustión que se deben eliminar y evacuar al exterior de los recintos donde se encuentran instalados.

La ventilación y la evacuación de los productos de la combustión son entonces dos funciones que están estrechamente ligadas a la salubridad del recinto donde se encuentren instalados artefactos que consumen gas combustible, por las siguientes razones:

- El funcionamiento del artefacto supone un arrastre de aire (aire comburente) y una evacuación de los productos de la combustión,
- La ventilación del local supone un arrastre de aire nuevo y una evacuación del aire viciado.

Para la atención de ambos requisitos, pueden ser consideradas diferentes combinaciones; las mismas conducen a modos de ventilación y de evacuación particulares. Según el tipo de artefacto utilizado, se pueden dar los tres tipos de instalaciones mostrados en la figura 3.1 y que se describen como:

- Artefactos obligatoriamente conectados a conductos de evacuación o artefactos Tipo B1 y Tipo B2.
- Artefactos que no requieren conectarse a conductos (ejemplo: cocinas) o artefactos Tipo A.

- Artefactos de circuito estanco (artefactos conectados directamente con el exterior tanto para la toma del aire de combustión, como para expulsar los productos de la combustión) o artefactos Tipo C.

La función de un conducto individual es asegurar exclusivamente la evacuación correcta a la atmósfera de los productos de la combustión de los artefactos. Pero el funcionamiento no depende del sólo conducto, sino que está en función de todo el circuito, es decir, incluye:

- Entrada de aire.
- Artefacto.
- Conector.
- Conducto o chimenea.
- Salida o sombrero.
- Atmósfera exterior.

Naturaleza de los Productos de la Combustión. Aire de Combustión.

La combustión completa de un combustible gaseoso consiste en la oxidación de los elementos combustibles constitutivos del gas considerado (Gas Manufacturado, Gas Natural, Propano, Butano, etc.), según la siguiente reacción:

Aire (21% O₂, 79% N₂) + Gas (H₂, CO, C_xH_y, Inertes) ⇒ CO₂ + H₂O + O₂ + N₂ + Trazas de impurezas

Figura 3.1 [7] Formas de ventilación y evacuación

fig001.gif

Cuando la cantidad de oxígeno en el aire no es suficiente, se favorece la producción de un gas altamente nocivo para la salud, como lo es el monóxido de carbono (CO); éste es un gas tóxico, incoloro, inodoro e insípido. Cuando una persona respira monóxido de carbono, dicho gas bloquea la capacidad de la sangre para transportar

oxígeno y da lugar a una grave lesión del pulmón y el cerebro, e incluso puede provocar la muerte [3]; al inhalar el monóxido de carbono, éste se combina con la hemoglobina para formar una molécula de carboxihemoglobina la cual desplaza las moléculas de oxígeno privando al cuerpo de él y creando rápidamente una situación que atenta contra la vida. Los efectos tóxicos varían con la duración que tenga la exposición, la concentración de gas inhalado (ppm) y el estado físico de la víctima, especialmente sus ritmos respiratorio y circulatorio. Una molécula de carboxihemoglobina demora aproximadamente 5 horas para bajar su efecto a la mitad una vez termina la exposición [4].

A continuación se describen los síntomas asociados a la concentración de carboxihemoglobina:

% COHb Síntomas y consecuencias médicas

10% Sin síntomas. Los grandes fumadores pueden tener hasta un 9%.

15% Dolor de cabeza moderado.

25% Náuseas y dolor de cabeza fuerte. Hay recuperación rápida después de un tratamiento con oxígeno o aire fresco.

30% Síntomas intensos. Efectos a largo plazo potenciales especialmente en bebés, niños, ancianos, enfermos del corazón y mujeres embarazadas.

45% Inconsciencia.

50% o más Muerte.

Cuando no es posible conocer las concentraciones de carboxihemoglobina, se puede expresar la toxicidad del monóxido de carbono como función de su concentración en el aire y del tiempo de exposición. A continuación se indican los efectos de CO en función de estos parámetros:

CO (ppm)TiempoSíntomas

358 horas Máxima exposición permitida por la OSHA en

los lugares de trabajo durante un período de 8

horas.

2002-3 horas Dolor de cabeza moderado, fatiga, náusea y

mareo.

400 1-2 horas Dolor de cabeza severo, intensificación de otros

síntomas. Peligro de vida después de 3 horas.

80045 minutos Mareo, náusea y convulsiones. Inconsciencia en 2 horas.

Muerte en 2-3 horas.

1,600 20 minutos Dolor de cabeza, mareo y náusea. Muerte en

una hora.

3,200 5-10 minutos Dolor de cabeza. Mareo y náusea. Muerte en

una hora.

6,400 1-2 minutos Dolor de cabeza. Mareo y náusea. Muerte en

25-30 minutos.

12,800 1-3 minutos Muerte.

La intoxicación por monóxido de carbono es una de las principales causas de fallecimiento por intoxicaciones; en Estados Unidos da lugar cada año a más de 1,700 suicidios y a más de 500 muertes accidentales [3].

De manera general y que corresponde a la naturaleza de los gases, es interesante establecer las cantidades de productos asociadas a la combustión estequiométrica de una cantidad de gas equivalente a un kWh (con base en el PCS).

Volumen de gas correspondiente a:

1 kWh (PCS) + 1 m³ de aire (V_a) ⇒ 0,12 m³ de CO₂ + (120 a 175 g) H₂O vap. + 0,79 m³ N₂

V'_{fo} = 1,1 m³ (V_{fo} = 0,9 m³)

Se nota que: **V_{fo} < V_a < V'_{fo}**

Donde: V_a : volumen de aire estequiométrico

V_{fo}: volumen de humos secos

V'_{fo}: volumen de humos húmedos

Los términos anteriores son propiedades de la combustión y se definen como:

V_a : volumen de aire estequiométrico o volumen de aire teórico: Es el volumen de aire en m³(n) que se requiere para la combustión completa de un metro cúbico normal de gas, cuando el combustible y el oxígeno se disponen en relación estequiométrica [5].

V_{fo}: volumen de humos secos o poder fumígeno seco: Es el volumen de productos de combustión en m³(n), producido por la combustión completa de 1 m³(n) de gas con el volumen de aire teórico, sin tener en cuenta el agua producida por dicha combustión [5].

V'_{fo}: volumen de humos húmedos o poder fumígeno húmedo: Es el volumen de productos de combustión en m³(n), producido por la combustión completa de 1 m³(n) de gas con el volumen de aire teórico, teniendo en cuenta el agua producida por dicha combustión [5].

Poder Calorífico Superior (PCS): Es la cantidad de calor obtenida por la combustión completa de la unidad de volumen del combustible a la presión atmosférica normal (101,325 Pa), entrando el combustible y el oxidante a 0 °C y sacando los productos de la combustión a 0 °C; el agua que resulta de la combustión completa se supone que permanece líquida en los productos de combustión [5].

Los productos de la combustión se pueden caracterizar por medio de parámetros, independientes de la naturaleza del gas, expresados en términos de una misma cantidad de calor. Así, por ejemplo, expresando el PCS en kWh:

- Carbono específico total V_{CO_2} :

$$- V_{CO_2}/PCS = 0,1 \text{ m}^3/\text{kWh}$$

- Hidrógeno total específico V_{H_2O} :

$$- V_{H_2O}/PCS = 0,172 \text{ m}^3/\text{kWh}$$

- Aire teórico de combustión V_a :

$$V_a/PCS = 1 \text{ m}^3/\text{kWh}.$$

V_{CO_2} : Dióxido de Carbono Total: Es el volumen, en m^3 (n), de dióxido de carbono resultante de la combustión completa de 1 m^3 (n) de gas. Se expresa en m^3 (n) de CO_2 / m^3 (n) de gas [5].

V_{H_2O} : Vapor de Agua Total: Es el volumen, en m^3 (n), de vapor de agua producida por la combustión completa de 1 m^3 (n) de gas. Se expresa en m^3 (n) de vapor de agua / m^3 (n) de gas [5].

En la práctica, sin embargo, la cantidad de combustible inyectado a nivel del quemador y por ende los valores de los parámetros arriba definidos, deben ser ligeramente superiores a las cantidades teóricas asociadas a la combustión estequiométrica (ver figura 3.2).

Figura 3.2 [7]

fig002.gif

Dilución

El flujo de productos de la combustión a la salida del puerto de un artefacto debe ser constante, aunque la cantidad total evacuada por una chimenea es generalmente variable porque depende de las características de la instalación y de las condiciones meteorológicas. Igualmente, debe hacerse una compensación debida al aporte de aire complementario, llamado aire de dilución, el cual es suministrado a través de un dispositivo situado aguas abajo del artefacto antes de su conexión al conducto de evacuación y el cual puede ser:

- Un corta-tiro.
- Un regulador de tiro.

Corta-Tiro: Como se verá más adelante, es un dispositivo estático (coeficiente de pérdida de carga constante) que deja pasar una cantidad de aire variable, en función de las condiciones de tiro inmediatamente aguas abajo.

De esta forma, un artefacto puede ser conectado a conductos diferentes (por ejemplo en altura) sin que su funcionamiento se vea afectado, ajustando los flujos por medio del corta-tiro. Es evidente que esta posibilidad de adaptación no sea ilimitada ya que depende de la eficiencia del corta-tiro.

El corta-tiro siempre está complementado con un dispositivo anti reflujo que evita que, en caso de corrientes en sentido contrario a los productos de la combustión, estos sean devueltos contra el artefacto.

El factor de dilución A_0 (definido en el numeral 4.1.2.1) toma valores entre 0,60 y 3,0 para artefactos con quemadores atmosféricos [7]. La figura 3.2 da una idea de la distribución media del aire a nivel del quemador y del corta-tiro para un artefacto doméstico.

Regulador de Tiro: Se utiliza especialmente en artefactos de alta potencia para las que se requiere, no solamente separar el funcionamiento del artefacto del de la misma

chimenea, sino también crear una depresión dada, permanente, en el tubo de evacuación de los artefactos.

El regulador de tiro dispone de una cubierta móvil con la cual es posible regular las dos funciones anteriores.

Las características del regulador están en función de las de la instalación y en particular del conducto de evacuación. El instructivo práctico M-280 de Gaz de France [8] relativo al cálculo de las chimeneas de calderas suministra las indicaciones que permiten efectuar la elección.

La tasa de dilución se encuentra generalmente entre 0,1 y 0,5 [7] para artefactos de alta potencia provistos de quemador de aire forzado. Dicha tasa se define como:

$$A_0 = \frac{\text{Volumen de aire adicional a los humos húmedos estequiométricos}}{\text{Volumen de los humos húmedos estequiométricos}}$$

Elementos constitutivos de un sistema de evacuación de productos de la combustión y sus funciones.

Un sistema de evacuación de productos de la combustión está destinado a:

- Canalizar hacia el exterior los productos de la combustión derivados del funcionamiento de un artefacto.
- Asegurar, en ocasiones, la circulación de los productos de combustión y del aire al interior del artefacto (calderas colectivas de calefacción central de gran pérdida de carga, por ejemplo); en este caso el conducto debe mantener una depresión permanente hacia el inyector del tubo de la caldera.
- Asegurar, en ocasiones, la ventilación conjunta de una vivienda (conductos mixtos de ventilación)

La energía necesaria para la evacuación de los productos de la combustión puede ser asegurada por simple tiro natural o por tiro mecánico. El tiro natural es el

desarrollado por la diferencia de temperatura entre los productos de la combustión y la atmósfera exterior; el mecánico o el inducido es el desarrollado por un ventilador, por un chorro de aire o de vapor o por otros medios mecánicos [2].

El sistema de evacuación de los productos de la combustión puede ser:

- Una chimenea tradicional.
- Un conducto de ventilación o una abertura de salida del aire de ventilación.
- Una ventosa.

La mayoría de los artefactos a gas tipo B emplean un sistema de descarga por tiro natural. Asumiendo un adecuado suministro de aire, los productos de la combustión fluyen desde el artefacto hacia el exterior, pasando a través de un corta-tiro o de un control barométrico y son expulsados a la atmósfera exterior a través del sistema de descarga.

Componentes Constitutivos. Los componentes básicos de un sistema de descarga por tiro natural son el corta-tiro, el conector y la chimenea. Los incineradores y grandes artefactos a gas emplean el control barométrico o regulador de tiro en lugar del corta-tiro.

Una breve descripción del funcionamiento de los diferentes componentes del sistema de evacuación se indica a continuación:

1. Corta-tiro.

Todos los corta-tiro tienen aberturas de entrada y salida, pero la característica física común que los distingue de otros tipos de accesorios es el área de la abertura libre de alivio expuesta a la atmósfera.

Bajo operación normal, los gases de combustión del artefacto que entran al corta-tiro se mezclan con aire de dilución que entra por la abertura de alivio y fluyen por la salida del corta-tiro a una menor temperatura que la de los gases de combustión.

Bajo condiciones de tiro excesivo, tales como las causadas por fuertes vientos en el extremo terminal de la chimenea, la baja resistencia al flujo del aire de dilución a través de la abertura de alivio de un corta-tiro debidamente diseñado, tiende a neutralizar el efecto de la acción del exceso de tiro de la chimenea sobre la operación del artefacto.

Si por alguna circunstancia la presión en el extremo terminal causa reflujo en el sistema de descarga, la abertura de alivio también provee una abertura de descarga para los gases de combustión y el aire de reflujo. Las posiciones relativas de la entrada y salida del corta-tiro y de los baffles internos (si existen) sirven para desviar el reflujo del aire de manera que no se interrumpa el flujo de gases del artefacto. La localización del corta-tiro y los baffles debe ser tal que el reflujo de los gases de combustión y del aire no vaya directo hacia las aberturas del aire de combustión del artefacto, ni sea obstruido por ninguna superficie externa.

El corta-tiro debe cumplir con los dos objetivos anteriores sin permitir el escape de los productos de la combustión por las aberturas de alivio durante operación normal, excepto bajo condiciones de reflujo o bloqueo y sin permitir escapes excesivos durante el arranque del sistema de descarga cuando el artefacto se pone en operación.

Algunas de las funciones que debe cumplir el corta-tiro están en conflicto con otras. Por ejemplo, el comportamiento al escape se ve mejorado por una reducción en el área de la abertura de alivio, mientras que dicho aumento mejora el comportamiento al reflujo. Dicho conflicto indica que debe realizarse un buen diseño del corta-tiro para lograr un adecuado balance de estas funciones.

2. Conector.

El conector es un tubo (incluyendo accesorios) para conducir los productos de la combustión desde el corta-tiro del artefacto a gas hasta el tramo vertical o chimenea.

En muchos sistemas de descarga, gran parte de la resistencia al flujo de los gases de combustión desde el corta-tiro al extremo terminal de la chimenea, ocurre en el

conector. En consecuencia es importante emplear el menor número de codos y utilizar un conducto de tamaño al menos igual al del collarín.

El flujo de los gases de combustión en un sistema de descarga por tiro natural se crea por la diferencia en densidades entre una columna vertical de gases de combustión calientes y una columna similar de aire a la temperatura ambiente. En adición para incrementar la resistencia al flujo, grandes longitudes de tramo horizontal del conector tenderá a decrecer el tiro en el sistema de descarga al disminuir la temperatura de los gases de combustión, por las pérdidas de calor antes de alcanzar la base de la chimenea del sistema de descarga.

Otro aspecto importante en la configuración del conector es la ganancia en altura. Debido a las mayores temperaturas de los gases de combustión en este punto, por cada metro de ganancia en altura del conector (tanto por tramo recto vertical como por ganancia por pendiente de la tubería), produce mayor tiro que una altura igual de chimenea. En muchos sistemas de descarga, una ganancia en altura del conector puede significar la diferencia entre un comportamiento satisfactorio o deficiente de un sistema de descarga de otra forma bien diseñado.

3. Chimenea

Una chimenea es un conducto vertical que incluye uno o más tramos para descargar los productos de la combustión

CRITERIOS DE DISEÑO – ESTADO DEL ARTE

El cálculo del comportamiento de una chimenea para artefactos a gas ha sido objeto del interés de gran número de investigadores durante los últimos años. El tema es complejo en cuanto a que se requiere cierto número de asunciones prácticas para propósitos de simplificación. Mientras mayor información y mejores técnicas de medición estuvieron disponibles, las ecuaciones para las chimeneas fueron revisadas y su precisión se vio incrementada. Entre los investigadores que más conocimiento han aportado en este campo pueden citarse a Achenbach y Cole (1949) [23], Brown y Colborne (1956) [24], Kinkead (1952) [25], Schmitt y Engdahl (1949) [26], Stone (1957) [27], Thulman [28] y Wills [29] (1955). También pueden citarse las investigaciones adelantadas por Bennett y Purkis (1956) [30], Carne y White (1956) [31] y por Bennett, Brady y Dance (1958) [32].

A medida que la utilización de artefactos a gas fue más generalizada, se hizo necesario estudiar, en mayor detalle, no sólo los fenómenos de evacuación de los productos de la combustión, sino los de ventilación; fue así como posteriormente se llegó a tener reglamentaciones sobre el particular en los diferentes países.

Los factores principales que deben ser considerados son los materiales del conector y la chimenea, la configuración del conector, el tamaño y altura de la chimenea y la potencia del artefacto. A continuación se presentan las consideraciones de diseño adoptadas en diferentes partes del mundo.

Normatividad Francesa

En Francia, en lo que concierne a las chimeneas de las viviendas, la primera reglamentación nacional corresponde a un decreto de construcción de 1955 y sus resoluciones de aplicación de 1958.

Por otra parte, después de la publicación de la resolución del 22 de octubre de 1969 relacionada con las chimeneas, no fue ya obligatorio la construcción de chimeneas

propriadamente dichas en las viviendas, puesto que se autoriza la instalación de conductos “Específicamente de Gas” en la construcción de los inmuebles. Debe hacerse, por tanto, una distinción entre los conductos tradicionales, polivalentes por definición, y los conductos denominados “Específicamente de Gas” cuyas características funcionales y dimensionales tienen en cuenta el tipo de productos de combustión del gas (naturaleza y temperatura) y los artefactos que consumen gas (presencia de corta-tiro por ejemplo).

Los diferentes tipos de conductos son definidos en el D.T.U. 61-1 relacionado con las instalaciones de gas y en el D.T.U. 24-1 relacionado con los trabajos de deshollinar.

Ecuación Diferencial del Flujo por Tiro Natural

La ecuación diferencial de flujo a la cual se asemeja el modelo de los productos de la combustión, es la ecuación de Bernoulli, expresada en la forma general:

fig003.gif

Figura 4.1 [7]

fig004.gif

W_f =potencia disipada en forma de calor por el frotamiento de las partículas fluidas sobre la superficie limitante del volumen D y de la partículas fluidas entre ellas al interior del volumen D

D =volumen de estudio

δw =diferencial de volumen

p =presión estática

V = velocidad media

v =velocidad del fluido

q_m =flujo másico ($q = \rho_{ms} VA$)

A =sección cualquiera del conducto

ρ_{ms} =densidad media

α_1 y α_2 son los coeficientes de distribución de la velocidad

Los índices 1 y 2 se refieren a las secciones 1 y 2 respectivamente

fig005.gif

Hipótesis:

- La velocidad media del flujo es perpendicular a A
- Las velocidades son paralelas entre ellas y paralelas a la velocidad media
- Las trayectorias son rectilíneas

Para un conducto vertical de sección constante, la ecuación de Bernoulli puede escribirse así:

fig006.gif

Ahora,

fig007.gif

es constante porque las pérdidas de presión llegan a ser despreciables y

fig008.gif

y la ecuación puede ser integrada si se puede evaluar el término

fig009.gif

que representa la pérdida de carga lineal. Se puede tomar $\alpha = 1$ para las evacuaciones en esos conductos. Y la ecuación toma la forma:

fig010.gif

Si

fig011.gif

se refieren a las condiciones normales (0°C y 101,325 Pa) se pueden establecer las siguientes relaciones:

fig012.gif

donde T es la temperatura del gas en K y $T_0=273$ K

El término

fig009.gif

que es la energía disipada por rozamiento, se puede expresar en función de la velocidad media por la expresión general de las pérdidas, así

fig013.gif

con f = coeficiente de pérdida lineal y D_e diámetro equivalente de la sección del conducto. La ecuación 4.3 toma la forma:

fig014.gif

Integrando la ecuación resulta:

fig015.gif

donde T_e = temperatura de los productos de la combustión a la entrada de la chimenea

T_s = temperatura de los productos de la combustión a la salida de la chimenea

T_{ai} = temperatura ambiente

k = coeficiente de pérdidas por fricción

fig016.gif

Esta expresión es válida para una chimenea:

- De sección constante
- Recorrido para un flujo másico constante de productos de la combustión
- Mismo coeficiente de pérdida α en toda la longitud
- Se localiza en un ambiente a temperatura constante T_{ai}

La expresión anterior puede expresarse de la forma:

fig017.gif

Esta ecuación se expresa en valores mensurables (T_e , T_i , T_{ai} , $p_e - p_s$, $V_0 \dots$) y permite deducir el valor de k de resultados experimentales. Para el cálculo del conducto a partir de datos teóricos es preferible utilizar la forma siguiente:

fig018.gif

con

fig019.gif

Formas Simplificadas de ($p_e - p_s$)

Flujo sin enfriamiento

Para una chimenea de longitud corta y con un aislamiento térmico bueno se puede despreciar el enfriamiento de los humos y se puede decir que

$$T = T_e = \text{constante}$$

La ecuación 4.4 se integra y da como resultado:

fig020.gif

Comparando esta ecuación con la ecuación 4.8, se encuentra que los términos que intervienen como correctivos por el enfriamiento de los humos son:

fig021.gif

Con estas aproximaciones la ecuación 4.8 llega a ser de la forma:

fig022.gif

Expresiones prácticas

En general, a excepción de las chimeneas de gran potencia, los conductos de evacuación se conforman de tramos rectos relativamente cortos y el término de desaceleración puede ser despreciado:

fig023.gif

En el sistema MKS $\rho_0=1.293 \text{ kg/m}^3$, la masa volumétrica de los humos puede asimilarse a la del aire a $0 \text{ }^\circ\text{C}$ y 760 mm Hg (condiciones normales):

$$T_0 = 273.15 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}$$

entonces

fig024.gif

Se utiliza la forma general siguiente:

fig025.gif

donde: p_e y p_s en Pa

h en metros

T_{m1} y T_{m2} en K

V_0 en m/s

D_e en m

La definición de T_{m1} y T_{m2} se puede establecer como:

fig026.gif

Si $T_{m1} = T_{m2} = T_e$ existe ausencia de enfriamiento

fig027.gif

Estas expresiones, aunque empíricas, dan una buena aproximación. Calculándolas para los valores extremos de $q = 0.5$, $r = 1$ y asumiendo $T_e = 2T_{ai}$, se obtienen los siguientes errores:

	Error relativo sobre T_{m1}	Error relativo sobre T_{m2}
Forma b	+ 24.3 %	+ 22.7 %
Forma c	- 0.5 %	+ 2 %
Forma d	+ 4.5 %	+ 3 %
Forma e	- 0.5 %	- 1.5 %

Principios para el diseño

- El tiro se debe a la diferencia de densidades entre una columna de gases de combustión calientes y una columna equivalente de aire exterior
- El flujo de gases de combustión producido por el tiro, se reduce por la fricción debido a la necesidad de dar una aceleración a la corriente
- El flujo de gases de combustión se reduce aún más por la absorción de calor y las pérdidas de calor del sistema
- Se deben considerar los efectos de altitud.

Introducción de las Variables del Gas

Figura 4.2 [7]

fig028.gif

Las variables más significativas en el estudio de la evacuación de los productos de la combustión, en la sección inferior de la chimenea, son:

La temperatura de los humos, T

El flujo másico, q_m

La velocidad media de los humos, V

En vez de ser medidos directamente, estos parámetros suelen ser calculados con base en otros:

- Por las características del quemador: potencia útil P_u y el rendimiento intrínseco, η_u .
- Por las características del gas: poderes caloríficos superior, PCS, e inferior, PCI, dióxido de carbono total, CO_2 , hidrógenos totales, H_2O .

Factor de dilución A_0

Un metro cúbico de gas en combustión produce en condiciones estequiométricas un volumen de humos húmedos V_f' , que son diluidos por E_a Nm^3 que entran a la corriente de humos en el quemador y a través del cortatiro.

Se llama factor de dilución la relación:

fig029.gif

Si n es el factor de aireación y V_a es el volumen de aire estequiométrico, entonces:

fig030.gif

El valor de

fig031.gif

para el gas natural tiene un valor de 0.905 [7]. Este valor se suele aproximar a 1.0 y entonces $A_0 \cong n-1$

La tasa de CO₂, γ' de los humos después del corta-tiro

Sea γ' la tasa de CO₂ de los humos húmedos después del corta-tiro

Sea γ la tasa de CO₂ de los humos secos

fig032.gif

es la tasa máxima de CO₂ que puede existir en los humos húmedos ($\gamma'_0 = 9.6\%$ para gas natural en combustión estequiométrica)

Se puede hacer la relación entre γ' y γ

fig033.gif

Proporción “s” del calor en los humos bajo forma de calor sensible

fig034.gif

P_{fs} : cantidad de calor portada en los humos en forma de calor sensible. Es igual al calor total producido por la combustión completa del gas menos la cantidad de calor disponible dentro del artefacto (potencia útil, P_u) y menos la cantidad de calor que se obtiene por la condensación del vapor de agua contenido en los humos húmedos (P_{fl})

Se llama rendimiento global

fig035.gif

$$P_{fl} = Q_g (PCS-PCI)$$

$$\text{Entonces } P_{fs} = P_t - P_u - P_{fl}$$

P_t : calor total producido por la combustión estequiométrica del gas o potencia térmica bruta

Entonces $P_t = Q_g PCS$

Velocidad media de los humos dentro de la sección A de la chimenea

La velocidad media de los humos se puede expresar como:

fig036.gif

La velocidad a la temperatura media T en la sección A será:

fig037.gif

Si se quisiera realizar la corrección por presión la expresión anterior sería:

fig038.gif

Para una chimenea de diámetro D ,

fig039.gif

Si Q_{f0} es el caudal volumétrico de los humos a condiciones normales, entonces

fig040.gif

La potencia del quemador es la relación entre la potencia útil, P_u y el rendimiento útil η_u del artefacto. Entonces:

fig041.gif

La temperatura T de los humos en la sección A.

T_{ai} : temperatura del aire ambiente del recinto donde se encuentra el calentador

T es igual a la suma de la temperatura ambiente y del calentamiento debido a los humos

fig042.gif

Desbordamiento en el corta-tiro.

La experiencia ha permitido poner en evidencia la existencia de un cierto límite de la dilución por debajo del cual aparece el fenómeno de “desbordamiento”.

El fenómeno de “desbordamiento” se caracteriza por el hecho de que a nivel de la cubierta del corta-tiro se puede tener simultáneamente aspiración de aire y reflujo parcial de los productos de la combustión en razón de la configuración de la descarga a este nivel.

Este límite puede ser caracterizado por el contenido máximo de CO₂ admisible en los productos de combustión “húmedos” después del corta-tiro.

Figura 4.3 [7]

fig043.gif

La experiencia con artefactos de uso doméstico de quemadores atmosféricos ha permitido precisar el valor del límite superior: $\gamma = 5\%$ [7] (Ver figura 4.3).

Se denomina límite de desbordamiento, el flujo total evacuado por debajo del cual aparece el fenómeno de desbordamiento. Convencionalmente, se admite que hay desbordamiento cuando el contenido de CO₂ en la proximidad del corta-tiro es igual al contenido de CO₂ en el aire ambiente aumentado en 0.10% [7].

Factores que inciden en el cálculo de los conductos de evacuación de los productos de la combustión y de los de ventilación.

- Características de las fuentes: artefactos que utilizan gas: flujo másico de los humos estequiométricos, flujo másico del aire adicional, flujo calórico en el inyector del artefacto, depresión o sobrepresión a la salida del intercambiador, resistencia del corta-tiro.
- Características del conducto: forma, dimensiones.
- Características del local: resistencia de los orificios de ventilación

- Parámetros meteorológicos: temperatura exterior, velocidad y dirección del viento
- Eventualmente las características de los extractores o de los ventiladores: curvas flujo-presión

Es más cómodo fijar los valores de los otros parámetros que escoger como variables los flujos de aire admitidos en las diferentes fuentes.

Cuando la fuente es un artefacto que utiliza gas, la velocidad y la temperatura a la entrada del primer segmento del circuito de evacuación dependen ambos del aire adicional. Por comodidad del cálculo y con el fin de simplificar las fórmulas se expresa el flujo de aire adicional por intermedio del contenido de CO_2 de los humos húmedos diluidos, γ , que se toma como incógnita.

Humedad de los productos de la combustión.

Los productos de la combustión contienen una gran cantidad de vapor de agua que es susceptible de condensarse en las paredes de la chimenea y de provocar la humificación de las chimeneas de barro o de sus uniones. Este fenómeno ha sido llamado “bistrage” en virtud del color oscuro que adquieren las manchas de la humedad cuando el conducto afectado, hecho en materiales tradicionales, ha servido a un aparato que funciona con combustible sólido que produce hollín, antes de ser usado para el gas natural.

Para evaluar el riesgo de “bistrage, es importante poder calcular la temperatura de rocío de los productos de la combustión, es decir la temperatura para la cual la presión parcial del vapor de agua es igual a la presión de vapor saturada.

El vapor de agua contenido en los productos de la combustión proviene de:

- El agua de combustión definida por el hidrógeno total, $V_{\text{H}_2\text{O}}$.
- El agua contenida en el gas.
- El agua contenida en el aire.

La cantidad de vapor de agua contenida en los productos de combustión se expresan normalmente por la humedad relativa,

fig044.gif

donde:

P_{H_2O} = presión parcial del vapor de agua

P_v = presión vapor de saturación a la temperatura real.

La temperatura de rocío de los productos de combustión varía inversamente con su dilución en el aire. La máxima corresponde a la mezcla estequiométrica.

Fórmulas Generales

La combustión completa de un metro cúbico de gas a las condiciones normales (0 °C y 101.325 kPa) producen prácticamente:

$V_{CO_2} m^3 (n)$ de CO_2 ; $V_{H_2O} m^3 (n)$ de vapor de agua ; $0.8 V_a m^3 (n)$ de N_2 y necesitan la cantidad de $V_a m^3 (n)$ de aire seco. Si existe un exceso de aire seco, E_a , entonces se puede escribir simbólicamente:

fig045.gif

donde F = presión parcial del vapor de agua contenido en el aire

F' = presión parcial del vapor de agua contenido en el gas

P_{H_2O} = presión parcial del vapor de agua contenida en los humos

fig046.gif

En esta expresión la dilución se expresa por el exceso de aire E_a . Haciendo las siguientes definiciones:

Sea γ el contenido de CO_2 de los humos secos

fig047.gif

Sea γ' el contenido de CO_2 de los humos húmedos:

fig048.gif

Se prefiere utilizar γ para los cálculos de aplicaciones a partir de resultados experimentales porque su valor se obtiene directamente de la ayuda de analizadores de gases que usan comúnmente una desecación previa de los humos:

fig049.gif

Es importante recordar que $P_{\text{H}_2\text{O}}$ se expresa fácilmente en función de γ y γ' por la expresión:

fig050.gif

sin embargo, esta fórmula es poco utilizable en la práctica. De otra parte:

fig051.gif

Por el contrario, para los cálculos teóricos se emplea γ' que permite expresar fácilmente el caudal de productos de combustión en función de las características del gas y de los artefactos que se usan.

Tomando las definiciones de γ y γ' se tiene que:

fig052.gif

Y la ecuación llega a tener la forma:

fig053.gif

Fórmula Práctica

En la práctica

fig054.gif

es muy pequeño comparado con

fig055.gif

y la ecuación 4.25 llega a ser:

fig056.gif

En la tabla 4.1 se especifica para diferentes gases los valores respectivos de cada uno de los términos

fig057.gif

y, además, para el caso en que $F' = F$, y para el caso particular en que $F = 13.33$ mbar (10 mm Hg) y $\gamma' = 5\%$. Se puede observar que el error cometido por la fórmula simplificada 4.26 es siempre bajo. Para los gases de la segunda familia el error no excede al 0.12%. En la figura 4.4 se muestran las curvas de presión de rocío en función de γ' para diferentes gases y a las siguientes presiones de vapor:

$F = 4.58$ mm Hg ó 6.11 mbar (aire saturado a 0°C)

$F = 10.5$ mm Hg ó 14.00 mbar (60% de humedad a 20°C)

Figura 4.4 [7]

fig058.gif

Se debe recordar que la comparación de las temperaturas de rocío de los productos de combustión de los diferentes gases debe realizarse a igual dilución (última columna de la Tabla 4.1, punto de rocío de los humos neutros). La expresión de la temperatura de rocío en función de γ' es práctica para el cálculo de los conductos pero no permite establecer comparación inmediata entre los diferentes gases ya que si se considera, por ejemplo, una misma cantidad de aire seco por termia, es decir una misma relación:

fig059.gif

Tabla 4.1 Errores relativos por la utilización de la fórmula práctica 4.26 [7]

Tipo de Gas	V _a	V _{CO2}	V _{H2O}	(1)	γ' %	(2)	(3)	Error Relativo %	Punto de rocío, P _{H2O} r (*) °C
Gas manufacturado	4.183	0.458	1.033	0.754	5	0.377	94.2	-0.395	61.5
Aire propanado 6500	5.615	0.878	0.98	0.380	5	0.190	55	-0.3444	53
GN Lacq, 1964	9.882	1.03	2.027	-0.0905	5	0.0452	89.6	+0.0534	59
Gas de Lacq, 1980	9.74	1.031	2.030	-0.113	5	-0.056	84.8	-0.07	58.9
Propano comercial	22.95	3.00	3.55	-0.320	5	-0.160	55	+0.29	53

fig060.gif

* P_{rr}: punto de rocío de los humos neutros

F = 100 mm Hg = 13.33 mbar

Diseño

Un conducto de evacuación de los productos de la combustión se presenta como un conducto vertical que, por el efecto del tiro térmico, asegura la evacuación a la atmósfera de una cierta cantidad de productos de combustión más o menos diluidos. La cantidad evacuada se establece de tal manera que el efecto motor (tiro térmico) equilibra en cualquier instante el efecto resistente (pérdidas de presión a lo largo del circuito).

Dos métodos de cálculo pueden ser utilizados:

- Método iterativo.
- Método directo.

Método iterativo.

Figura 4.5 [7]

fig061.gif

Para una instalación dada, a partir de la presión P_e , al nivel y al exterior de la entrada del aire al local atendido por el conducto, se puede calcular la presión P_s al nivel de salida, según dos trayectorias (ver figura 4.5).

Trayecto 1 exterior: $P_{s'}$.

Trayecto 2 interior: $P'_{s'}$.

Si $P_{s'} \neq P'_{s'}$, se repite el cálculo con otro valor de flujo (por consiguiente de γ'_{CO_2}) hasta que se obtenga la igualdad $P_{s'} = P'_{s'}$.

De esta forma, se obtiene para la instalación estudiada y para las condiciones atmosféricas fijadas, el flujo evacuado. Si este flujo es superior al correspondiente de desbordamiento, la evacuación se dice que es satisfactoria.

Método directo.

Interés del método directo.

El método iterativo permite conocer, para una instalación dada, el flujo de productos de la combustión evacuados. Pero, en la práctica, el problema a resolver es inverso. Se fijan las características mínimas deseadas del flujo y se busca por ejemplo:

- La sección mínima de un conducto de altura dada que permita asegurar la evacuación correcta del volumen de productos de la combustión liberados por un artefacto de potencia dada;
- La potencia útil máxima de un artefacto que pueda ser conectado a un conducto cuyas características dimensionales, en particular la sección, son dadas.

Principio del método directo.

4. Hipótesis básica

Se fija a priori: $\gamma' \leq 5\%$.

El contenido de CO_2 , γ_{CO_2} , en los productos de la combustión húmedos tiene una doble propiedad:

- Su valor máximo permite fijar el límite de desbordamiento (ver numeral 4.1.4)
- Se pueden expresar en función de γ'_{CO_2} todos los parámetros característicos del flujo de los productos de la combustión.

5. Flujograma de cálculo

fig062.gif

El coeficiente global de pérdida de presión del conducto de conexión, ξ , incluye la pérdida de presión debida a la cabeza de velocidad:

$$\xi = \xi' + 1$$

Siendo ξ' el coeficiente de pérdida de presión de flujo en el conector exclusivamente.

Este en efecto es un parámetro esencial porque la pérdida de presión es en general debida principalmente a los codos y singularidades del conector porque la tasa de flujo es mayor que en el tramo vertical.

6. Análisis de resultados.

El resultado final es el coeficiente global de pérdida de presión del conducto referido a la velocidad de los productos de la combustión en el mismo.

Ejemplo:

Se considera una instalación tal que la altura y la sección del conducto de evacuación son dados (conducto previamente considerado por la reglamentación de 1958).

La conexión del conducto al artefacto requiere un codo de 90° , es decir que el coeficiente global de pérdida de presión del recorrido puede ser estimado en

$$\xi = 3.$$

En efecto ξ se descompone de la forma siguiente:

Cabeza de velocidad 1,0

Corta-tiro 0,2

Codo de 90° 1,3

Entrada en el conducto 0,5

ξ Global 3,0

El cálculo se realiza ahora para varias potencias; se obtiene para cada una de ellas, un valor de ξ , por ejemplo:

$$P = 24 \text{ Th/h } \xi = 1,9$$

$$P = 21 \text{ Th/h } \xi = 2,5$$

$$\underline{P = 18 \text{ Th/h } \xi = 3,2}$$

$$P = 15 \text{ Th/h } \xi = 4,1$$

La potencia adecuada es la que corresponde a un valor $\xi \geq 3$. En efecto, si $\xi = 3,2 \Rightarrow \gamma' < 5\%$, por tanto una evacuación correcta. Para el ejemplo presentado arriba, esto significa que se puede conectar un artefacto de 18 Th/h.

Formulación del método directo.

- **Conexión de un solo artefacto.**

La formulación se basa en la aplicación de las ecuaciones generales (ver primera parte del numeral 4.1) adaptadas a un conducto individual.

ρ_o Densidad de los productos de la combustión a 0°C (kg/m³)

V_{CO_2} Carbono total (m³ / m³)

η_u Eficiencia útil del artefacto

η_g Rendimiento global del artefacto.

PCSPoder calorífico superior a 0°C kWh/ m³)

T_{ac} Temperatura ambiente exterior (K)

T_{ai} Temperatura ambiente interior (K)

C_p Calor específico de los productos de la combustión (kWh/kg-°C)

L Longitud del conducto

f Coeficiente de pérdida de carga lineal del conducto (adimen.)

3,14

T_0 273 K

g 9,81 (m/s²)

Hipótesis:

- PCI / PCS \approx 0,9 independiente de la naturaleza del gas.
- Se admite que la densidad de los productos de la combustión es aproximadamente igual a la del aire ($\rho_o = 1,0$).
- El coeficiente global de transferencia térmica k , se toma igual al coeficiente de convección interna α_i , en el conducto vertical de evacuación, es decir que el conducto está frío (arranque de la instalación).

fig063.gif

- **Dos artefactos conectados al mismo conducto.**

El cálculo se debe realizar para el caso más desfavorable de funcionamiento, que tiene lugar cuando sólo funcione el artefacto de mayor potencia conectado al tramo que posea el mayor coeficiente de pérdida de presión.

En efecto, por el corta-tiro del artefacto apagado se evacua un flujo de aire que diluye los productos de la combustión a la entrada del conducto y disminuye así el tiro térmico.

El principio de cálculo y las ecuaciones del método directo siguen siendo válidos pero, cuando la tasa de CO₂ después del corta-tiro del artefacto en funcionamiento es del 5%, dicha tasa es inferior a la entrada del conducto debido a la dilución.

Un cálculo similar al desarrollado anteriormente es insuficiente cuando más de dos artefactos se conectan a un mismo conducto. Un método particular se recomienda para estos casos. Por tanto, a un conducto individual nunca se debe considerar la conexión de más de dos artefactos (caldera + calentador de agua).

Corrección por Condiciones Atmosféricas

En el desarrollo de las ecuaciones presentadas al principio de esta Normatividad, específicamente en el numeral 4.1.3.4 se introdujo la corrección por la temperatura ambiente, mientras que por efectos de la presión atmosférica, se consideró que ésta era prácticamente igual a la de las condiciones estándar de referencia, por lo que el factor de corrección por este fenómeno se hizo igual a la unidad.

Sin embargo, y para el caso de las chimeneas de los equipos de alta potencia, el área de la sección encontrada deberá multiplicarse por un coeficiente que depende de la altura sobre el nivel del mar, cuyos valores se indican en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Coeficientes de corrección por la altura sobre el nivel del mar [8]

Altura sobre el nivel del mar	Coeficiente de corrección
0 a 500 m	1.00
500 a 1 000 m	1.09
1 000 a 1 500 m	1.15
1 500 a 2 000 m	1.20

Normatividad Americana

Ecuación de Flujo

La ecuación semiempírica fue desarrollada de ecuaciones más precisas elaboradas por Kinkead [25] e incluye las variables más importantes que afectan la capacidad de los sistemas de evacuación por tiro natural de artefactos equipados con corta-tiro.

fig064.gif

- I = Máxima capacidad de evacuación expresada como potencia de entrada del artefacto (MBtu/h)
- A= Sección transversal del conducto de evacuación (pulgadas²)
- P = Presión atmosférica (pulgadas de Hg)
- E= Fracción de calor sensible en los gases de combustión (adimensional)
- t₂ = Aumento de temperatura, por encima del ambiente, de los gases saliendo del corta-tiro o entrando al conducto de evacuación después de la dilución (°F)
- T= Temperatura ambiente (°R)
- H= Altura total del conducto desde el corta-tiro hasta la parte superior (pies)
- R= Resistencia total al flujo del sistema de evacuación (expresado como cabeza de velocidad, sin dimensiones)
- D= Diámetro del conducto (pulgadas)
- L= Longitud horizontal del conector (pies)
- U= Coeficiente global de transferencia de calor de los gases a través del conducto de evacuación (Btu/h-°F-pies² del área interna)

Campo de aplicabilidad de las variables:

- I: Todos los gasodomésticos que tengan corta-tiro
- A: Mayor o igual que 7 plg²
- P: Desde el nivel del mar (29.92 pulgadas Hg) hasta 15.000 pies de altitud
- E: Ambientadores centrales, calderas, unidades de calentamiento de agua, calentadores de agua E= 0.12

Ambientadores de pared o de piso, ambientadores de habitaciones $E= 0.17$
(puede usarse un valor más preciso según la ecuación 4.30)

t_2 : Para $E= 0.12$ $t_2= 300^\circ\text{F}$

Para $E= 0.17$ $t_2= 350^\circ\text{F}$.

Para valores superiores, puede calcularse como $t_2=$ aumento de los humos /
relación de dilución)

T: Generalmente se toma como 520°F (puede usarse el valor exacto)

H: Desde 4 pies a más de 100 pies, o el que se requiera

R: Conductos verticales $R= 2.0 + 0.40H/D^*$; conductos con laterales $R= 3.5 + 0.4$
 $(H+L)/D^*$ (Ver tabla 4.3 para valores de diversos arreglos). (Adimensional)

* Para conductos metálicos con $D > 24$ pulgadas.

D: Para figuras diferentes a la circular se debe usar $D = \text{perímetro}/\pi$

L: Para $U= 1.2$, $L \leq 3$ pies por pulgada de diámetro

Para $U= 0.6$, $L \leq 8$ pies por pulgada de diámetro

en ningún caso $L > H$

U: varía de 0.0 a 1.3 (ver tabla 4.4)

Fración de calor sensible, E

fig065.gif

C_p : calor específico a presión constante = $0.255 \text{ Btu/lb-}^\circ\text{F}$

t_1 : temperatura de los humos a la salida del artefacto = 430°F por encima de la
temperatura ambiente

Tabla 4.3 Resistencias al flujo de algunos componentes del venteo [9]

Ítem o Accesorio	Resistencia expresada como cabeza de velocidad, R	
	Observado	Diseño
Cabeza de aceleración (debe incluirse en todos los cálculos)		1.0
Corta-tiro	0.5 – 2.5	1.0

Codo 90°	0.5 – 1.35	0.75
Codo 45°	-	0.30
Tee redondeada a 90° en conductos individuales o chimeneas	0.75 – 1.5	1.4
Sombreretes*	<0.0 - >4.0	0.50
Tee con transición redondo-oval	2.5	2.50
Pérdidas de tubería Metálicos y asbesto-cemento Recubrimiento de Arcilla, mampostería, bloques	0.5(L+H)/D PARA D ≤ 24" † 0.4(L+H)/D PARA D > 24" † 0.8(L+H)/D †	
Ampliación: A ₁ : área de entrada. A ₂ : área de salida. Cabeza de velocidad en A ₂	$\left(\frac{A_2 - A_1}{A_1}\right)^2$	

*El uso de sombreretes con resistencias de cabeza de velocidad por encima de 1, pueden reducir drásticamente la capacidad de venteo por debajo de los valores que se tabulan. Los sombreretes pueden diseñarse con secciones difusoras para producir resistencias negativas para recobrar la cabeza de aceleración

† Ver definición de D

Tabla 4.4 Coeficientes globales de transferencia de calor U para varias chimeneas y conductos [9]

	U, Btu/h-°F-pies ² de área interna		
Material	Observada	Diseño	Observaciones
Chimeneas de acero industriales		1.3	Bajo viento húmedo

Tubería de alcantarillado arcilla o hierro	1.3 – 1.4	1.3	Usado como material de pared sencilla
Conducto de gas de asbesto cemento	0.72 – 1.42	1.2	Ensayado por la norma UL Std 441
Tubería de calentadores ambientales, negras o pintadas		1.2	Comparable al acero galvanizado contra la intemperie
Acero galvanizado de pared sencilla	0.31 – 1.38	1.0	Depende de la exposición y de las condiciones de superficie
Aluminio puro sin pintar de pared sencilla		1.0	Número 1100 u otra superficie brillante de aleación de aluminio
Chimenea de ladrillo con recubrimiento de cerámica	0.5 – 1.0	1.0	Construcción residencial tal como se usa para gasodomésticos
Conductos de gas de doble pared con espacio de aire de ¼"	0.15 - 0.86	0.6	Tubería para exterior de acero galvanizado, tubería interior de aluminio puro; ensayadas con la norma UL Std 441
Venteos de doble pared con espacio de aire de ½"	0.37 – 1.04	0.5	
Chimeneas prefabricadas aisladas		0.3	Aislamiento sólido de acuerdo con la UL Std 103

Para proteger contra el desbordamiento en el corta-tiro, el tiro creado debe ser tal que induzca un adecuado flujo de aire de dilución a través de apertura de alivio en él. El aire de dilución debe constituir no menos del 40% - 50 % de los gases que se ventean.

Para el contenido del calor sensible por encima del nivel del ambiente, el balance de calor de los humos está dado por la ecuación 4.31:

$$W_1 c_p t_1 = W_2 c_p t_2 \quad [4.31]$$

donde:

W = masa del gas

C_p = calor específico del gas

t = temperatura del gas

1 y 2: entrada y salida del corta-tiro

La ecuación 4.31 considera el factor de dilución como W_2 / W_1 o t_1 / t_2 despreciando las pérdidas por baja radiación y cambio de calor específico. Entonces, asumiendo un factor de dilución de 1.4, se tiene $t_1 = 1.4 t_2$. Es necesario escoger un valor característico de la temperatura de salida de los productos de la combustión del artefacto, t_1 .

Para artefactos típicos aprobados, la ecuación 4.32 es una simplificación de la ecuación 4.29 y puede ser usada para conectores y chimeneas de 6" de diámetro o mayores haciendo los siguientes reemplazos:

$$P = 29.92 \text{ "Hg} E = 0.12 t_2 = 300 \text{ } ^\circ\text{F} T = 520 \text{ } ^\circ\text{F} D^2 = 4A/\pi$$

fig066.gif

Conductos con Secciones Rectangulares

Cuando se utilicen conductos de evacuación con sección rectangular, se puede utilizar la Tabla 4.5 en la cual se muestra para una sección rectangular cuál sería el área equivalente de sección circular que produce los mismos efectos en cuanto a fricción y capacidad de evacuación.

Tabla 4.5 Diámetros equivalentes de conductos circulares que tiene la misma fricción y capacidad de varios conductos rectangulares [14]

tab001.gif

Condensación

La figura 4.6 muestra las curvas límites de condensación de un conducto de evacuación para un artefacto simple realizadas para un punto de rocío de 48.9°C (120 °F) [9]

La curva superior representa el límite de un sistema libre de condensación en las paredes internas del conducto. La curva inferior representa el límite de la condensación de todos los gases de combustión.

La condensación se presenta continua entre las dos curvas y depende de las condiciones del sitio: en sitios fríos el límite se acercará a la curva superior y en el caliente se acercará a la inferior. Para tuberías instaladas en el exterior de la edificación deberán multiplicarse por un factor de 2.0 cuando se calcule la longitud total de evacuación (eje de las abscisas) para obtener resultados razonables y conservadores.

Límites de condensación de un sistema de evacuación de un solo artefacto

Figura 4.6 [9]

fig067.gif

Las tablas de diseño para los sistemas de evacuación que sean elaboradas con base en las investigaciones de la AGA tiene en cuenta estas consideraciones.

Para el cálculo del valor de la temperatura de rocío se utilizó la siguiente ecuación:

fig068.gif

T_R en °C y P_{H_2O} en bar

Corrección por Condiciones Atmosféricas

La ecuación 4.29 tiene en cuenta de hecho los efectos debidos a los cambios en la presión atmosférica (P) y la temperatura ambiente (T), por lo que no

requiere de correcciones adicionales. Como se mencionó anteriormente, la ecuación tiene aplicación hasta 15.000 pies (4.600 m) de altura sobre el nivel del mar.

Las tablas de diseño a que hacen relación la NFPA 54 [2] son válidas para alturas hasta 600 m sobre el nivel medio del mar y bajo condiciones de temperaturas hasta de 40 °C. Temperaturas menores favorecen la capacidad de tiro de los sistemas de evacuación.

Normatividad Italiana [20]

Generalidades

Las siguientes consideraciones son sólo para sistemas de evacuación de un solo artefacto a gas que descarga directamente a la atmósfera exterior y para instalaciones de tipo doméstico. Estos deben ser del tipo B1 o sea artefactos dotados con disipadores de tiro revertido o corta-tiros diseñados para su acople a sistemas de evacuación que operen por tiro natural.

La evacuación se hará directamente a la atmósfera exterior por medio de conductos metálicos (figura 4.7). Cuando las evacuaciones se hagan a través de patios, deberán cumplirse los requisitos expresados en el numeral 4.3.2 “Evacuación en espacios cerrados a cielo abierto.

El conector para las evacuaciones individuales debe cumplir los siguientes requisitos:

- Ser hermético hacia el exterior.
- La sección, en toda su longitud, no debe ser menor de la correspondiente a la salida del artefacto.
- Debe estar dotado de un tramo vertical, a continuación del tubo de descarga del artefacto, con longitud no menor de dos diámetros del conector.

- Debe tener, después del tramo vertical y durante toda su extensión, un recorrido ascendente con pendiente mínima del 3%. Este recorrido sub-horizontal no debe tener una longitud mayor de $\frac{1}{4}$ de la altura eficaz H de la chimenea ni mayor de 2.50 m con salida por la parte superior del artefacto, ni 1.50 m cuando la salida sea lateral o posterior. En cualquier caso la longitud horizontal debe ser la mínima posible y, en la parte interna de la edificación, no mayor de un metro.
- No debe tener más de dos cambios de dirección para los artefactos con salida por la parte superior ni más de un cambio de dirección cuando la salida sea lateral o posterior. Los cambios de dirección deben ser hechos con ángulos internos mayores de noventa grados y ejecutados únicamente con elementos curvos.
- La descarga final debe hacerse mediante un tramo de tubo vertical conectado al final del tramo sub-horizontal mediante un codo de 90°. La altura entre la salida del artefacto o collarín y la parte superior del tramo vertical no debe ser menor de 1.50 m. A continuación del tramo vertical se instalará un sombrerete o extremo terminal.

Evacuación directa al exterior

Figura 4.7 [20]

fig069.gif

Evacuación en espacios cerrados a cielo abierto (patios)

Los conductos individuales de artefactos con potencias entre 4 kW y 35 kW pueden descargar directamente a un espacio cerrado por todos los lados y a cielo abierto (patios) bajo las siguientes condiciones:

- El lado menor en planta debe tener una longitud mayor o igual a 3.50 m
- El número de columnas de terminales de evacuación (K) que es posible instalar (se entiende por columna una serie de terminales superpuestos, contenidos en una faja vertical de 0,60 m de ancho) debe ser menor o igual a la relación entre la superficie en planta del espacio a cielo abierto (en m²) y la altura en metros, de la pared más baja que delimita el espacio.

- En la misma vertical no deben coexistir evacuaciones ni tomas de aire de otro tipo de instalaciones.

Ejemplo (ver figura 4.8)

Se tiene un espacio delimitado por cuatro paredes en un edificio de siete pisos, con una altura total de 24 m. El área del patio es de 3.5 m x 8.0 m= 28 m².

fig070.gif

Por lo tanto, en este espacio se podrá instalar una sola columna de terminales. Si se quiere colocar dos columnas de artefactos, se debe cumplir una de las siguientes condiciones:

Si se mantiene la altura total de $h = 24$ m $A = h * K = 24 * 2 = 48$ m²

Si se mantiene el área del espacio de $A = 28$ m²

fig071.gif

o sea las evacuaciones en dos columnas de 14 m de altura cada una.

Ejemplo de evacuación directa al exterior en espacios cerrados a cielo abierto (patios)

Figura 4.8 [20]

fig072.gif

Corrección por Condiciones Atmosféricas

No se encontró en la literatura investigada que existieran limitaciones en la aplicabilidad de la normatividad o factores de corrección, por efectos de la altura sobre el nivel del mar del sitio donde se encuentren instalados los artefactos a gas.

Normatividad Española [21]

Ha sido preocupación de los españoles el que los artefactos a gas tengan un tiro adecuado, en cuyo caso el mejor tiro es el que proporciona una chimenea vertical con descarga por encima de la cubierta de la edificación; en otras palabras, aplica el mismo método desarrollado en este trabajo como Método Americano. Sin embargo es claro que muchas de las edificaciones existentes no fueron previstas para la implementación de estos sistemas, por lo que se hace necesario buscar soluciones alternativas.

Después de dos años de realizar ensayos de laboratorio acerca del tiro de los conductos horizontales con salida directa al exterior, se analizaron los resultados y fueron contrastados con un simulador matemático de origen americano; luego de verificados todos los datos reales con el modelo y hasta tanto no hubo seguridad de que los modelos no funcionaban adecuadamente y que ambos datos se correspondían, no se sacaron conclusiones. El resultado fue una Recomendación de SEDIGAS, la RS-U-03 que regula perfectamente cómo deben construirse los conductos horizontales de forma que generen el tiro requerido para una adecuada evacuación de los productos de la combustión. SEDIGAS es la Asociación Técnica Española de la Industria del Gas.

De manera resumida, el método se basa en que la distancia vertical del conducto, es decir, la diferencia de cotas, favorece el tiro (puntos positivos), mientras que todos los obstáculos en el conducto generan pérdida de carga (puntos negativos). Se han sustituido las unidades de presión (Pascal) por puntos, para que sea fácilmente entendible para los diseñadores e instaladores. Se considera que el tiro es suficiente, cuando resulte un saldo positivo de mínimo un punto; quienes colaboraron en el estudio concluyeron que una diferencia de presión de un (1) Pascal era la mínima para que un conducto evacuara adecuadamente.

Artefacto de circuito abierto de tiro natural conectado a un conducto de evacuación directa a través de fachada.

El conducto de evacuación directa a través de fachada del artefacto de circuito abierto de tiro natural deberá cumplir los siguientes requisitos:

- a) Ser metálico, liso interiormente, rígido, resistente a la corrosión y capaz de soportar temperaturas de trabajo de 400° C sin alterarse.
- b) El diámetro interior mínimo del conducto deberá ser el indicado por el fabricante del artefacto y en ningún caso ser inferior a los valores indicados en la tabla 4.6 en función de la potencia nominal del artefacto.
- c) El conducto deberá mantener una pendiente positiva en todos sus tramos y en la parte superior del artefacto deberá disponer de un tramo vertical de al menos 20 cm de longitud, medidos entre la base del collarín y la unión con el primer codo.
- d) El conducto dispondrá en su extremo, de un deflector que será de uno de los modelos aceptados por las normas.
- e) El extremo del conducto (sin contar el deflector), deberá estar separado al menos 10 cm del muro que ha atravesado y 40 cm de cualquier abertura permanente que disponga el propio recinto o los adyacentes.
- f) El conducto estará diseñado de tal forma que partiendo de la puntuación detallada en la tabla 4.7, otorgada para cada accesorio o tramo que puede formar parte de un potencial conducto, la suma total de los puntos de los elementos utilizados en su configuración concreta, presente un valor positivo como mínimo igual a 1. Ver ejemplo de aplicación.

Tabla 4.6: Diámetro interior mínimo de conductos de evacuación directa a través de fachada para artefactos de gas de circuito abierto de tiro natural

Potencia nominal del artefacto kW	Diámetro interior mínimo del conducto mm
Hasta 11,5	90
Hasta 17,5	110
Hasta 24,0	125
Hasta 31,5	139

Superior a 31,5	175
-----------------	-----

Tabla 4.7 Valoración de singularidades del conducto de evacuación

Singularidad	Puntos
Por cada 10 cm de cota total ganada en el conducto por cualquier concepto	+1
Codo mayor que 45° y no superior a 90° (vertical - horizontal)	-2
Codo no superior a 45° (vertical ascendente)	-1
Codo mayor que 45° y no superior a 90° (no vertical no ascendente)	-2
Codo no superior a 45° (no vertical no ascendente)	-1
Codo mayor que 45° y no superior a 90° (horizontal - vertical)	-0,3
Codo no superior a 45° (horizontal ascendente)	-0,1
Por cada metro de longitud de los tramos rectos verticales u horizontales del conducto	-0,5
Deflector de modelo aceptado	-0,3

Ejemplo (ver figura 4.9):

Datos: El conducto consta de un tramo recto vertical (TRV1) que une el collarín del artefacto con el codo, el propio codo, un tramo recto horizontal con pendiente positiva y finaliza en un deflector aceptado por las normas.

TRV1 = 22 cm de longitud libre

TR2 = 245 cm de longitud libre

h = 33 cm: Ganancia total de cota, medida desde el collarín del artefacto hasta el punto de conexión al deflector.

c = 11 cm: Ganancia de cota a causa del codo y la pendiente del tramo recto horizontal

Ejemplo de evacuación directa al exterior

Figura 4.9 [21]

fig073.gif

Aplicando los valores de la tabla 4.7 al conducto, se obtiene:

item

ÍTEM	PUNTOS (-)	PUNTOS (+)	VALORACIÓN GLOBAL
Ganancia de cota: 22 cm + 11 cm = 33 cm * (1 punto/cada 10 cm)		+ 3,30	+ 3,30
Componentes del conducto:			
• Deflector	- 0,30		+ 3,00
• Codo vertical - horizontal	- 2,00		+ 1,00
• Tramos rectos: 12 cm (TRV1) + 245 cm (TR2) = 267 cm * (- 0,5			

puntos/cada 100 cm)	- 1,34		- 0,34
TOTAL PUNTOS			- 0,34

El valor resultante (- 0,34) no alcanza el valor mínimo requerido (+ 1), por lo que el conducto no sería aceptable, debiendo tomarse alguna medida adicional. Esta medida adicional consiste en una ganancia de altura (cota) de aproximadamente 14 cm que se logra, bien aumentando TRV1 o dándole mayor pendiente al tramo recto TR2 o incluyendo un codo y un nuevo tramo vertical antes del sombrerete.

Corrección por Condiciones Atmosféricas

En la literatura española disponible no se hace mención a correcciones que deban efectuarse para considerar las variaciones que puedan derivarse por efectos de la altura sobre el nivel del mar.

Sin embargo, en estudios adelantados en la Universidad de los Andes [33] para la empresa Gas Natural de Bogotá, con el objeto de verificar la aplicabilidad de esta normatividad en Colombia, se concluye que el diámetro del conducto debe incrementarse según la siguiente relación:

fig074.gif

Donde D es el diámetro del conducto de evacuación, P es la presión atmosférica, y el subíndice 1 indica condiciones estándar y el 2, condiciones de trabajo. Para el caso de Medellín, por ejemplo, la relación anterior implica un aumento del 9% en el diámetro del conducto de evacuación, comparado con el que se instalaría a nivel del mar, para una misma potencia dada.

Adicionalmente se señala que para conservar la capacidad de succión obtenida al nivel del mar se debe incrementar la cota vertical de acuerdo con:

fig075.gif

Normatividad Colombiana

Generalidades

La normatividad Colombiana para el caso de las descargas de los productos de la combustión de los artefactos que lo requieren, se resume en las Normas Técnicas Colombianas NTC 3833 y NTC 3567. La primera de ellas establece los requisitos básicos de funcionamiento y especifica las características de construcción e instalación de los conductos y sistemas que se utilicen para evacuar hacia la atmósfera exterior, los productos de la combustión de los artefactos de gas para uso doméstico y comercial; está basada en la Normatividad Americana y la Normatividad Española anteriormente descritas. La NTC 3567 define los requisitos generales de fabricación y ensamble de los conductos metálicos (individuales o colectivos) que se utilicen para evacuar hacia la atmósfera exterior, mediante tiro natural, los productos de la combustión de los artefactos a gas de uso doméstico, comercial e industrial; igualmente, las de los extremos terminales o sombreretes.

Es importante señalar que al comparar los valores de las tablas A.1 (Chimeneas, accesorios y conectores metálicos de pared sencilla acoplados a un solo artefacto de gas del tipo B.1 –por tiro natural- o del tipo B.2 que operen por tiro mecánico inducido) y A.3 (Chimeneas y conectores de cemento asbesto –sic- acoplados a un solo artefacto de gas del tipo B.1 – no aplicables a los artefactos de gas del tipo B.2) de la NTC 3833 con las tablas de la NFPA 54, que es la fuente de información de la norma, se encuentra que la tabla A.1 corresponde a la tabla 10.1 de la NFPA 54, válida para conductos de evacuación de doble pared (Capacity of Type B Double-Wall Gas Vents When Connected to a Single Category I Appliance) mientras que la tabla A.3 de la NTC corresponde a la tabla 10.5 de la NFPA 54, válida para conductos metálicos de pared sencilla o de asbesto cemento (Capacity of Single-Wall Metal Pipe or Type B Asbestos Cement Vents Serving a Single Draft Hood-Equipped Appliance). Esta última es la que se debería estar utilizando en nuestro medio ya que la doble pared no se utiliza para los gasodomésticos.

Corrección por Condiciones Atmosféricas

Para resolver el caso de la incidencia de la altura sobre el nivel del mar en la capacidad de descarga de un conducto en particular, diseñado con las tablas similares a las de la NFPA 54, la NTC 3833 se limita a especificar que: “Para determinar la máxima capacidad de evacuación de un sistema instalado a altitudes superiores a 600 m sobre el nivel del mar, se debe emplear la potencia nominal del artefacto”. Es decir, se recomienda diseñar el sistema de descarga utilizando la potencia del artefacto declarada por el fabricante y referida a condiciones estándar de referencia, sin tener en cuenta la pérdida de potencia del artefacto por el mismo efecto de la altura sobre el nivel del mar, a la cual se encuentre operando. A este último aspecto se hace referencia en el Código Nacional de Gas Combustible (NFPA 54) cuando establece en el numeral 8.1.2 (Edición 1999): "Para operación a elevaciones por encima de 600 m sobre el nivel del mar, la potencia de los equipos será reducida a una tasa de 4% por cada 300 m de altura sobre el nivel del mar antes de seleccionar apropiadamente los tamaños de los equipos".

En el caso de las descargas a fachada, acoge los factores indicados en el estudio de la Universidad de Los Andes aplicables a la Normatividad Española y adiciona un factor de seguridad en la corrección de la cabeza de succión.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Introducción

La parte experimental consistió en verificar en campo el comportamiento de las chimeneas o descargas de los productos de la combustión de dos (2) calentadores a paso trabajando con Gas Natural procedente de la Guajira; los calentadores tienen potencias diferentes. Dicho comportamiento se analizó teniendo en cuenta dos de las metodologías descritas en los capítulos anteriores, como lo son la Americana y la Francesa.

Ambos calentadores tienen un diámetro en el collarín de 5", por lo que se fijó en este mismo valor el diámetro de la chimenea a diseñar; quedó entonces como variable a calcular, la altura de la chimenea por encima del collarín de los calentadores. Ésta se calculó, inicialmente, con la ecuación utilizada por los americanos, teniendo en cuenta la potencia nominal reportada por el fabricante en los datos de placa y sin efectuar correcciones por la altura sobre el nivel del mar a que se encuentra la ciudad de Medellín; luego se calculó, con la misma fórmula, la altura de la chimenea teniendo en cuenta la potencia del calentador obtenida en el sitio de los ensayos (determinada mediante aforos) y el efecto de la presión atmosférica y de la temperatura, igualmente del sitio de los ensayos. Finalmente se confrontó, con los datos leídos del contenido de dióxido de carbono (CO_2 , %V), el comportamiento según las normas francesas.

Según lo anterior, se obtuvieron cuatro (4) alturas diferentes de chimeneas, que fueron utilizadas para cada calentador; se pudo comparar por tanto el efecto de las condiciones atmosféricas en el cálculo de dicha altura, obtener el valor óptimo y realizar las recomendaciones del caso, previo comparativo con el diseño que se obtendría siguiendo lo establecido en la NTC 3833.

Durante los ensayos se dejó constancia de las observaciones sobre cambios que pudieron percibirse en las condiciones atmosféricas, en las condiciones de operación del calentador, en la salubridad del ambiente (con base en la concentración de CO, en partes por millón, medida a 1 m del calentador), presencia de condensados y demás información de interés para el análisis de los resultados.

Descripción de las Instalaciones y Equipos

Instalaciones

Para la ejecución de las pruebas se aprovecharon las instalaciones que EE.PP.M. tiene en el Centro de Operación y Mantenimiento (COM) del gas en el barrio Belén. Allí existen dos zonas en las que se pueden disponer calentadores de agua a paso, una corresponde a la batería de baños del COM y la otra, al laboratorio; para nuestro caso se seleccionó la zona de baños. El sistema de evacuación de humos, con sus dimensiones, se muestra en la figura 5.1. En él pueden conectarse indistintamente los dos calentadores de paso a utilizar en la experimentación.

El sistema tiene la posibilidad de variar la altura del tramo vertical mediante una chimenea deslizante, la que permite obtener los cuatro valores referidos anteriormente. Como variable asociada al gas, se tiene la potencia térmica de cada calentador por lo que ella se modifica al operar con uno u otro de los calentadores antes citados.

Estas variables (altura y potencia térmica) pueden ser controladas durante los ensayos. La temperatura ambiente y la humedad relativa no se introducen como variables (a pesar de serlo) para el diseño del experimento por cuanto no es posible controlarlas. Como una forma de aproximarnos a unas temperaturas ambientes y humedades relativas uniformes se determinó realizar los ensayos a una misma hora y con características similares de condiciones climáticas haciendo las mediciones correspondientes de estas dos (2) variables.

Equipos

Calentadores

Artefacto para la producción instantánea de agua caliente en el cual el calentamiento del agua depende directamente de la cantidad de ésta que circula a través del artefacto; la tasa de flujo de agua se controla a través de un dispositivo ajustador de flujo. El circuito de gas es del tipo de combustión abierto donde el aire de combustión es tomado del recinto en el cual se encuentra instalado y los productos de la combustión son llevados al exterior a través del sistema de evacuación en el caso de los artefactos tipo B.1.

El calentamiento del agua se produce por convección circulando ella a través de un serpentín calentado por los productos de la combustión.

Las características técnicas de los calentadores utilizados en la experimentación se indican en la tabla 5.1

Medidor de gas.

Se utilizó un medidor volumétrico en el que la medida de gas suministrado se efectúa por medio de cámaras con membranas deformables (medidores de diafragma). Según la NTC 2728 [25], la precisión de estos medidores debe estar entre $\pm 3\%$ para caudales entre Q_{\min} y $0.1Q_{\max}$ y entre $\pm 1.5\%$ para caudales entre $0.1Q_{\max}$ y Q_{\max} . La caída de presión en la cámara no debe sobrepasar 200 Pa. Las características técnicas son:

Tabla 5.1 Características de los calentadores de paso

CALENTADOR DE PASO No 1	
Marca	Home Express
Modelo	KN 10000E
Serie	1670
Tipo de gas	Natural

Gasto nominal (P.C.S)	23.4 kW
Potencia útil nominal	17.5 kW
Categoría	I2
Presión de servicio (máx / mín)	23 / 18 mbar
Capacidad	10 l/min

Paso 2

CALENTADOR DE PASO No 2	
Marca	HACEB
Modelo	CPG 13H
Serie	5893
Tipo de gas	Natural
Gasto nominal (P.C.S)	30.7 kW
Potencia útil nominal	21 – 23 kW
Categoría	2H
Presión de servicio (máx / mín)	23 – 18 mbar
Capacidad	13 l/min

Equipos para medición de las variables

Se hicieron mediciones de las variables que influyen en cada una de las metodologías propuestas tanto en el método americano como en el francés.

Además de las características geométricas de las descargas individuales y no asociadas al sistema de evacuación se hicieron mediciones de las variables del gas como son: caudal volumétrico, presión de suministro, temperatura y humedad del ambiente, utilizando para ello instrumentos tales como: medidor de diafragma, manómetro, termómetro, higrómetro y analizador de gases, cuyas características se presentan en los cuadros siguientes:

Tabla 5.2 Características de los medidores

MEDIDOR DE GAS (DIAFRAGMA)	
Marca	Schlumberger
Modelo	Gallus 2000
Serie	200258
Q. Máx	6 m ³ /h
Q. Min	0,04 m ³ /h
P. Máx	20 Kpa - (0.2 bar)
V. C	1.2 dm ³
Tipo	G4

Manómetro

Tabla 5.3 Características de los manómetros

MANÓMETRO DE CARÁTULA (SECO)	
Marca	ASHCROFT
Clase	2,5
Rango	0 – 4 kPa

Resolución	0,1 kPa
Tipo	Análogo

Termómetro Digital Múltiple

La temperatura de los humos se tomó en diferentes puntos, por medio de termocuplas.

Higrómetro

Las características de este equipo, utilizado para determinar la temperatura ambiente y la humedad relativa del sitio donde se realizaron los ensayos, se presentan en la tabla 5.4

Tabla 5.4 Características del higrómetro

HIGRÓMETRO	
Marca	
Modelo	621C
Precisión Temperatura	±0.5 °C 0 °C a 50 °C ±1 °C -20 °C a 0 °C 50 °C a 100 °C
Precisión Humedad Relativa	±2.5% 10% a 90% ±5% <10%, >90%
Sensor	RTD Pt385/1000 Ω

Analizador de gases

Dentro del conducto de evacuación y mediante un detector de gases se tomaron las lecturas correspondientes a CO₂, CO, O₂ y CH₄. Ver características en las tablas 5.5 y 5.6

Tabla 5.5 Características del analizador de gases

ANALIZADOR DE GASES (MAIHAK)	
Marca	MULTOR 610
Modelo	621C
Tecnología	Infrarrojo no dispersivo
Tipo de Medida	En base seca
Error	±0.01%

Tabla 5.6 Rangos del analizador de gases

VARIABLE	RANGO DE MEDIDA (% V)	PRECISION
CO	0 - 5	0.06% del CO absoluto o 5% de la lectura
CO ₂	0 - 25	0.5% del CO ₂ absoluto o 5% de la lectura
CH ₄	0 - 25	12ppm o 5% de la lectura
O ₂	0 - 21	0.1% de O ₂ absoluto o 5% de la lectura
Tiempo de calentamiento	45 min. aproximadamente	

Poder Calorífico

Para la composición del gas y por ende para definir el poder calorífico del mismo, no se realizaron mediciones en sitio, por lo que se utilizó información actualizada

recibida de Ecopetrol en Empresas Públicas de Medellín para el gas natural proveniente de la Guajira, la que se indica a continuación:

Tabla 5.7 Composición del Gas Natural

tab002.gif

Diseño del Experimento

Esquema del Proceso

Los ensayos se llevan a cabo a través del montaje de los calentadores, según se muestra en la figura 5.1. En todos los casos ensayados la altura de la chimenea estuvo por debajo del punto más alto de la edificación, es decir, la descarga siempre fue a la fachada.

Como variables de entrada en la experimentación, se tienen:

- Geometría del sistema de evacuación de los productos de la combustión: Diámetro del conducto (D), longitud horizontal del conector (L), altura de la chimenea (H)
- Material del conducto: Aislamiento, coeficiente global de transferencia de calor (U), resistencia total al flujo (R).
- Condiciones atmosféricas: Presión atmosférica (P), humedad relativa (Φ) y temperatura ambiente (T).
- Potencia térmica del artefacto.

Como variable de salida:

- Gases de combustión: porcentaje en volumen de oxígeno (O_2 , %V), porcentaje en volumen de dióxido de carbono (CO_2 , %V), porcentaje en volumen de monóxido de carbono (CO, %V), porcentaje en volumen de metano (CH_4 , %V), temperatura (t_2), fracción de calor sensible en los productos de la combustión (E).

Variables incontrolables

- Condiciones atmosféricas: Presión atmosférica (P), humedad relativa (Φ) y temperatura ambiente (T).

VARIABLES DE RESPUESTA

- Máxima capacidad de evacuación expresada como potencia térmica del artefacto (I)
- Contenido de CO₂ como porcentaje en volumen de humos húmedos diluidos

Disposición de los calentadores para los ensayos

Figura 5.1

fig076.gif

Planteamiento de las hipótesis

La altura H y el diámetro D de la chimenea afectan de manera directamente proporcional su capacidad de evacuación, de forma que puede lograrse una combinación entre estos factores para lograr una capacidad determinada.

Por otra parte, se encuentra que la formulación teórica para la evacuación de humos en una chimenea tiene como una de sus variables la presión atmosférica, de tal manera que una disminución en ésta, produce una rebaja en la capacidad de evacuación. Específicamente para Medellín, con una altitud de 1500 m.s.n.m., y con una presión atmosférica de 850 mbar (presión atmosférica de referencia 1013 mbar para las cuales se establecen en la NTC 3833 las tablas de diseño) se espera que la capacidad de evacuación de las chimeneas sea inferior a la obtenida a nivel del mar, requiriéndose en consecuencia aumentar la altura de la chimenea o el diámetro para una misma potencia determinada.

Consideraciones técnicas del experimento

Para definir la potencia de los calentadores, se puso a funcionar cada uno a su máxima capacidad, realizando luego las siguientes actividades y cálculos: a) se tomaron lecturas en el medidor de gas cada minuto durante 5 minutos para calcular el caudal volumétrico en sitio; b) con la temperatura ambiente y la presión de suministro

(verificada en un punto de la red a través de un manómetro debidamente calibrado) el caudal volumétrico en sitio se llevó a condiciones estándar de referencia; c) con el poder calorífico superior del gas reportado por ECOPEPETROL se encontró la potencia del artefacto, la que a su vez se comparó con los datos de placa suministrados por el fabricante. Este procedimiento se realizó una sola vez para los dos artefactos durante toda la experimentación, puesto que se tuvo la precaución de no prender aparatos diferentes que pudieran afectar la presión de operación, única variable que influye en el caudal, cuando se conserva el mismo inyector en el artefacto.

Se utilizaron los mismos dos calentadores para todos los ensayos, asegurando que las dos potencias utilizadas fueran exactamente las mismas.

Los instrumentos de medición de variables siempre fueron los mismos (véase numerales anteriores) así como las personas encargadas de su lectura y manipulación.

Para cada sesión de experimentos y antes de iniciar la toma de lecturas, se calibró el analizador de gases (Maihak) con una mezcla de nitrógeno de composición conocida. (Tiempo requerido 45-60 minutos).

Para cada réplica se tomó, con el higrómetro, una lectura de temperatura ambiente y humedad relativa.

En cada réplica y antes de realizar cualquier medición, se encendieron los calentadores durante 5 minutos con el fin de lograr el equilibrio térmico del sistema, el cual se verificó igualmente observando que las lecturas de la temperatura en tres puntos diferentes fueran constantes; los tres puntos se indican en la figura 5.1. La lectura en el sombrerete se tomó para compararla con la temperatura de rocío.

La lectura de composición de los gases de combustión se realizó en un punto localizado en el tramo recto vertical después del collarín, para lo cual se esperó mínimo tres minutos después de instalado el sensor en el punto indicado (ver figura 5.1) y observando que no tuviera variaciones significativas en sus valores.

Se llevaron a cabo igualmente análisis cualitativos del comportamiento de los sistemas de evacuación ensayados, según los métodos establecidos por la NTC 3833 en el numeral 5, así:

- “**5.5** Encender todos los artefactos a gas que se encuentren en el recinto, en su posición de máxima potencia y dejarlos encendidos por tiempo de mínimo 5 min, para permitir el calentamiento del sistema de evacuación, antes de iniciar las verificaciones”
- “**5.6.1** Con la ayuda de un espejo cromado o un tubo detector de corriente de aire, verificar que no se presente revoco, y que el sistema es completamente hermético, para esto se debe ubicar el espejo o el detector de corriente de aire en la unión del collarín con el sistema de evacuación”.
- **5.6.2** Con la ayuda de un analizador de gases, establecer la cantidad de CO corregido (libre de aire y vapor de agua), que se encuentra en el ambiente.”.

Para dar cumplimiento al numeral 5.6.2 de la NTC se colocó un detector de CO debidamente calibrado directamente encima del calentador.

Consideraciones estadísticas

Se definió como factor A la altura H de la chimenea, para la cual se establecieron cuatro niveles que corresponden a las dos alturas calculadas para cada uno de los calentadores: la una a condiciones de referencia (utilizando la potencia de placa) y la segunda, a condiciones de sitio (utilizando la potencia calculada con los consumos de sitio). Como factor B se definió la potencia, con dos niveles que corresponden a los dos calentadores.

Para la experimentación se seleccionó el modelo estadístico denominado Bifactorial Multivariado porque es el apropiado para el caso en que se tienen dos factores, cada uno de ellos con diferentes niveles y permite determinar la interacción entre factores, además porque tiene más de una variable de respuesta.

La variable de referencia utilizada fue el porcentaje de CO₂ presente en los productos de la combustión dado que este compuesto siempre se encontrará en ellos, además de

ser un factor representativo y determinante en el caso del modelo Francés antes descrito. La desviación por error de experimentación se definió en un valor de 0,25%, calculado con base en el método Francés, según el cual existe un límite fijado en el 5% del contenido de CO₂ en los humos diluidos, para una adecuada evacuación. Adicionalmente se tuvieron en cuenta los resultados de ensayos anteriores para diferentes calentadores, en los que se encontraron desviaciones estándar de 0,33%.

Con el objeto de darle a la experimentación un alto nivel de confianza, el nivel de significancia fue definido como 0,05.

La replicación del experimento, la cual mejora la precisión del mismo, se puede representar mediante la siguiente ecuación:

fig077.gif

donde:

n = número de réplicas

a = nivel del factor altura de la chimenea, cuyo valor es 4

b = nivel del factor potencia, cuyo valor es 2

D = error de experimentación, cuyo valor es 0.0025

σ = desviación estándar, cuyo valor es 0.0033

Con los valores definidos y mediante las gráficas “Características de Operación” que aparecen en la referencia [22] se define la potencia de la prueba, que para el caso fue de 0,63 que es adecuada para la relevancia y nivel de significancia que se quiso dar a la experimentación. El número de réplicas correspondiente fue de 5.

En la Tabla 5.8 se presenta la ficha técnica resumen de la experimentación.

Esquema Experimental y Aleatoriedad asignada

Definido el número de réplicas en 5 para cada una de las alturas y los dos calentadores, se obtuvo que un tamaño muestral de 20 para cada calentador y por

ende un total de 40 en toda la experimentación. La aleatoriedad se definió para cada calentador en particular, es decir, primero se realizaron los ensayos con uno de ellos y luego con el otro; con la ayuda de la función Random en un computador se asignó la aleatoriedad que se muestra en la Tabla 5.9.

Tabla 5.8 Ficha Técnica de la Experimentación

NOMBRE	DESCRIPCIÓN
Modelo	Bifactorial Multivariado
Variable de Referencia	CO ₂
Niveles del Factor A	4
Varianza	0.1066
Error de la experimentación	0.25%
Nivel de Significancia	0.05
Potencia de la Prueba	0,63
Grados de Libertad	3
Número mínimo de réplicas	5

Tabla 5.9 Aleatoriedad de los Ensayos

FACTOR ALTURA, "H"					
FACTOR POTENCIA, "P"	Potencia 1 (23,4 kW)	Altura 1 (1.05 m)	Altura 2 (1.17 m)	Altura 3 (1.55 m)	Altura 4 (1.87 m)
		1	3	2	7
		4	5	11	12

Potencia 2 (28.7 kW)	9	6	13	15
	14	8	17	16
	20	10	19	18
	5	3	1	2
	7	10	6	4
	14	11	12	8
	15	16	19	9
	18	17	20	13

Ensayos preliminares

Se realizaron ensayos preliminares para definir localización de los equipos de medición, puntos de medición, infraestructura necesaria, adecuaciones locativas adicionales, valores preliminares de algunos de los parámetros y tiempo estimado de la duración de cada réplica.

De lo anterior se obtuvo la siguiente información de los tiempos de ejecución:

- Calentamiento y calibración del Analizador de Gases: 45 a 60 minutos. Sólo una vez por cada sesión de experimentación. Simultáneamente con esta actividad se fijó la primera altura de chimenea a experimentar.
- Funcionamiento del calentador para lograr equilibrio térmico del sistema (calentador – sistema de evacuación de los productos de la combustión), antes de efectuar lectura de las temperaturas en los tres sitios de la chimenea seleccionados: 5 minutos.

- Posterior a la lectura de temperaturas, se instaló el sensor del analizador de gases y se esperó que la lectura de las variables no variara significativamente: 3 a 5 minutos.
- Ajuste de la altura de la chimenea y enfriamiento del sistema calentador - chimenea para un nuevo experimento: 5 minutos mínimo

Con lo anterior se definió la realización de mínimo 3 experimentos diarios para un total de 13 sesiones. Los ensayos se realizaron día por medio, para 3 días por semana y una duración total de 4 semanas.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Determinación de los parámetros

Potencia Térmica de los calentadores

Para determinar la potencia térmica de los calentadores se realizaron varios aforos en sitio, que permitieron encontrar el flujo volumétrico de Gas Natural para cada calentador; expresado a las condiciones estándar de referencia (101.325 kPa de presión absoluta y 15,56 °C de temperatura) y, con el poder calorífico superior del Gas Natural de Guajira reportado por ECOPETROL, se obtuvo la potencia térmica, según las siguientes ecuaciones:

fig078.gif

Donde:

P_0 : Presión estándar (101.325 kPa)

V_0 : Flujo volumétrico a condiciones estándar (sm^3/h)

T_0 : Temperatura estándar (15.56 °C)

P_1 : Presión absoluta de medición (85.2 + 2.3 kPa)

V_1 : Flujo volumétrico a condiciones de sitio (m^3/h)

T_1 : Temperatura del gas en el sitio (22.05 °C)

P_t : Potencia Térmica (kW)

PCS: Poder calorífico superior del Gas (996.95 BTU/ pie^3 o 10.314 kW/ sm^3)

El flujo volumétrico medido en sitio fue de 45 y 55 l/min. (2.7 y 3.3 m^3/h) para los calentadores 1 y 2, respectivamente.

Remplazando los valores anteriores en las ecuaciones 6.1 y 6.2 se obtienen:

V_{01} : 2.28 sm³/h

P_{T0} : 23.4 kW

V_{01} : 2.787 sm³/h

P_{T0} : 28.7 kW

Para el calentador 1 se encontró que la potencia térmica en sitio coincidió con la potencia térmica reportada por el fabricante en la placa, lo cual no es lógico si se tiene en cuenta que esta última debe corresponder a la potencia obtenida a nivel del mar, mientras que la de sitio debe ser menor a la anterior al considerar su disminución con la variación en la altura sobre el nivel del mar, a que se refiere la NFPA 54. Esta diferencia se explica bien por un valor errado en los datos de placa o por una inadecuada conversión del calentador puesto que inicialmente estaba reglado para trabajar con GLP y luego fue convertido, para Gas Natural.

Para el calentador 2, mientras el dato de placa indica 30.8 kW, el valor obtenido fue de 28.7 kW, es decir, un 6.8% menor que el de placa; según trabajos adelantados por Amel A., Andrés la caída de potencia es del orden de 1.5% por cada 304.9 m (1,000 pies) de diferencia de altura sobre el nivel medio del mar, lo que representaría una pérdida total aproximada en el sitio de los ensayos, del 7.4%.

Diámetro de la Chimenea

El diámetro de la chimenea depende no sólo de la cantidad de productos de la combustión que se requiere evacuar o, en otras palabras, de la potencia térmica del artefacto a ella conectado, sino del trazado de la misma (longitud horizontal, longitud vertical y número y forma de los accesorios, además de las otras variables descritas en este trabajo.

La NTC 3833 establece como límite inferior el correspondiente al del collarín del calentador. En los dos calentadores estudiados y más aún, en la generalidad de los calentadores de paso utilizados en Colombia para capacidades de 10 y de 13 l/min., el diámetro del collarín es de 5"; por lo anterior, se fijó en este valor el diámetro de la chimenea a emplear.

Longitud Horizontal de la Chimenea

Como el objetivo de la investigación está relacionado y orientado a estudiar la incidencia de las condiciones atmosféricas del sitio, en la altura de la chimenea, inicialmente sólo se previó tomar un tramo horizontal constante, definido mediante el desarrollo de dos codos verticales aproximadamente a 90° y un tramo recto entre ellos, suficiente para atravesar el muro de fachada; se cumplía así además con las separaciones mínimas tanto del calentador, como de la chimenea, con respecto al muro donde se instalan. La longitud así obtenida fue $L_1 = 0.51$ m.

Posteriormente se consideró de interés estudiar la incidencia del tramo horizontal, para lo cual se implementó y simuló un trazado con una longitud horizontal de $L_2 = 1.64$ m y se ensayó sólo el calentador 2, con las dos alturas mayores obtenidas como se indica en el numeral 6.1.4.

Altura de la Chimenea

Como se mencionó anteriormente, para cada calentador se definieron dos alturas empleando siempre la ecuación 4.29. La primera corresponde a la metodología propuesta en la NTC 3833 para considerar los efectos de la altura sobre el nivel del mar, según la cual aplican las tablas elaboradas con base en la ecuación de Kinhead, para las condiciones a nivel del mar y con los datos de potencia térmica que aparece en la placa del calentador; la segunda, con la potencia térmica del calentador obtenida en el sitio y con los valores de presión atmosférica y temperatura ambiente promedio de Medellín: 85.2 kPa y 22.05 °C, respectivamente.

Para el calentador 1 tales alturas son 1.05 m y 1.17 m, mientras que para el 2 son 1.52 m y 1.87 m. Cada calentador se ensayó con las cuatro alturas de chimenea, con el número de réplicas y en el orden establecidos en la tabla 5.9.

Propiedades del Gas Natural

Partiendo de la composición del Gas Natural de Guajira (ver tabla 5.7) y con las ecuaciones de la combustión estequiométrica, fueron calculadas las siguientes propiedades del gas:

$V_a = 9.4136 \text{ m}^3$ de aire/ m^3 de combustible

$V_{\text{H}_2\text{O}} = 1.9724 \text{ m}^3$ de $\text{H}_2\text{O}/\text{m}^3$ de combustible

$V_{\text{CO}_2} = 0.9890 \text{ m}^3$ de CO_2/m^3 de combustible

$V'_{f0} = 10.4022 \text{ m}^3$ de humos húmedos/ m^3 de combustible

$V_{f0} = 8.4298 \text{ m}^3$ de humos secos/ m^3 de combustible

Coefficiente global de pérdida de presión

Para la configuración que se tiene con L_1 y según las referencias [7] y [8], el coeficiente global de pérdida de presión (ξ) del conducto puede ser estimado como:

Cabeza de velocidad 1.00

Corta-tiro 0.20

Codos* a 90° (2) 2.00

Global 3.20

*Para codos de 90° este valor varía entre 0.20 y 1.10 dependiendo de la relación entre el radio de giro y el diámetro del conducto (R/D), variando ésta entre 0.50 y 2.00, respectivamente. La NTC 3567 [34] establece para esta relación un valor mínimo de 1.0.

RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

En la tabla 6.1 se resumen los resultados obtenidos durante la experimentación; se indican en ella los valores asociados a variables tales como la temperatura ambiente y humedad relativa, la composición de los productos de la combustión secos y las temperaturas de los puntos indicados en la figura 5.1. La información se organizó en forma ascendente con respecto a la altura y en la columna ENSAYO se refleja la aleatoriedad a que se refiere la tabla 5.9.

Con base en los resultados de la tabla 6.1 se calcularon los valores de los parámetros indicados en las tablas 6.2 a 6.7. Es de anotar que el orden de las filas utilizado en la

tabla 6.1 se conserva para las demás, de tal forma que cada fila siempre corresponde al mismo ensayo.

Tabla 6.1

tab003.gif

Tabla 6.2: Corresponde a los cálculos teóricos de la ecuación 4.29 de la normatividad americana; los valores asumidos para t_2 , fueron los leídos durante los ensayos. Según la columna I, sólo para alturas iguales o superiores a 1.52 m, la capacidad del sistema de evacuación es igual o mayor a la potencia térmica del calentador 1, mientras que para el calentador 2, teóricamente no se logra la capacidad de evacuación requerida, inclusive para el caso de mayor altura (1.87 m) de chimenea. La última columna corresponde a la altura mínima requerida para alcanzar una capacidad de evacuación equivalente a la potencia térmica de sitio de cada calentador.

Tabla 6.3: En ella se indican las capacidades teóricas máximas de evacuación calculadas según la normatividad americana, a las condiciones estándar de referencia, asignando a la temperatura t_2 el valor recomendado por el autor. Puede decirse que para el calentador 1, de estar instalado en un sitio a nivel del mar, la capacidad de evacuación se obtendría para una altura igual o mayor a 1.17 m si $L = 0.51$ m, mientras que para el calentador 2 y bajo las mismas condiciones, la altura mínima sería 1.52 m. Si $L = 1.64$ m, teóricamente se requeriría una altura superior a 1.87 m para alcanzar la capacidad de evacuación necesaria para la potencia de este calentador.

Tabla 6.4: Se utiliza para el cálculo del factor indicativo de la condensación, como se describió en el numeral 4.2.3; los valores encontrados para los dos calentadores se indican en la figura 4.6.

Tabla 6.5: Con la información del gas natural de Guajira de la Tabla 5.7, se calcularon sus propiedades como fueron definidas en el numeral 3.2.

Tabla 6.2

tab004.gif

Tabla 6.3

tab005.gif

Tabla 6.4

tab006.gif

Tabla 6.6: Esta tabla muestra las propiedades principales de los humos diluidos a partir de las propiedades del gas (Tabla 6.5), y de los valores obtenidos del contenido de CO₂ en humos secos. El valor de la presión parcial del agua en el aire, fue calculada de acuerdo con el software de sicrometría "PSY" y con base en los resultados de la experimentación.

Tabla 6.7: corresponde a los cálculos obtenidos según la normatividad francesa tal como se describe en el diagrama de flujo del numeral 4.1.7.2.3

Tabla 6.5 Propiedades del gas natural de Guajira

V_a (m ³ a/m ³ C)	V_{H_2O} (m ³ H ₂ O/m ³ C)	V_{CO_2} (m ³ CO ₂ /m ³ C)	V'_{f0} (m ³ hh/m ³ C)	V_{f0} (m ³ hs/m ³ C)
9.4136	1.9724	0.989	10.4022	8.4298

Además de las mediciones de las variables anteriores, y tal como se describió en el numeral 5.3.3, se midió la concentración de CO en el ambiente al lado del collarín (aunque debería medirse a 1 m del artefacto), encontrando en todos los casos ausencia de CO, en partes por millón (0 ppm); también, con la ayuda de un espejo cromado, fue verificada la ausencia de reflujos al colocar éste al lado del corta-tiro y no resultar empañado.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Para cumplir con el objetivo del presente trabajo, se procedió a realizar una serie de cálculos de las variables potencia (P_t), altura (H) y longitud del conector (L). Para este cálculo (ver tabla 6.8) se mantuvieron fijas dos de las variables (columnas Datos de Entrada) y se calculó la tercera (columna Variables de

Diseño) de acuerdo con las tablas A.1 y A.3 de la NTC 3833 por las razones expuestas en el numeral 4.5.

Tabla 6.8

tab007.gif

Con relación a la altura H del conducto, las tablas de la norma comienzan desde una altura mínima de 1.80 m. De acuerdo con lo observado durante la experimentación, el sistema de evacuación no presentó ningún comportamiento anómalo para alturas entre 1.87 m y 1.05 m.

Cuando las longitudes del conector son cortas, valores de 0.51 m, se encuentran dentro de los valores máximos permitidos por la norma. Por lo tanto no puede hablarse de un factor de corrección. Para longitudes mayores, como 1.64 m, puede decirse que los valores de las tablas de la norma pueden ser afectados por valor de corrección mayor que la unidad, o sea, que pueden aumentarse la longitudes reales.

Con relación a la potencia, los factores de corrección calculados con la tabla A.1 muestran sólo para el ensayo con $L = 1.64$ m que la potencia del experimento es mayor que la que permite el diseño (106.8 kW permitidos por norma vs. 110.9 kW reales). En el resto, la potencia utilizada no superó la de diseño. Cuando se utiliza la tabla A.3, el calentador de mayor potencia es el que supera la potencia de diseño, independiente de la longitud del conector.

- Se obtuvo una mayor capacidad teórica de evacuación de la chimenea, como era de esperarse, al pasar de 29 kW a 20 kW para las mismas alturas (ver tabla 6.2), corroborándose al comparar las velocidades que alcanzan los productos de la combustión que disminuyen de 0.86 m/s a 0.70 m/s respectivamente (ver tabla 6.7).
- En el caso del calentador de 30.8 kW (Calentador 2), T_1 es muy uniforme independiente de la altura presentando una desviación estándar de 2.3 °C, mientras que T_2 disminuye con la altura de la chimenea, pasando de 147 °C para

una altura de 1.05 m a 147°C para una altura de 1.87 m, indicio de una mejor entrada de aire de dilución y un aumento en la capacidad de evacuación a medida que aumenta la altura.

- Al hacerse mayor la longitud horizontal del conector, todos los parámetros leídos y calculados mostraron una mayor estabilidad y homogeneidad, comparados con los obtenidos en los ensayos con la longitud corta ($L_1 = 0.51$ m) lo cual podría atribuirse a la turbulencia que genera el hecho de tener dos accesorios (codos) demasiado cerca. Se nota claramente entonces en $L_2 = 1.64$ m que al aumentar la altura de la chimenea de 1.52 m a 1.87 m, se incrementan la entrada de aire de dilución, al pasar de 10.25 a 11.58 m³ aire/ m³ combustible (ver tabla 6.6), y la velocidad de los productos de la combustión en el conducto de evacuación, al pasar de 1.29 a 1.37 m/s ver tabla 6.7), aumentando por consiguiente la capacidad de evacuación de la chimenea. Al aumentar el aire de dilución, la concentración de CO₂ en los humos diluidos (γ') se disminuye, encontrando, para este caso en consideración, valores por debajo del límite de desbordamiento a que hace referencia la normatividad Francesa lo que se traduce igualmente en una adecuada evacuación de los productos de la combustión; el valor promedio encontrado fue 4.55% (ver tabla 6.7).
- Los valores bajos obtenidos para ξ (promedio de 1.15) en el caso del calentador 2 con $L = 1.64$ m, no deben interpretarse como que las pérdidas permisibles en el conector fueran bajas, sino que por presentar valores de γ' por debajo del límite de desbordamiento (establecido en 5%), el comportamiento del sistema de evacuación fue adecuado. Quiere decir, de otra forma, que en el trazado del conector pudieron existir pérdidas adicionales, representadas bien en mayor longitud horizontal o bien en accesorios adicionales, sin que γ' hubiera superado el citado límite.
- Según el valor calculado en el numeral 6.1.6, todos los casos en que ξ calculado estuvo por encima de 3.20 implican que, desde el punto de vista teórico, el sistema de evacuación operó satisfactoriamente. Sin embargo, ello depende del factor que se acepte como límite de desbordamiento.

- Los valores de t_2 calculados al emplear la normatividad francesa (promedio 173 °C, ver tabla 6.7), son mayores que los recomendados por la normatividad americana (149 °C, ver rango de aplicabilidad en numeral 4.2.1) y obtenidos durante la experimentación (promedio 150 °C, ver tabla 6.1), lo que conduce a que la capacidad teórica de las chimeneas de las tablas de la NFPA 54, y por ende de la NTC 3833, sea mayor en la realidad, lo que llevaría a sobre diseñar los sistemas de evacuación.
- En la verificación cualitativa del comportamiento de los sistemas de evacuación no se encontraron indicios de mal funcionamiento en ninguno de ellos. La medición de CO en el ambiente registró en todos los casos 0 ppm.
- Analizando los resultados basados en la normatividad francesa se nota que el valor ξ aumenta a medida que disminuye la potencia térmica del artefacto, al pasar de un valor de 3.13 para el calentador de 23.4 kW a un valor de 2.85 para el calentador de 28.7 kW (ver tabla 6.7), es decir, una chimenea con una geometría definida y conectada a un calentador dado, admite mayores pérdidas en el trazado del conector que si fuera conectada a uno de mayor potencia, como era de esperarse. Igualmente, una chimenea de mayor altura permite mayores pérdidas en el trazado del conector.
- De la tabla 6.1 se observa que en el caso del calentador de 23.4 kW (Calentador 1), donde la altura de 1.87 podría decirse que es mayor a la requerida, es notable el incremento de la temperatura inmediatamente después del corta-tiro ($T_1 = 223^\circ\text{C}$ en promedio), comparada con la obtenida para la altura de 1.05 m ($T_1 = 200^\circ\text{C}$ en promedio), mientras que la temperatura antes de ingresar al tramo vertical o chimenea propiamente dicha es menor, siendo $T_2 = 153^\circ\text{C}$ para la primera altura y 170°C para la segunda.
- Lo anterior es un indicio de una mayor entrada de aire de dilución a través del corta-tiro y se refleja igualmente en los cálculos del factor de aireación, “n” (ver tabla 6.6), el cual varía de 1.68 para la altura de 1.87 m a un valor de 1.35 para 1.05 m.

- En relación con la composición de los productos de la combustión se observa que al aumentar la potencia térmica del calentador, para una misma configuración, el contenido de O_2 es menor, al variar de 8.59% a 6.24% (ver tabla 6.1), disminuyendo por tanto el aire de dilución que ingresa al sistema a través del corta-tiro, variando de un promedio de 4.44 a 1.78 m^3 aire/ m^3 combustible (ver tabla 6.6). Al disminuir el aire de dilución, disminuye γ' . La altura de la chimenea también tiene un efecto inversamente proporcional en el contenido de CO_2 en los productos de la combustión.
- T_1 se observa consistentemente más alta en el calentador 1 que en el 2, a pesar de su menor potencia: para el primero la temperatura promedio es de 203 °C mientras que para el segundo es de 176 °C (ver tabla 6.1).
- La temperatura en el sombrero (T_3), como era de esperarse, disminuye a medida que aumenta la altura de la chimenea y es consistente en el caso de los dos calentadores; para el calentador 1 baja de 150 °C a 125 °C y para el calentador 2 baja de 134 °C a 117 °C. Igual sucede en el calentador 2 cuando se varió la longitud horizontal del conector: disminuyendo en un promedio de 17 °C. En los ensayos realizados, en ningún caso esta temperatura estuvo por debajo, ni siquiera próxima, a la temperatura de rocío de los productos de la combustión, por lo que no se presentó condensación de los mismos. (Ver tablas 6.4 y 6.6, y figura 6.1). En promedio la temperatura de rocío tuvo un valor de 51 °C.

Límites de condensación de los sistemas de evacuación ensayados Figura 6.1

fig079.gif

CONCLUSIONES

- Es posible en Medellín descargar los productos de la combustión de calentadores de paso Tipo B.1 con potencia térmica hasta 30.8 kW, mediante chimeneas con longitud horizontal del conector (L_1) hasta 0.51 m y altura mínima de 1.05 m, medida desde el collarín. Lo anterior quiere decir que la altura mínima de las chimeneas individuales de las tablas de la NTC 3833, para estas configuraciones y a las condiciones ambientales durante los experimentos, pueden afectarse por un factor hasta de 0.58.

Resumen de factores

tab008.gif

- Como la norma no permite extrapolaciones y siendo la altura H de 1.80 m mínimo, los factores de corrección, aunque muestren una tendencia a aumentar de acuerdo con la altura de las chimeneas, según la tabla 6.8, no son concluyentes en cuanto a su valor. Por lo tanto, deben realizarse ensayos adicionales para alturas por debajo de 1.80 m y bajo condiciones más extremas de humedad y temperatura ambiente ya que se pueden tener variaciones en la capacidad de evacuación de la chimenea en un 15% para cambios de temperatura del 60%.
- Calentadores de paso del tipo B.1 de 30.8 kW de potencia térmica con sistemas de evacuación cuya longitud horizontal del conector máxima es 1.64 m, pueden tener una altura mínima de 1.52 m, o sea, afectar la altura de diseño de la tabla A.1 por un factor de 0.75.
- Los calentadores utilizados para los ensayos representan la mayoría de los calentadores de paso utilizados en el sector residencial. Se observan comportamiento satisfactorio con alturas hasta una 40% por debajo de las de diseño resultando que los costos asociados en esta reducción se vuelvan muy relevantes.

- Para los dos calentadores utilizados con longitud de conector de 0.51 m y en el rango de alturas ensayado, si bien la concentración de CO₂ en los humos diluidos está por encima del 5%, valor máximo establecido en la teoría que sirve de base a la normatividad francesa para definir el límite de desbordamiento, no se detectaron síntomas de mal funcionamiento puesto que no se presentó reflujó, las temperaturas a lo largo de la chimenea están dentro de rangos normales citados en la literatura y no se detectó presencia de CO en el ambiente.
- Según lo anterior, en la ciudad de Medellín y para el caso de descargas individuales de los productos de la combustión hacia el exterior por medio de conductos metálicos, es posible emplear alturas de chimeneas menores a la indicada como mínima (1.80 m) en las tablas que para el diseño de este tipo de chimeneas incluye la NTC 3833 [1].
- La presencia de un tramo horizontal relativamente largo favoreció la estabilización de los diferentes parámetros leídos o calculados. Se considera que igual efecto podrían ocasionar el disponer de un tramo recto sobre el collarín (0.20 m o entre dos y tres veces el diámetro del conducto, como lo sugieren algunas normas como la italiana –numeral 4.3- y la española –numeral 4.4-) o un tramo un poco mayor a los 0.51 m utilizados entre los ejes de los dos codos horizontal y vertical, de los ensayos iniciales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] NTC 3833, Dimensionamiento, construcción, montaje y evaluación de los sistemas para la evacuación de los productos de la combustión generados por los artefactos que funcionan a gas, ICONTEC, 2002.
- [2] National Fuel Gas Code, American Gas Association, NFPA 54, 1999.
- [3] Intoxicación por Monóxido de Carbono, The Journal of the American Medical Association, 1036 JAMA, August 28, 2002 – Vol 288, No 8 (<http://www.ama-assn.org/public/journals/patient/spanpdf/pdfpat0828.pdf>).
- [4] The Hamel Volunteer Fire Department, (<http://www.freenet.msp.mn.us/people/guestb/pubed/cofaq.html>)

- [5] Amell, Andrés, Barraza, Lorenzo y Gómez, Elías: Tecnología de la combustión de los gases y quemadores atmosféricos de premezcla, Centro de extensión académica, U. de A., 1998
- [6] Resolución 14471, “por la cual se fijan unos requisitos mínimos de calidad e idoneidad”, Superintendencia de Industria y Comercio, Mayo 14 de 2002.
- [7] Evacuation des produits de la combustion du gaz et ventilation des locaux, Association Technique de L'industrie de gaz en France, 1981.
- [8] Instruction pratique M-280, pour le calcul des conduits de fumée des chaufferies utilisant des combustibles gazeux, Gaz de France, Direction des études techniques nouvelles, Janvier 1968.
- [9] "Gas Engineer Handbook", de la American Gas Association, first edition, 1965.
- [10] Conductos de evacuación directa a través de fachada, Revista ACOGAS N° 30 /enero-junio del 2001.
- [11] Evacuación de productos de la combustión: chimeneas, Revista Montaje e Instalaciones, Vol. 26 N° 294, abril/96.
- [12] Evacuación de productos de la combustión de aparatos de gas nuevos, Revista Gas Actual, N° 52, Octubre de 1999.
- [13] Fundamentals of gas appliances, American Gas Association, Folleto F 2364, 1989.
- [14] Sizing of vent pipe and chimneys for gas appliances, Research report N° 1300, American Gas Association Laboratories, 1960.
- [15] Principles of draft Hood Operation and Design, Research Bulletin N° 74, American Gas Association, 1956.
- [16] North American Combustion Handbook, Vol. I, 1997, 3ra Ed., pp. 218-228.
- [17] Estudio de ductos de evacuación colectivos y calidad de ambientes, Ossa H., Edgar Alexander, EE.PP.M., 1996.
- [18] Estudio de los sistemas de evacuación de los calentadores de paso a gas, López A., Carlos mauricio, EE.PP.M., 1996.
- [19] Evacuación de humos producto de la combustión de hidrocarburos gaseosos, Urán C., Alexandra, EE.PP.M., 1994.

- [20] Norma UNI 7129, Impianti a gas per uso domestico alimentati da rete di distribuzione. 1992.
- [21] Recomendación SEDIGAS RS-U-03, Condiciones de Evacuación de los Productos de la Combustión en Aparatos de Gas de Producción de Agua Caliente Sanitaria, Calefacción o Mixtos, 1997 (<http://www.bilbogas.es/documents/rsu03gp.pdf>)
- [22] Montgomery, Douglas C.. Design and Anaysis of Experiments, 1991.
- [23] Achenbach, P. R. and Cole, D. L. Performance of fourteen masonry chimneys under steady state conditions, ASHVE Transactions, volume 55, page 147, 1949.
- [24] Brown, W. G. and Colborne, W. G.: Fundamentals of chimney performance, Canadian Journal of Technology, Volume 34, 1956.
- [25] Kinkead, A.: Operating Characteristics of a Gas Vent, Pacific Coast Gas Association Proceedings, volume 43, 1952.
- [26] Schmitt, L. B. and Engdahl, R. B.: Performance of residencial chimneys, ASHVE Transactions, volume 55, page 252, 1949.
- [27] Stone, R. L.: Design of multiple gas vent, Air Conditioning, Heating and Ventilating, pages 76-85, july, 1957.
- [28] Thulman, R. K.: Capacity of flues, Fuel Oil and Oil Heat, October, 1955, pages 65-67.
- [29] Wills, F. W. and Fairchild, E.: Flow characteristics of modern gas vent, (unpublished).
- [30] Bennet, W. J. and Purkis, C. H.: Experiments with shared and individual flues for gas appliances, The Institutions of Gas Engineers, publication N° 495, 1956.
- [31] Carne, J. B. and White, T. T.: Observations of the performance of a multi-flue system and single ducts for appliances with room sealed combustion chambers. The Institution of Gas Engineers, publication N° 496, 1956.
- [32] Bennet, W. J. and Brady, K. J. D. and Dance, E. W. G.: Further Experiments with shared and individuals flues for gas appliances, Gas Council Research Communication GC 53, 1958.
- [33] Huertas, J., Piamba, Beltrán, R. y Arrieta, E.: Ductos de Evacuación Directa a través de Fachada, Universidad de los Andes, 1998.

[34] NTC 3567. Mecánica. Ductos metálicos para la evacuación por tiro natural de los productos de la combustión del gas (GLP o gas natural), ICONTEC, 1993.